

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## Раздувающаяся вселенная и вакуумоподобное состояние физической среды

Э.Б. Глинер

*Обзор двух космологий, предполагающих, что наблюдаемая вселенная вначале была вакуумоподобна (т.е. космологическая среда была несингулярна и лоренц-инвариантна). В ранней, несингулярной фридмановской космологии, фридмановская вселенная возникает при фазовом переходе вакуумоподобной среды в обычную среду. В течение перехода возникающая обычная среда ускоряется (причина расширения вселенной) и, в терминах сопутствующей ей системы отсчета, расширяется, переходя в конечном счете к состоянию инерциального фридмановского разлета. В инфляционной космологии или, что то же, космологии раздувающейся вселенной, переходу к фридмановской вселенной предшествует раздувание вакуумоподобной вселенной — спонтанное увеличение ее протяженности на многие десятки порядков величины без или почти без изменения ее состава и плотности. Раздувание служит основой разнообразных сценариев: с космологической сингулярностью, рождением одной вселенной в недрах другой, мира в целом, как бесконечного множества вселенных... В данном очерке показано, что идея раздувания, видимо, ошибочна. При отказе от нее, применительно к наблюдаемой вселенной обе космологии, по существу, совпадают.*

PACS number: 98.80.Vp

## От редактора

Публикуемая ниже статья Э.Б. Глинера "Раздувающаяся вселенная и вакуумоподобное состояние физической среды" по своей форме и стилю нестандартна для УФН. Статья эта по существу дискуссионная, и речь в ней идет о космологических моделях ранней вселенной. Разумеется, статья рецензировалась, и получила одобрение специалиста-космолога, ряд замечаний которого автор учел. Тем не менее статья скорее подходила бы для специального журнала, а не для УФН, если бы не имели места некоторые особые обстоятельства. Автору статьи принадлежат пионерские работы, важные для современной космологии (см. работы [1, 2, 10] в списке литературы; первая из них опубликована еще в 1965 г.). Вместе с тем жизнь Э.Б. Глинера сложилась не просто, как и жизнь многих в те времена. Трижды раненный на фронтах Отечественной войны и дважды награжденный боевыми орденами, он в 1945 г. был арестован и 10 лет провел в заключении (к счастью, частично в "шарашках", т.е. спецтюрьмах, где работал как физик и инженер; впоследствии он получил три авторских свидетельства на изобретения, сделанные в этот период). В 1956 г. он был полностью реабилитирован "ввиду отсутствия состава преступления". С 1955 по 1963 гг. работал в некоем ОКБ,

а с 1964 г. по сентябрь 1979 г. — в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. К сожалению, в 1980 г. Глинер эмигрировал в США, поскольку были известные всем нам трудности с получением его детьми университетского образования. В США он успешно работал в нескольких университетах в области физики Солнца и общей теории относительности. В 1987 г. он, однако, потерял работу после того как на семинаре в одном из всемирно известных университетов страны высказал мысли, близкие к изложенным в настоящей публикации и, видимо, негодные некоторым преуспевающим космологам в США. Из-за недостаточного стажа работы в США (не хватает одного года) он потерял и право на пенсию. Сейчас инвалид Отечественной войны Эраст Борисович Глинер в свои 78 лет продолжает активно работать. Однако, по сложившимся обстоятельствам, он не принадлежит к какой-либо влиятельной научной группе, не может посещать научные конференции, пользоваться академической компьютерной сетью, да и публикация статей в ведущих зарубежных журналах не является бесплатной. Я считаю, что мы в большом долгу перед Э.Б. Глинером и должны быть рады возможности опубликовать его статью, тем более что она, в той мере, в которой могу об этом судить, глубока по содержанию. Замечу, что ценность пионерской работы Э.Б. Глинера уже была ранее отмечена в УФН (см., например, УФН 169 419 (1999)), а недавно в статье А.Д. Чернина (УФН 171 1153 (2001)). То же было сделано и И.Д. Новиковым в докладе на Президиуме РАН (см. Вестник РАН 71 (10) 886 (2001)). Таким образом, публикация статьи Э.Б. Глинера представляется вполне уместной.

В.Л. Гинзбург

Э.Б. Глинер. I. Th.S, 661 Faxon Avenue, San Francisco, CA 94112-1201  
Tel. + 415-469-9022  
E-mail: Erast@hotmail.com

Статья поступила 18 октября 2001 г.,  
после доработки 10 декабря 2001 г.

## Содержание

1. Введение (222).
  2. Раздувание как часть инфляционной космологии (222).
  3. Вакуумоподобная среда (223).
  4. Космология вакуумоподобной среды (224).
  5. Попытки обосновать раздувание (224).
  6. Вакуумоподобная среда и космологическое расширение (226).
  7. Сравнение сценариев (226).
- Список литературы (227).

## 1. Введение

В рамках общей теории относительности (ОТО) предсказана [1] и играет важную роль в теории Великого объединения возможность существования вакуумоподобного (лоренц-инвариантного) состояния физической среды. В силу его свойств, если вселенная как целое когда-либо была в этом состоянии, то информация о ее предыдущем развитии была утеряна. В этом случае можно говорить о нем, как о начальном состоянии *наблюдаемой* вселенной.

Предположение, что начальное состояние наблюдаемой вселенной было вакуумоподобным, явилось основой сценария несингулярной фридмановской космологии [2] (см. приложение). Но наиболее распространенной космологией, принимающей это же положение, сейчас является инфляционная космология, в которой упомянутый сценарий является заключительной фазой предлагаемых ею сценариев. Ей предшествует *раздувание*, когда протяженность вселенной возрастает на многие десятки или сотню порядков *без или почти без* изменения ее плотности, пока, наконец, как и в [2], происходит фазовый переход к фридмановской вселенной.

Инфляционная космология включает два методологически разных раздела: поиск, на основе теории Великого объединения, предпосылок фазовых переходов в космологической среде и собственно космологические сценарии. В таком симбиозе физики элементарных частиц и ОТО эта последняя, как полагает автор, представлена неадекватно и является источником неадекватности и самой инфляционной космологии.

Этим определяется стиль данного очерка: исключительное, вплоть до простейших пояснений, внимание к общерелятивистской стороне дела, тогда как проблемы физики элементарных частиц, если и затрагиваются, то только в терминах их общерелятивистских следствий.

Читатель предполагается знакомым с основами инфляционной космологии. Очерк не является исчерпывающим и в других отношениях; автор приносит извинения за возможное, но непреднамеренное отсутствие ссылок на работы, которые в противном случае должны были бы быть упомянуты.

## 2. Раздувание как часть инфляционной космологии

Основные космологические модели предполагают, что пространство-время изотропно. Тогда его метрика представима в форме Робертсона – Уокера:

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right]. \quad (1)$$

Постоянная  $k$  есть *кривизна* пространства. *Масштабный фактор*  $a(t)$  описывает изменение с течением времени  $t$ , расстояний между точками с фиксированными пространственными координатами  $r, \theta, \varphi$ . Он определяется *уравнениями Фридмана*:

$$\dot{a}^2 = \frac{G}{3} \mu a^2 - k, \quad \ddot{a} = -\frac{G}{6} (\mu + 3p) a \quad (2)$$

и *уравнением состояния* физической среды

$$p = p(\mu). \quad (3)$$

Точка здесь означает дифференцирование по времени  $t$ ,  $G$  — гравитационная постоянная,  $\mu$  — плотность космологической среды, а  $p$  — давление в ней.

В стандартной космологии, обычно имеющей дело с уникальной вселенной, единицу длины принято выбирать так, чтобы кривизна  $k$  принимала одно из трех значений: 1, 0 или  $-1$ , соответственно трем возможным типам однородных вселенных. Для целей сравнения это неудобно, и ниже всегда будут предполагаться одни и те же единицы длины. Тогда вещественная постоянная  $k$  может быть любой, и метрика (1) описывает *континуум* вселенных, различающихся значением  $k$ .

Теория Великого объединения предполагает существование в ранней вселенной *вакуумоподобной*, т.е. *лоренц-инвариантной* фазы среды, плотность которой преобладает над плотностью вещества (т.е., обычной, не лоренц-инвариантной фазы). Плотность  $\mu$  вакуумоподобной фазы и давление  $p$  в ней связаны уравнением состояния [1]

$$p = -\mu. \quad (4)$$

В силу уравнений Фридмана (2) во вселенной, заполненной вакуумоподобной средой, плотность среды сохраняется, т.е.  $\mu = \text{const}$ , но масштабный фактор  $a(t)$  экспоненциально растет. В силу непрерывности можно полагать, что примесь вещества не меняет характер роста последнего, а плотность среды почти не меняется. Этот рост, интерпретируемый по аналогии с фридмановскими моделями как расширение вселенной, — *но почти без изменения плотности среды!* — был назван *раздуванием* (inflation)<sup>1</sup>. Идея раздувания является основой инфляционных сценариев.

До последнего времени инфляционные сценарии предполагали, что плотность космологической среды не ограничена сверху (космологическая сингулярность). Великое объединение дает возможность теоретического описания вплоть до планковской плотности  $10^{19}$  ГэВ, где физические поля со спином  $1/2$  (кварки и лептоны, между которыми еще нет различий по константе взаимодействия) предполагаются безмассовыми; носителем массы являются поля Хиггса, образующие в совокупности вакуумоподобную среду.

Инфляционные сценарии полагают, что в этом состоянии *высшей симметрии* (SU(5) или выше) вселенная уже расширяется, из-за чего температура космологической среды падает. С ее падением до  $\sim 10^{15}$  ГэВ (на  $t \sim 10^{-35}$  с момента начала расширения), состояние

<sup>1</sup> В некоторых работах (см., например, [3]) термин "раздувание" (inflation) используется расширительно и включает фридмановское расширение, что *не имеет в виду* в данной работе.

высшей симметрии энергетически становится невыгодным, и в ряде *спонтанных нарушений симметрии* безмассовые поля приобретают массу, появляясь как "конденсат". (Этот процесс — схема Хиггса — обобщает теорию сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау, где с падением температуры проводника появляется конденсат спаренных электронов.)

Изложенная элегантная схема приводит в космологии к ряду трудностей. Скажем, вблизи планковской плотности должны рождаться "еретические" частицы, например, магнитные монополи, вклад которых в массу наблюдаемой вселенной был бы на много порядков больше, чем вклад реально наблюдаемых частиц! Чтобы устранить эти трудности, Гус [12] выдвинул предположение, ставшее основой инфляционной космологии: *фазовый переход, вызванный (первым) спонтанным нарушением симметрии, является переходом первого рода*, так что по достижении критической температуры перехода он происходит не сразу, а вселенная на некоторое время остается в переохлажденном метастабильном состоянии высокой симметрии. В течение этого времени, энергетический выигрыш, который был бы достигнут при переходе, действует (говоря очень общо) как вклад в плотность вакуумоподобной фазы среды. Вследствие этого метрика вселенной весьма близка к метрике де Ситтера, и масштабный фактор растет квазиэкспоненциально. Выбором параметров перехода можно добиться, чтобы за время, которое вселенная проводит в переохлажденном состоянии (видимо,  $\sim 10^{-31}$  с), масштабный параметр возрос гигантски, например, в  $10^{100}$  раз. Это часто называемое число, больше чем на 70 порядков превышает рост, достижимый при фазовом переходе второго рода, быстро создающем режим расширения фридмановского типа.

Интерпретация роста масштабного фактора как раздувания вселенной, таким образом, подразумевает, что "объект класса вселенной" может быть результатом раздувания *микроскопической* области. Ее малостью инфляционная космология объясняет отсутствие монополей в наблюдениях и разрешает другие космологические проблемы (в контексте данной статьи нет нужды их обсуждать). Эта малость также навела на мысль, что вселенные могут возникать в результате раздувания флуктуаций, появляющихся на микроуровне. Эта возможность нашла воплощение в сценариях перманентного массового рождения вселенных.

Инфляционные сценарии основаны на предположениях, сделанных *ad hoc*, и подгонке многочисленных свободных параметров теории. В новой области, где сочетаются идеи Великого объединения и релятивистской космологии, это едва ли может вызвать возражения. Однако их вызывает релятивистская база сценариев: идея раздувания. Мы покажем в дальнейшем, что в присутствии вакуумоподобной среды интерпретация роста масштабного фактора по аналогии с фридмановскими моделями, видимо, неверна и не подразумевает соответствующего расширения вселенной [4].

### 3. Вакуумоподобная среда

Идея вакуумоподобной *среды* впервые была предложена в рамках ОТО [1].

По традиции, правая часть уравнений Эйнштейна долго рассматривалась (см., например, [5]) полуэмпири-

чески — как данные, вносимые в ОТО со стороны. С течением времени стало, однако, ясным, что алгебраическая структура величин, появляющихся в теории, — ее неотъемлемая часть. Это подразумевает, что в ОТО классификация симметричных тензоров второго ранга по типам их алгебраической структуры определяет *возможные типы физических сред* (ср. [6]). Теория, тем самым, приобретает цельность, определяя не только механику, но и сами среды, движение которых она описывает.

В этом смысле, ОТО предсказывает [1] существование среды, которая в *однородном и изотропном* состоянии описывается "простейшим" тензором энергии-импульса

$$T_k^i = \mu \delta_k^i, \quad (5)$$

где скаляр  $\mu$  — плотность энергии среды. Тогда в силу (5), давление в среде определяется уравнением (4).

Продуктивность этого предсказания связана с тем, что тензор (5) описывает единственно возможный в ОТО тип *лоренц-инвариантной* среды, в пределе  $\mu \rightarrow 0$  являющейся обычным вакуумом. Этот важный тип среды был вне поля зрения.

Формально выражение (5) имеет ту же алгебраическую структуру, что и космологический член, введенный Эйнштейном *ad hoc* в ранее написанные им уравнения ОТО. Он затем отверг его: космологический член был извечной мировой силой, действующей, но не поддающейся воздействию. В отличие от этого, описывая *состояние среды*, тензор (5) не меняет уравнений теории и подразумевает, что при фазовых переходах, а также в равновесных и динамических неоднородных состояниях, он ведет себя как *динамическая переменная*.

Идея вакуумоподобной среды играет фундаментальную роль. По замечанию Уиллера, сделанному прежде, чем это было осознано, появление сингулярностей в ОТО явилось "*величайшим кризисом в истории физики*" [7]. Смысл этих слов станет яснее, если заметить, что проблема сингулярностей пространства-времени состоит не столько в том, что их не удается описать внутренним образом (как, например, и элементарные частицы), сколько в том, что их не удастся непротиворечиво описать и внешне [8], так что они остаются *вне рамок* физики.

Идея вакуумоподобного состояния, в сочетании с постулатом о переходе физической среды в это состояние с ростом плотности, является до сих пор единственной альтернативой заключению о *неизбежности* сингулярностей в ОТО, в противном случае вытекающему из картины гравитационного коллапса. В общих чертах, эта альтернатива следует уже из (4). При гравитационном коллапсе *рост* внутреннего давления в коллапсирующем теле не останавливает гравитационное сжатие из-за дальнедействующего характера тяготения, на что указал еще Лаплас. В терминах постньютоновского приближения источником тяготения в ОТО является след тензора энергии-импульса  $(3p + \mu)$ . Тогда при приближении к условию (4) тяготение становится *отталкивающим*, т.е. возникает *расхождение геодезических*. Коль скоро коллапсирующее тело переходит в вакуумоподобное состояние, гравитационное отталкивание останавливает коллапс потому же, почему гравитационное притяжение способствовало бы неограниченному сжатию.

Идея вакуумоподобной среды исключает и *представление о неизбежности космологической сингулярности*, возникшее тогда, когда выяснилось, что вселенная расширяется. Обратный во времени ход космологического расширения воспроизводит картину гравитационного коллапса. Следовательно, если с ростом плотности среда *не* переходит в вакуумоподобное состояние, то в прошлом лежит сингулярность; в противном случае где-то в прошлом вселенная была в вакуумоподобном состоянии. Его естественно считать начальным состоянием *наблюдаемой* вселенной. Оно, однако, не есть *абсолютное начало* времени, так как, в принципе, времениподобные линии продолжимы в прошлое и дальше.

Качественный анализ релятивистских уравнений движения неоднородной среды, сжимающейся под действием отрицательного давления, указывает, что в ходе сжатия неоднородность среды уменьшается [1]. Поэтому представление, что переход однородной среды в вакуумоподобное состояние предотвращает сингулярность, по-видимому, можно обобщить и на неоднородные среды.

#### 4. Космология вакуумоподобной среды

Метрику, которая удовлетворяет условию вакуумоподобности (4), нашел де Ситтер [9] в форме

$$ds^2 = A d\tilde{t}^2 - A^{-1} d\tilde{r}^2 - \tilde{r}^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2),$$

$$A \equiv 1 - \frac{G}{3} \mu \tilde{r}^2. \quad (6)$$

Эта метрика статична. Метрика изотропного пространства-времени, однако, всегда формально представляема в форме (1). Если среда *не* вакуумоподобна, то масштабный фактор  $a(t)$  определяется уравнениями Фрийдмана (2) однозначно, причем преобразования, которое приводит метрику (1) к статическому виду, не существует. Вакуумоподобная среда представляет особый случай: это видно уже из того, что метрика (6) статична. Ввиду (4) система уравнений Фрийдмана (2) *вырождается*: второе уравнение в (2) следует из первого. Первое же уравнение может быть непосредственно решено, определяя семейство вакуумоподобных решений  $a = a(t|k)$ ,  $-\infty < k < \infty$ , различающихся выбором постоянной  $k$ . Как легко показать [10], каждая из этих метрик может быть получена из метрики де Ситтера (6) регулярным преобразованием координат вида

$$\tilde{t} = \tilde{t}(t, r|k), \quad \tilde{r} = \tilde{r}(t, r|k). \quad (7)$$

Таким образом, метрике де Ситтера (6) сопоставляется *континуум* масштабных факторов  $a = a(t|k)$  и метрик (1). Следовательно, вакуумоподобному пространству-времени — *вселенной де Ситтера* — нельзя приписать какую-либо *определенную* эволюцию во времени [4]. В этом смысле, зависимость преобразованной метрики от времени является координатным эффектом.

Отсутствие выделенного состояния движения выражает *принцип относительности* для вакуумоподобной среды, которая — в отличие от обычных сред, но как и обычный вакуум — не может быть носителем системы отсчета. Этот принцип запрещает прямой переход вакуумоподобной среды в обычное вещество из-за неопределенности импульса рождающегося вещества. Примесь

вещества может, однако, инициировать переход. Запрет снимается применительно к выходу вселенной из вакуумоподобного состояния, поскольку вселенной в целом нельзя приписать определенный импульс.

Отличие вакуумоподобно доминированного мира от мира фридмановских моделей создается различием алгебраической структуры тензоров энергии-импульса преобладающей компоненты космологической среды. Во фридмановской среде *недиагональные* элементы тензора энергии-импульса — потоки энергии и импульса — зависят от выбора системы отсчета, и есть *одна и только одна* система отсчета, где они отсутствуют. Эта *сопутствующая* система описывает физическое движение фридмановской среды. Недиagonalные же элементы тензора энергии-импульса вакуумоподобной среды равны нулю во всех системах отсчета. Поэтому нельзя сформулировать даже само понятие ее собственного движения. Этим свойства вакуума распространяются на лоренц-инвариантные среды с ненулевой плотностью энергии. Классическая "физическая пустота" заменяется существенно релятивистской *лоренц-инвариантной* средой, сама идея внутреннего движения которой несовместима с ее лоренц-инвариантностью.

В силу принципа относительности, вакуумоподобная среда обменивается энергией и импульсом с веществом, либо влияя на пространственно-временную геометрию, либо при взаимных фазовых переходах. В их отсутствие вещество свободно падает в вакуумоподобной среде. Поэтому системы отсчета, связанные с падающим веществом, не отражают поведение вакуумоподобной среды [4], и пока примесь вещества невелика, вселенная близка к статической вселенной де Ситтера.

Это, казалось бы, противоречит квазиэкспоненциальному росту фактора  $a(t)$  для метрик, близких к метрике де Ситтера. Особенности фридмановских моделей создали, однако, ошибочное представление о масштабном факторе, как эталоне расширения вселенной. Рассмотрим для простоты газ пробных частиц во вселенной де Ситтера. Между столкновениями частицы, очевидно, свободно падают вдоль геодезических метрики де Ситтера. Поскольку, как и метрика, геодезические неизменны во времени, то, как целое, газ пробных частиц не может ни расширяться, ни сжиматься. Вследствие столкновений частиц этот газ горячий; легко предвидеть, что он должен иметь температуру Гиббонса – Хоукинга [11]. Но несмотря на рост масштабного фактора, вселенная остается статической.

Эта картина непосредственно обобщается на вселенные, где наряду с преобладающей вакуумоподобной фазой есть и примесь обычного вещества (ср. [4]). Падая вдоль геодезических, в главном определенных преобладающей фазой, вещество не следует за ростом масштабного фактора, как и вся "почти вакуумоподобная" вселенная. Идея раздувания, следовательно, представляется ошибочной.

#### 5. Попытки обосновать раздувание

Начиная с первого сценария Гуса [12], раздувание как вакуумоподобной вселенной, так и вакуумоподобной среды конечного протяжения предполагается реальным эффектом, но попытки прямого обоснования возможности или реальности раздувания немногочисленны. Стоит разобраться хотя бы в некоторых из них.

Так, иногда говорится, что при уравнении состояния (4) возможность раздувания следует из термодинамики. Именно, при увеличении элемента объема вакуумоподобной среды  $V$  на  $dV$  плотность энергии среды уменьшается на  $d\mu = -\mu dV$ , но в силу (4) работа сил отрицательного давления  $-p dV = \mu dV$  в точности компенсирует эту потерю. Поэтому расширение вакуумоподобной среды при сохранении ее плотности энергии не нарушает закон сохранения энергии. Пойдем, однако, дальше. Обратим некоторую массу в вакуумоподобное состояние и дадим ей свободно расширяться. Совершив обратный переход, мы получим выигрыш в массе. Машина, работающая по этому циклу, есть вечный двигатель.

Что же следует из термодинамики? Ничего. Апория возникает, так как использованы понятия, лишенные физического смысла. Мысленно, в пространстве можно выделить "элемент объема", но ему нельзя сопоставить материальный элемент лоренц-инвариантной среды, поскольку условие *сопутствия* отсутствует. В применении к вакуумоподобной среде стандартные уравнения термодинамики вырождаются, как и уравнения Фридмана.

Эвристически внутреннее состояние вакуумоподобной среды есть равновесие между силами сжатия (отрицательное давление) и гравитационно индуцированным расхождением геодезических (гравитационным отталкиванием). Это подразумевает, что обстоятельства, вызывающие изменение гравитационного поля, меняют баланс сил в вакуумоподобной среде, а тем самым — и ее тензор энергии-импульса, так что в общем случае он не имеет изотропную форму (4), а соответствует иным состояниям равновесия (см., например, [13–15]). Вообще, только в однородном состоянии физической среды ее тензор энергии-импульса однозначно соответствует внутренне присущим ей свойствам. При сферически симметричном распределении гравитирующего вещества его тензор энергии-импульса не может быть однородным, так как силы тяготения зависят от радиуса. В вакуумоподобной среде естественно найти те же свойства. Поэтому характеристическим для нее является только то, что при изотропных внешних условиях ее тензор энергии-импульса имеет вид (4), недостижимый для обычного вещества. Предположение же, что он всегда имеет вид (4), по существу, вернуло бы нас к идее космологического члена<sup>2</sup>, а не динамической переменной.

Заметим попутно, что неоднородности вакуумоподобной среды, видимо, снимают абсолютный запрет фазовых переходов между нею и обычной средой. В этом смысле *неоднородная* вакуумоподобная среда содержит виртуальную примесь вещества, как, например, и неоднородное гравитационное поле в обычном вакууме.

Рассматривая модели спонтанного раздувания вакуумоподобной среды в вакуум, ряд авторов [17–21] склоняется к реальности раздувания.

Обратимся в некотором отношении к итоговой работе [21], где авторы рассматривают *раздувание* вакуумоподобной сферы в вакуум. Всюду внутри сферы тензор энергии-импульса берется ими в форме (4). В предположении *раздувания* это логично, так как, сохраняя плотность, раздувание не должно менять плотность среды внутри сферы — сфера должна быть *однородна вплоть до границы*. Чтобы при этом условии раздувание имело место, должно, однако, существовать сферически-симметричное решение уравнений Эйнштейна, в котором на некоторой сферической границе, *движущейся в сторону вакуума*, происходит переход класса  $C^1$  метрики де Ситтера в метрику Шварцшильда. Легко видеть, что такого решения даже класса  $C^0$  не существует и, как отмечают авторы ([21], Введение), должен существовать еще один динамический объект — переходный слой. В нем тензор энергии-импульса не может иметь форму (4), а является решением уравнений Эйнштейна и уравнений состояния, определяющих поведение среды. Но поскольку гравитационное поле внутри сферы не может быть постоянным, этот "слой" (описываемый авторами как  $\delta$ -функция) не имеет нижней границы, а простирается до центра сферы. Следовательно, постулировать метрику де Ситтера в конечной области вообще нельзя.

Взглянем на вакуумоподобную сферу с иной точки зрения. В окружающем пустом пространстве гравитирующая сфера индуцирует метрику Шварцшильда:

$$ds^2 = -A dt^2 + A^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2),$$

$$A = 1 - \frac{2GM}{r}. \quad (8)$$

Шварцшильдова масса сферы

$$M = 4\pi \int_0^{r_0} \mu(r)r^2 dr \quad (9)$$

в силу теоремы Джебсена – Биркгоффа сохраняется при любых допустимых вариациях во времени плотности энергии  $\mu(r)$  и радиуса сферы  $r_0$  (физически это означает отсутствие монополярного гравитационного излучения). Сохранение интеграла (9) подразумевает, что расширение сферы не может происходить без перераспределения плотности, т.е. ее *раздувание* невозможно (ср. [4]).

*Стоя на точке зрения реальности раздувания*, авторы [21] говорят, что подобного рода "наивная" аргументация ведет к парадоксам. Именно, два близких наблюдателя, один из которых находится внутри, а другой — вне сферы, придут к разным выводам. Первый увидит раздувание, а второй нет. Эти "парадоксы", однако, заранее предполагают раздувание, иначе оба наблюдателя видели бы одно и то же. Но авторы считают, что их разрешение связано с неевклидовым характером пространства-времени, в частности с тем, что стандартные координаты Шварцшильда не покрывают его полностью. Поэтому они обращаются к максимальному аналитическому расширению метрики Шварцшильда.

Это аналитическое расширение, однако, подразумевает строгую сферическую симметрию, иначе оно не существует как математический факт. Соответствующее ему физическое явление должно быть поэтому неустойчивым (ср. [22]). Далее, пространство-время с расширенной метрикой Шварцшильда вовсе не существует

<sup>2</sup> Недавние наблюдения [16] ускоренного расширения вселенной или ее части, скорее всего, являются открытием вакуумоподобной среды, а не космологического члена. Ожидаемое присутствие вакуумоподобной среды малой плотности во вселенной обсуждалось в [14], там же (Sec. 5) указаны пять, в принципе, доступных для наблюдения следствий присутствия этой среды, включая ее влияние на космологическое расширение. См. также [13, 15].

всегда, когда есть *область* с метрикой Шварцшильда. Расширенная метрика включает пару подобных друг другу сингулярностей. Их совместное появление в результате реальных процессов трудно представить. Поэтому не видно пути, на котором каждый случай раздувания мог бы расширить *для себя* стандартную метрику Шварцшильда, в которую он погружен (ср. [25]).

## 6. Вакуумоподобная среда и космологическое расширение

То, что *раздувание* бесконечной или конечной среды с метрикой де Ситтера или близкой к ней не может быть частью космологических моделей не умаляет идеи, восходящей к де Ситтеру, Эддингтону и Леметру, о возможной ключевой роли метрики де Ситтера (т.е. вакуумоподобного состояния среды) в ранней вселенной. В недавних сценариях [2, 24–26] ею обуславливается *однородность рождающейся вселенной, существование импульса к ее расширению и отсутствие космологической сингулярности*.

Устранение из инфляционной космологии эпох раздувания, по существу, возвращает ее общерелятивистский сценарий к *несингулярной фридмановской космологии* ([2], см. Приложение). Последняя согласованно связывает вакуумоподобную стадию с наблюдаемой вселенной (плотность, энтропия, постоянная Хаббла) и, видимо, может стать основой дальнейшего развития. Упомянем также работы [27–29].

Несингулярная космология [2] предполагает, что начальное состояние наблюдаемой вселенной было вакуумоподобным, но неустойчивым по отношению к фазовому переходу в обычную (нелоренц-инвариантную) среду. Это, например, имеет место, если в силу уравнений состояния среды флуктуационное уменьшение ее плотности  $\mu$  нарушает условие вакуумоподобного вырождения  $p = -\mu$  или, что то же самое,  $3p + \mu = -2\mu < 0$ , заменяя его неравенством

$$-2\mu < 3p + \mu < 0. \quad (10)$$

Согласно уравнениям Фридмана, ему соответствует ускоренное расширение космологической среды, сопровождаемое падением ее плотности, что делает процесс необратимым [4]. Импульс к расширению в этом сценарии вакуумоподобная среда сообщает не *сама себе* (раздувание), а *рождающейся* фридмановской среде.

В терминах Великого объединения рассматриваемая схема, видимо, подразумевает, что состояние высшей симметрии является неустойчивым, а поэтому является и состоянием высшей плотности. Этим, в частности, были бы сняты проблемы космологической сингулярности и существования фауны "еретических" частиц.

Среду, удовлетворяющую (10), недавно предложено считать особым состоянием вещества, названным *quintessence* [30]. Неравенство (10), однако, само по себе недостаточно, чтобы определить среду с необычными свойствами, так как ему удовлетворяет и вакуумоподобная среда с примесью вещества, неинтересная космологически. Существенно наличие фазового перехода, вовлекающего среду в процесс космологического расширения, и тогда *quintessence* может существовать как особая переходная среда, не имеющая стационарного состояния.

## 7. Сравнение сценариев

Ради краткости обозначим далее несингулярный и инфляционный сценарии через N и I соответственно.

1. В обоих сценариях начальное состояние *наблюдаемой* вселенной является однородным изотропным вакуумоподобным состоянием. Оба они, следовательно, разрешают одни и те же проблемы фридмановской космологии.

2. Вопреки частому утверждению оба сценария, как и другие космологические теории, не объясняют близость наблюдаемой вселенной к плоской модели Фридмана. Поскольку метрика самой ранней вселенной должна быть близка к метрике вакуумоподобной среды, а последняя может быть преобразована к виду, соответствующему любой фридмановской модели [10], то формальные аргументы для выбора модели пока отсутствуют (ср. [31]).

3. В I раздувание областей конечного протяжения (по существу, ничем не ограничиваемое) создает дочерние вселенные. В N этот сценарий не исключен, но ход расширения регулируется процессом фазового перехода.

4. В N догма космологической сингулярности заменена *гипотезой* о начальном однородном и изотропном вакуумоподобном состоянии вселенной. Это оправдано как логикой построения ОТО, так и невозможностью физического представления сингулярности. Высокая начальная симметрия<sup>3</sup>, возможно, возникает *эволюционно*: в силу уравнений движения вакуумоподобной среды [1].

Тем самым в N отсутствует эпоха в I, делящаяся от Большого взрыва или эпохи неограниченно высокой плотности до эпохи спонтанных нарушений симметрии и "материализации" безмассовых частиц. На первый взгляд, это лишает N механизма формирования вакуумоподобной среды. Однако в N начальное состояние не есть "начало времени", времениподобные линии продолжимы за него в прошлое, где и может быть арена Великого объединения, созданная, например, коллапсом предсуществовавшего космоса (ср. [26]) или другим эпизодом "*мироздания в широком смысле*", не ограниченным "началом времени" [2].

5. То, что сейчас не наблюдаются "еретические" частицы, например, магнитные монополи, I объясняет раздуванием, которое сводит их концентрацию почти на нет.

В N плотность энергии в начальном состоянии вселенной остается свободным параметром. Его выбор, диктуемый отсутствием еретических частиц, должен быть хотя бы на десять порядков ниже планковской плотности. (Заметим, что вообще разрыв на десятки порядков в плотности энергии, характерной для элементарных частиц, и планковской плотностью, ничем не мотивирован.)

6. I полагает, что при раздувании вакуумоподобная среда охлаждается, а длина квантовых флуктуаций образующего ее скалярного поля растет и становится больше хаббловской длины. Эти процессы приводят к распаду вакуумоподобной среды и в ходе наступающего разогревания рождается фридмановская вселенная.

<sup>3</sup> Понятие вакуумоподобного состояния не подразумевает его глобально высокую симметрию, см., например, [14, 15].

Однако температура, измеряемая термометром, свободно падающим в вакуумоподобной среде, зависит только от плотности среды [11] и поэтому не может меняться при раздувании. Вычисления [27] показывают, что именно эта температура Гиббонса–Хоукинга оказывается температурой рождающегося вещества. Далее, флуктуации являются неоднородностями вакуумоподобной среды. По смыслу дела, они должны падать при раздувании свободно, поскольку среда вакуумоподобна (иначе, в чем физический смысл вакуумоподобности?). Почему же они растягиваются? Наконец, эти флуктуации происходят в тепловой бане Гиббонса–Хоукинга с температурой, видимо, выше  $10^{11}$  Гэв. И все-таки они существенны на этом фоне?

Общее впечатление таково, что предполагаемые изменения внутреннего состояния раздувающегося скалярного поля не могут обеспечить одновременность его распада, подразумеваемую однородностью наблюдаемой вселенной.

В N нет стадии раздувания и сопутствующей ей двусмысленности в определении температуры. Остается однако общая для всех космологий проблема одновременности космологического старта. По соображениям причинности, N предполагает переход к фридмановской вселенной не во всем объеме начальной среды, а в некоторой ее *причинно-связной* области. Это, строго говоря, гарантирует только сферическую симметрию, а не однородность. Если, однако, космологический старт есть квантовый переход с "редукцией волновой функции", то глобальный переход к расширению не влечет нарушения макроскопической причинности [32], и ограничение старта причинно-связной областью ошибочно.

Итак, основное различие между сценариями состоит в использовании инфляционной космологией идеи раздувания, т.е. почти неограниченного *спонтанного расширения космологической среды без существенного изменения ее плотности*. Раздуванием инфляционная космология объясняет однородность наблюдаемой вселенной как в сценариях, сохраняющих идею космологической сингулярности, так и в сценариях рождения одной вселенной в недрах другой. Если, по-видимому ошибочную, идею раздувания отбросить, остается общая основа обоих сценариев: предположение о вакуумоподобном начальном состоянии *наблюдаемой* вселенной; при этом нет нужды допускать существование космологической сингулярности.

Остающиеся различия переходящи: это недостаточное внимание инфляционной космологии к ОТО — несмотря на заимствование ею идеи несингулярной фридмановской космологии и существование пока только основ этой последней.

## Список литературы

1. Глинер Э Б *ЖЭТФ* **49** 542 (1965)
2. Глинер Э Б, Дымникова И Г *Письма в АЖ* **1** (5) 7 (1975)<sup>4</sup>
3. Liddle A R, Lyth D H *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000)
4. Дымникова И Г *ЖЭТФ* **90** 1900 (1986)
5. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Теория поля* (М.: Наука, 1967)
6. Петров А З *Пространства Эйнштейна* (М.: Физматгиз, 1961)
7. Misner Ch W, Thorne K S, Wheeler J A *Gravitation* (San Francisco: W.H. Freeman, 1973) § 44.1
8. Geroch R *Ann. Phys.* (New York) **48** 526 (1968)
9. De Sitter W *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **76** 699 (1916); **77** 155 (1916); **78** 3 (1917)
10. Глинер Э Б *ДАН СССР* **192** 771 (1970)
11. Gibbons G W, Hawking S W *Phys. Rev. D* **15** 2738, 2752 (1977)

12. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
13. Dymnikova I G *Gen. Rel. Grav.* **24** 235 (1992); *Int. J. Mod. Phys. B* **5** 529 (1996)
14. Gliner E B "Scalar black holes", gr-qc/9808042
15. Dymnikova I G *Phys. Lett. B* **472** 33 (2000)
16. Riess A G et al. *Astron. J.* **116** 1009 (1998); Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
17. Iperser J, Sikivie P *Phys. Rev. D* **30** 712 (1984)
18. Berezin V A, Kuzmin V A, Tkachev I I *Phys. Lett. B* **120** 91 (1983)
19. Berezin V A, Kuzmin V A, Tkachev I I, in *Proc. Third Seminar on Quantum Gravity, Moscow, USSR, 1984* (Eds M A Markov, V A Berezin, V P Frolov) (Singapore: World Scientific, 1985) p. 605
20. Aurilia A et al. *Phys. Lett. B* **147** 258 (1984); *Nucl. Phys. B* **252** 523 (1985)
21. Blau S K, Guendelman E I, Guth A H *Phys. Rev. D* **35** 1747 (1987)
22. Lake K *Phys. Rev. D* **38** 3844 (1988)
23. Wald R M *General Relativity* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1984)
24. Priestler W, Blome H J *Stern Weltraum* **26** 140 (1987)
25. Israelit M, Rosen N *Astrophys. J.* **342** 627 (1989)
26. Blome H J, Priestler W *Astron. Astrophys.* **250** 43 (1991)
27. Dymnikova I G, Krawczyk M *Mod. Phys. Lett. A* **10** 3069 (1995)
28. Capozziello S et al. *Phys. Lett. A* **203** 18 (1995); *Nuovo Cimento B* **111** 623 (1996)
29. Dymnikova I, Khlopov M *Mod. Phys. Lett. A* **15** 2305 (2000); *Eur. Phys. J. C* **20** 139 (2001)
30. Caldwell R R, Steinhardt P J *Phys. Rev. D* **57** 6057 (1998)
31. Madsen M S, Ellis G F R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **234** 67 (1988)
32. Gliner E B "Relativistic quantum non-locality", gr-qc/0006072

## Приложение

### Несингулярная фридмановская космология

Э.Б. Глинер и И.Г. Дымникова

*Рассматривается космологическая модель, основанная на гипотезе о переходе среды с ростом плотности в состояние с отрицательным давлением. Модель не содержит сингулярностей ни в прошлом, ни в будущем. Решение уравнений Фридмана приводит к замкнутой вселенной, масса которой с момента начала расширения возрастает на десятки порядков.*

Во фридмановской космологии имеется известный произвол в выборе начального состояния. В рамках общей теории относительности есть возможность построить фридмановскую космологию, не содержащую сингулярности в прошлом или будущем, если предположить, что при некоторой высокой плотности  $\rho_0$  давление в среде  $p = -\varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0 = \rho_0 c^2$ .

Уравнение  $p = -\varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — плотность энергии, соответствует одному из возможных равновесных состояний сверхплотной среды. В этом состоянии среда по своим механическим свойствам напоминает вакуум (Глинер, 1965; Зельдович, 1968). При некоторых достаточно общих предположениях о зависимости  $p$  от  $\varepsilon$  прохождение средой такого вакуумоподобного состояния соответствует смене сжатия расширением. Поэтому вакуумоподобное состояние среды может быть принято за начальное космологическое состояние расширяющейся вселенной.

Запишем уравнения Фридмана в виде

$$\ddot{a} = -\frac{1}{6} \alpha a (\varepsilon + 3p), \quad \dot{a}^2 = \frac{1}{3} \alpha a^2 \varepsilon - kc^2, \quad (1)$$

соответствующем метрике однородной вселенной

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) [(1 - kr^2)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)], \quad (2)$$

<sup>4</sup> Воспроизводится ниже в Приложении к данной статье.

где  $k = \pm 1$  или 0. В космологических масштабах вакуумоподобное состояние должно быть неустойчиво относительно флуктуационного перехода в вещество с положительным давлением. Действительно, в системе отсчета, сопутствующей флуктуационно возникающему веществу, из (1) при  $p \sim -\varepsilon_0$  получим  $\ddot{a} > 0$ , т.е. возникающее вещество приводится в состояние расширения, его плотность падает и флуктуационный процесс становится необратимым. Тем самым, причина начала расширения в рассматриваемой модели обусловлена свойствами начального состояния.

Значение  $\dot{a} = \dot{a}_0$  в момент начала расширения представляет коррелированную составляющую скорости флуктуационно возникшего вещества, выражающую общую тенденцию к расширению ( $\dot{a} > 0$ ) или сжатию. Но из-за вакуумоподобных свойств начального состояния корреляция скоростей различно возникшего вещества невозможна. Поэтому  $\dot{a}_0 = 0$  и ввиду (1)  $k > 0$ , что соответствует замкнутой вселенной с  $a_0^2 = 3c^2\kappa^{-1}\varepsilon_0^1$ . При  $p = -\varepsilon$  метрике (2) соответствует пространство-время де Ситтера с радиусом горизонта событий  $a_0$ . Следовательно, расширяющаяся фридмановская вселенная возникает из части вакуумоподобной среды, ограниченной горизонтом событий. Но являясь устранимой сингулярностью, горизонт событий в пространстве-времени де Ситтера не ограничивает протяженности среды с  $p = -\varepsilon$ . Это указывает на возможность множественного рождения вселенных из общего начального состояния.

Вблизи состояния с  $p = -\varepsilon_0$  главный член разложения суммы  $p + \varepsilon_{-\alpha}$  в ряд по степеням  $\varepsilon_0 - \varepsilon$  можно записать в виде  $p + \varepsilon = \gamma\varepsilon_1(\varepsilon_0 - \varepsilon)^\alpha(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)^{-\alpha}$ , где  $\alpha$  — постоянная,  $\varepsilon_1$  — плотность, при которой давление  $p = (\gamma - 1)\varepsilon_1$ . Примем, что этот член остается главным в уравнении состояния до значения  $\varepsilon = \varepsilon_1$ , при котором вакуумоподобная компонента среды становится несущественной. Значению  $\gamma = 1$  соответствует "холодная", а  $\gamma = 4/3$  — "горячая" модель. Легко показать, что современное состояние вселенной ограничивает значения  $\alpha$  и  $\varepsilon_1$  условием

$$\frac{\varepsilon_1^{1/2}}{\varepsilon_0} \exp \frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{3\gamma\varepsilon_1(1 - \alpha)} \approx \frac{\varepsilon_{\gamma c}^{1/2}}{\varepsilon_c} \left(1 - \frac{3H_c^2}{\kappa\varepsilon_c}\right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_c$  и  $\varepsilon_{\gamma c}$  — современные плотности компонент среды, образованных частицами с массами покоя и безмассовыми частицами соответственно;  $H_c$  — современное значение параметра Хаббла. Выполнение соотношения (3) обеспечивает совпадение энтропии вселенной в рассматриваемой модели с наблюдаемым.

Можно показать, что допустимы все значения  $\alpha$  из интервала (0, 1), включая  $\alpha \rightarrow 1$  и  $\alpha \rightarrow 0$ . В последнем случае

Таблица

Показатели	$\rho_0 = 0,4 \times 10^{27} \text{ г см}^{-3}$	$\rho_0 = 5 \times 10^{93} \text{ г см}^{-3}$
$t_1, \text{ с}$	$(2-4) \times 10^{-9}$	$(1-2) \times 10^{-42}$
$a_0, \text{ см}$	2	$0,5 \times 10^{-33}$
$a_1, \text{ см}$	$(1,2-4,2) \times 10^{11}$	$(6,4-27) \times 10^{-4}$
$\rho_1, \text{ г см}^{-3}$	$0,4 \times 10^{27} - 3,1 \times 10^{24}$	$5 \times 10^{93} - 2 \times 10^{91}$
$M_0, \text{ г}$	$6,3 \times 10^{28}$	$1,7 \times 10^{-5}$
$M_1, \text{ г}$	$(15-4,5) \times 10^{60}$	$(2,7-0,7) \times 10^{85}$

$\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_0$ , т.е. смена состояния с  $p = -\varepsilon_0$  состоянием с  $p > 0$  носит характер фазового перехода, происходящего при постоянной плотности  $\varepsilon_0$ .

Для численных оценок примем современные значения: средней плотности вселенной  $\sim 10^{-29} \text{ г см}^{-3}$  температуры реликтового излучения 2,7 К (отсюда  $\gamma = 4/3$ ) и параметра Хаббла  $54 \text{ км (с Мпс)}^{-1}$ . Имеются две характерные сверхвысокие плотности: планковская плотность  $\sim 10^{93} \text{ г см}^{-3}$  и плотность  $\sim 10^{27} \text{ г см}^{-3}$ , определяемая константой слабого взаимодействия. Вычисления выполнены для двух значений  $\rho_0$  плотности начального вакуумоподобного состояния, соответствующих этим характерным плотностям.

В таблице приведены значения:  $t_1$  — времени с момента начала расширения до перехода к состоянию с  $p = \varepsilon/3$ ,  $a_0$  и  $a_1$  — радиусов вселенной в начале расширения и при  $t = t_1$ ,  $\rho_1$  — плотности среды в момент  $t = t_1$ ,  $M_0$  — массы вселенной в момент начала расширения и  $M_1$  — массы при  $t = t_1$ . Когда указаны два численных значения, то первое относится к  $\alpha \rightarrow 1$ , второе — к  $\alpha \rightarrow 0$ .

Из таблицы видно, что для рассматриваемой модели характерен огромный рост массы вселенной в эпоху отрицательного давления (на 40–90 порядков). Он обусловлен гравитационным действием сверхплотной среды с отрицательным давлением. Подчеркнем, что это действие носит характер гравитационного отталкивания! В эпоху положительного давления масса падает до современного значения  $\sim 5 \times 10^{57} \text{ г}$ . Это обусловлено преобладанием в начале эпохи положительного давления пар и радиации.

Авторы благодарны Л.Э. Гуревичу, А.З. Долгинову, Л.М. Озерному, Я.А. Смородинскому, В.А. Рубану и А.Д. Чернину за дискуссии.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Академии наук СССР,  
Ленинград

Поступила в редакцию  
20 января 1975 г.

## Список литературы

1. Глинер Э Б *ЖЭТФ* **49** 542 (1965)
2. Зельдович Я Б *УФН* **95** 209 (1968)

## Inflationary universe and the vacuum-like state of physical medium

É.B. Gliner

*I. Th.S., 661 Faxon Avenue, San Francisco, CA 94112-1201*

*Tel. + 415-469-9022*

*E-mail: Erast@hotmail.com*

This paper reviews two cosmologies which assume that the observable universe was initially vacuumlike (i.e., the cosmological medium was non-singular and Lorentz invariant). In the earlier, non-singular Friedmann cosmology the Friedmann universe comes into being during the phase transition of an initial vacuumlike state to the state of 'ordinary' matter. In the course of the transition, the emerging matter is accelerated, which causes the universe to expand and attain the Friedmann expansion regime. In the inflationary cosmology, the transition to the Friedmann universe is preceded by an epoch in which the Universe grows spontaneously by many tens of orders of magnitude without or almost without changes in its composition and density. The idea of inflation gives rise to a variety of scenarios involving a cosmological singularity, or the birth of one universe within another, or the world-as-a-whole as an infinite set of universes, etc. The present paper provides arguments against the inflation idea. On dismissing it, both cosmologies are essentially identical from the viewpoint of their application to the observable universe.

PACS number: 98.80.Bp

Bibliography — 33 references

Received 18 October 2001, revised 10 December 2001