

Метастабильные объекты во Вселенной и их возможная связь со “стрелой времени”

В. В. Бражкин¹⁾

Институт физики высоких давлений РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21 марта 2024 г.

После переработки 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Обсуждается связь наличия во Вселенной метастабильных объектов с различным “временем жизни” с ростом энтропии и “стрелой времени”. Конечное “время жизни” метастабильных объектов позволяет приписать многим из них существование собственных “локальных часов”. Распад любой метастабильной системы во Вселенной приводит к образованию более стабильных объектов и к испусканию фотонов и других частиц. Эти фотоны и частицы взаимодействуют с частицами более стабильных подсистем во Вселенной, что приводит к их эргодичности. Испускание фотонов в расширяющейся Вселенной при распаде метастабильных состояний делает эти процессы необратимыми и задает “стрелу времени”, несмотря на обратимость физических уравнений, описывающих данные процессы.

DOI: 10.31857/S1234567824120127, EDN: YPDEJI

1. Причины роста энтропии в любой квазизамкнутой физической подсистеме и существование (или иллюзия существования) “стрелы времени” являются одними из самых важных проблем современной физики. Поведение объектов как в классической, так и в квантовой физике описывается уравнениями, обратимыми во времени. В результате возникает вопрос об источниках необратимости, роста энтропии в конечных системах и “стрелы времени”. Известно, что для конечных систем необходимым и достаточным условием для необратимого установления распределения Гиббса и “термализации” подсистемы является локальная неустойчивость и перемешивание фазовых траекторий [1]. В классической физике неустойчивость связана со столкновениями частиц или процессами рассеяния квазичастиц (колебательных возбуждений) [1]. При сколь угодно малой неопределенности импульсов и координат частиц такая неустойчивость быстро приводит к росту энтропии и “термализации” системы. Причина малых флуктуаций импульсов и координат частиц (или неопределенность начальных условий) обычно связывается со взаимодействием рассматриваемой подсистемы с большим внешним окружением (термостатом). В квантовой механике потеря информации и необратимость эволюции (коллапс волновой функции) также связывается с хаотическим воздействием окружения (прибора) [2]. В отличие от классического случая, в квантовой системе причиной потери ин-

формации (роста энтропии) являются малые флуктуации параметров гамильтониана (а не начальных условий), также вызванные хаотической динамикой “классического” окружения [2]. При этом как в классическом, так и в квантовом случае остается не до конца решенной проблема поиска первопричины хаотической динамики самого окружения (прибора, термостата). Все аргументы приходится повторять для все более обширной внешней системы и конечном счете – распространять на всю Вселенную. Обычно при этом говорится, что возможность применения обычных физических законов ко всей Вселенной сомнительна [3] или, что информация “растворяется в бесконечной Вселенной” [2].

Когда говорится о “стреле времени”, в физике обычно подразумевается именно “термодинамическая” шкала времени, связанная с ростом энтропии. Такие “стрелы времени” как “волновая”, “квантовая”, “причинно-следственная” фактически можно также свести к “термодинамической” [4]. “Психологическая” “стрела времени” является субъективным свойством сознания живых существ, хотя имеются попытки связать и эту “стрелу” с “термодинамической”: процессы, идущие вспять во времени с убыванием энтропии, согласно [5] не могут оставить след в сознании наблюдателя. Некоторые исследователи вообще считают, что “стрела времени” во Вселенной существует лишь благодаря существованию живых организмов или “наблюдателя”. Имеется также “слабая стрела времени”, связанная со слабым взаимодействием и с редкими нарушениями СРТ-

¹⁾e-mail: brazhkin@hppi.troitsk.ru

симметрии (распад K -мезона) [6]. Наконец, имеются космологические “стрелы времени”, задаваемые гипотетическим “Большим взрывом”, связанные с тем, что события, ближайшие к “Большому взрыву”, были явно асимметричны по времени. Космологические первопричины “запуска” эволюции Вселенной активно дискутируются [7–14]. Так, в работе [7] предполагается, что СРТ-симметрия сохраняется в сумме для пар Вселенная – Анти-Вселенная, которые возникают при Большом взрыве. В обеих репликах имеются “стрелы времени”, направленные в разные стороны. В ряде моделей [8, 9] нулевой отсчет времени для начала стадии инфляции Вселенной отсутствует. Спонтанная инфляция является бесконечной по времени, причем в обе стороны направления времени. В большинстве моделей для появления асимметричных по времени решений требуются очень специфические начальные условия при образовании Вселенной (см., например, монографию [10]). Однако в ряде моделей никакие особенные начальные условия не требуются [11, 12]. Имеются утверждения, что неограниченность Вселенной, вообще, является достаточным условием для возникновения “стрелы времени” [12]. Имеются также многочисленные попытки связать “космологическую” и “термодинамическую” “стрелы” и шкалы времени [13, 14]. В этих же работах обсуждаются проблемы низкой энтропии на ранней стадии Вселенной и ее неограниченного роста при эволюции, а также проблема “точек отскока” по времени или “точек Януса” (см. также работу [12]). Отдельного внимания заслуживают работы, подчеркивающие важность гравитации [11, 13]. Наличие гравитации приводит к “раздвоению” решений уравнений, несмотря на их формальную обратимость по времени. Подчеркивается, что самогравитирующие системы являются “нетермодинамическими” [10]. При наличии гравитации изначально почти однородная Вселенная неизбежно кластеризуется, самым ярким проявлением этой кластеризации является образование галактик [10]. Несмотря на то, что большинство астрономических наблюдений противоречит стационарным моделям Вселенной (без Большого взрыва) [8, 10], у данных моделей Вселенной также по-прежнему имеется много сторонников. В целом, ситуация далека от определенной. Космологические причины запуска эволюции Вселенной(ых) будут, безусловно, еще много и долго обсуждаться. В любом случае, эволюция Вселенной имеет место в любых моделях. Цель настоящей работы – более скромная – обратить внимание на мало обсуждаемый аспект последствия эволюции Вселенной, а именно, на явления метастабильности во Вселенной

на всех уровнях организации материи и на всех масштабах времен.

2. Понятие метастабильности первоначально возникло в физике фазовых переходов. При фазовых переходах 1-го рода из-за наличия энергетического барьера для превращения одна фаза вещества может какое-то время существовать в области стабильности другой. Такие объекты как переохлажденный пар, перегретая и переохлажденная жидкость – это примеры метастабильных веществ из школьного курса физики. Если время жизни перегретой жидкости может составлять микросекунды, то такие метастабильные твердые фазы, как стекло, алмаз, белый фосфор и др., могут существовать при нормальных условиях астрономические времена [15]. Впоследствии, понятие “метастабильного состояния”, как не самого низколежащего по энергии и отделенного от стабильного состояния энергетическим барьером, было распространено на атомную и ядерную физику, химию, биологию, электрические и нейронные сети и т.п. [16]. При этом на каждом уровне организации материи понятие стабильного состояния тоже не однозначно. Так, изомеры в химии – это вещества с одинаковым “полным” химическим составом, но разные по построению или пространственному расположению атомов. Изомер с наименьшей энергией считается стабильным, а другие – метастабильными. Однако, если рассматривать не “полный” химический состав, а “удельный”, то все химические соединения являются метастабильными относительно смеси простых неорганических соединений [15]. Так, например, ацетилен C_2H_2 и бензол C_6H_6 имеют одинаковую стехиометрию $C_{0.5}H_{0.5}$. Бензол лежит по энергии ниже ацетилена, и они оба лежат по энергии выше графана, который, в свою очередь, метастабилен относительно смеси графит (75 %) – метан (25 %) [15]. При высоких давлениях и температурах все молекулярные химические соединения испытывают необратимые превращения сначала в более стабильные полимеризованные состояния (например, этилен $\rightarrow$ полиэтилен), а затем в смесь простых соединений (вода, аммиак, двуокись углерода, метан и т.п.) [15]. Для биологических объектов иерархия стабильных состояний еще более сложная.

Понятие метастабильности можно применять не только к многочастичным системам, но и к индивидуальным атомам и атомным ядрам. Так, возбужденное состояние атома с одним или несколькими электронами на верхних уровнях может существовать достаточно долго с последующим переходом в стабильное состояние и высвечиванием фотонов (фосфоресценция).

До сих пор мы говорили о метастабильных системах с электромагнитным взаимодействием. Метастабильность присутствует и во многих системах со слабым и сильным взаимодействием. Многие атомные ядра могут находиться в состоянии метастабильных изомеров с различными временами жизни, при переходе в стабильное состояние они испускают гамма-кванты. Радиоактивные ядра также можно рассматривать как метастабильные объекты – при радиоактивном распаде образуются более стабильные ядра и испускаются альфа-частицы, электроны, нейтрино и фотоны. Энергия связи на нуклон в зависимости от атомного номера имеет пологий максимум в районе атомного номера железа. Таким образом, ядра всех элементов формально метастабильны относительно ядра железа – более легкие ядра должны слиться путем термоядерного синтеза, более тяжелые распасться – путем радиоактивного распада. В этом отношении все звезды можно рассматривать как метастабильные объекты, в которых происходит образование более стабильных ядер. Можно пойти и дальше: при высоких плотностях для звезд большой массы происходит захват электронов протонами и образование нейтронных звезд и, далее – “черных дыр”. Планеты и остывшие звезды (белые и коричневые карлики) также захватываются черными дырами. Испарение “черных дыр” согласно современным представлениям, по-видимому, завершает эволюцию Вселенной, и возникает окончательно стабильное состояние вакуума с фотонами и лептонами [17]. В рамках модели космологической эволюции энтропия Вселенной равна отношению числа фотонов к числу барионов во Вселенной и стремится к бесконечности в окончательном стабильном состоянии. Заметим, что и сам вакуум может находиться в метастабильном состоянии – “ложный вакуум” с временем жизни порядка 10^{100} с [18]. По одной из гипотез переход метастабильного вакуума в стабильный – это и есть эквивалент “Большого взрыва”.

На разных уровнях организации материи энергетические барьеры могут составлять от 10^{-7} эВ до 10^9 эВ в расчете на частицу. В таких же широких пределах варьируется и выделение энергии при превращении метастабильного состояния в стабильное. Заметим, что в данной статье мы не делаем различия между метастабильными и нестабильными объектами. Метастабильные объекты – это все объекты с конечным временем жизни, в том числе, сколь угодно малым. Самые короткоживущие возбужденные состояния во Вселенной имеют аттосекундные времена жизни (например, ядра Be^8 в звездах при синтезе углерода). Абсолютно нестабильных объек-

тов с нулевым временем жизни в природе не существует. В конденсированных системах при высоких температурах барьеры преодолеваются за счет температурных флуктуаций, для метастабильных ядер барьеры преодолеваются за счет эффектов туннелирования. Такой широкий спектр барьеров приводит к еще более широкому спектру “времен жизни” метастабильных состояний – от 10^{-18} с до 10^{100} – 10^{200} с в случае конечного времени жизни протона и вплоть до 10^{100} с, если протон является стабильным [17]. Во втором случае все элементы “успевают” перейти в железо за 10^{1000} с [17]. Возраст нашей Вселенной ($5 \cdot 10^{17}$ с) обычно рассматривается как символ необычайно долгого времени, однако с точки зрения “времени жизни” ряда метастабильных объектов – это время является очень малым.

Все метастабильные состояния (за исключением вакуума) возникают как “кинетические продукты” в ходе эволюции Вселенной. Метастабильные ядра образуются в ходе ядерных реакций в недрах звезд либо при их взрывах. Метастабильные конденсированные среды – в ходе последующего агрегирования атомов и молекул, фазовых переходов (в том числе, изменения агрегатного состояния вещества) и химических реакций. В результате вся Вселенная оказывается “нашпигована” метастабильными объектами на всех уровнях организации материи от атомных ядер до живых организмов (см. рис. 1а). Как было сказано выше, если Вселенная эволюционирует, она вообще фактически не содержит стабильных объектов кроме фотонов и ряда лептонов. Однако “времена жизни” многих объектов (“стабильные” атомы, “стабильные” ядра, конденсированные среды) существенно превышают современное время существования нашей Вселенной, и такие объекты на нашем масштабе времен мы будем рассматривать как условно стабильные. Таким образом, важно не то, что все объекты Вселенной метастабильны, а то, что существуют метастабильные объекты с временами распада во всем важном для нас спектре времен – от аттосекунд до миллиардов лет. Таким образом, реальная Вселенная совсем не похожа на модельные равновесные системы типа набора частиц газа или стабильных кристаллов. Причем такая картина, как на рис. 1, не зависит от конкретной модели эволюции Вселенной. Этот факт, на наш взгляд, чрезвычайно важен для объяснения причин эргодичности, роста энтропии во Вселенной и “стрелы времени” на всех этапах эволюции Вселенной и во всех ее областях, в том числе, “здесь и сейчас”.

3. Во-первых, каждый метастабильный объект имеет как бы свои собственные часы, синхронизо-

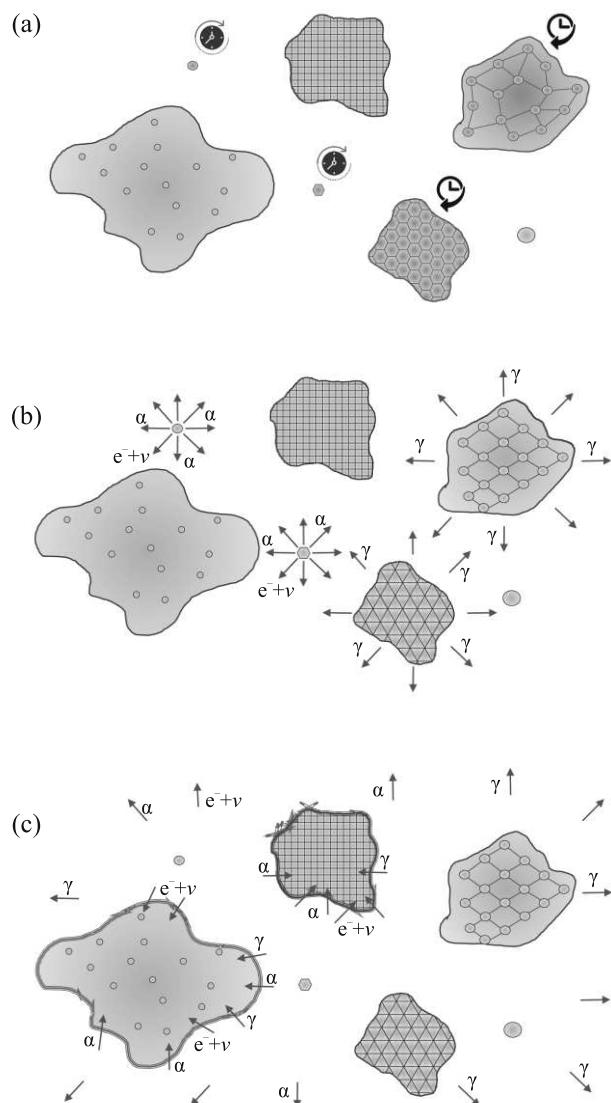


Рис. 1. (Цветной онлайн) (а) – Стабильные (кристаллы, флюиды, стабильные ядра – голубой цвет) и метастабильные (кристаллы, стекла, радиоактивные ядра – красный цвет) объекты во Вселенной. Метастабильные объекты “имеют свои часы”, причем макроскопические объекты “показывают одинаковое время”, в то время как “часы” микрообъектов флуктуируют. (б) – Те же объекты во Вселенной после превращения метастабильных объектов в более стабильные с испусканием фотонов и лептонов. (с) – Те же объекты во Вселенной, демонстрация возбуждения границ стабильных объектов фотонами и лептонами, приводящее к их термализации. Большинство фотонов и лептонов улетает “на бесконечность” в неограниченной Вселенной

ванные друг с другом (см. рис. 1а). Для стабильных объектов время определяет только их взаимное положение в пространстве, тогда как для метастабильных – также их внутреннее состояние. Так, если в

образце изотопа фосфора P^{32} радиоактивный распад испытала половина атомов, то это означает, что прошло примерно 2 недели. Если при $1500^\circ C$ в инертной атмосфере половина кристалла алмаза перешла в графит, значит, прошла примерно 1 с и т.п. Однозначные показания и синхронизация времени, конечно, присуща только макроскопическим объектам, состоящим из большого числа частиц. Показания “часов” микрообъектов (атомов, ядер), конечно, будут сильно флуктуировать и “показывать” правильное время” лишь после усреднения (см. рис. 1а).

Закон сохранения энергии по отношению ко всей расширяющейся Вселенной, по-видимому, неприменим. Вместе с тем, для любой рассматриваемой конечной области этот закон выполняется. Естественно считать, что переход из метастабильного в более стабильное состояние является необратимым процессом. При этом энергия всей системы должна сохраняться. Если происходит превращение алмаз $\rightarrow$ графит или стекло $\rightarrow$ кристалл, то выделяется определенное количество тепла. В результате нагревается какая-то часть окружающей среды (возбуждаются дополнительные фононы), затем происходит ряд процессов, и, в конечном итоге, излучается набор фотонов. При распаде возбужденных или радиоактивных ядер также выделявшаяся энергия “уносится” в виде фотонов (гамма-квантов) или в виде кинетической энергии вылетевших частиц. Конечно, все эти превращения также должны описываться зависящими от времени и обратимыми уравнениями Шредингера. Для описания процесса опять же необходимо рассматривать как сам объект, так и его окружение. Например, в случае перехода возбужденного электрона в атоме на нижний уровень следует рассматривать систему “атом плюс окружающий вакуум” (где есть вакуумные фотонные состояния). Исходная волновая функция – это комбинация волновых функций электрона в возбужденном состоянии и вакуумного поля. В результате квантового процесса возбужденное метастабильное состояние атома перейдет в состояние “стабильный атом плюс испущенный фотон” (дополнительный к полю нулевых фотонов в вакууме). Волновая функция при этом будет комбинацией волновой функции электрона на нижнем уровне и возбужденного состояния вакуума – с дополнительным возбужденным фотоном. Так же будет описываться и процесс перехода возбужденного ядра-изомера с испусканием гамма-кванта. Процесс радиоактивного распада с точки зрения квантовой механики описывается как эволюция волновой функции частицы (электрона, нейтрона, протона, альфа-частицы) при туннелировании через барьер, создаваемый осталь-

ными нуклонами ядра, в вакуум с приобретением кинетической энергии. Аналогично, превращение любого метастабильного объекта в более стабильный в конечном счете приводит к эмиссии фотонов и других частиц (лептоны, нейтроны, альфа-частицы) (см. рис. 1b). Если распад метастабильного состояния происходит в замкнутом боксе, то обратимость уравнений Шредингера приводит к очень малой, но ненулевой вероятности обратных процессов. Например, испущенная альфа-частица может отразиться от стенок и снова поглотиться ядром, переведя его в метастабильное возбужденное состояние. Однако в “открытой” расширяющейся Вселенной фотоны и частицы формально могут “уйти” на бесконечность, что и приводит к полной необратимости процесса, несмотря на обратимость уравнения Шредингера. Таким образом распад метастабильных состояний во Вселенной задает необратимость и “стрелу времени”. Напомним, что наше рассмотрение ограничено современным типом эволюции Вселенной с расширением. Возможную стадию сжатия Вселенной, где фотоны не будут формально “уходить на бесконечность”, мы не рассматриваем (см. выше обсуждение различных космологических моделей). Кроме того, испущенные фотоны и другие частицы могут взаимодействовать с частицами равновесных на данных временах (условно стабильных) макроскопических подсистем (газ, плазма, твердые тела, жидкости) (см. рис. 1c). Именно это взаимодействие служит источником флуктуаций начальных условий и параметров гамильтониана в условно равновесных подсистемах во Вселенной и их эргодичности. Таким образом, наличие во Вселенной метастабильных микро- и макро-объектов различной природы приводит к 4-м важным следствиям. Во-первых, Вселенную можно условно разбить на стабильные (в данном диапазоне времен) и метастабильные (т.е., претерпевающие распад в данном диапазоне времен) области (см. рис. 1a). Во-вторых, распад метастабильных состояний приводит к неизбежным возбуждениям частиц в условно стабильных подсистемах (см. рис. 1c), что, в свою очередь, приводит к их эргодичности. В-третьих, все макроскопические метастабильные объекты являются локальными “автономными часами”, идущими по времени синхронно (см. рис. 1a). И наконец, процессы распада метастабильных систем сопровождаются эмиссией фотонов и других частиц, что в неограниченной расширяющейся Вселенной приводит к явлениям необратимости и “стреле времени”.

В итоге, можно заключить, что во Вселенной происходит перманентный распад различных метастабильных состояний во всех областях пространства и во всем диапазоне времен, сопровождаемый испусканием частиц, главным образом – фотонов. Именно эти процессы и возможность “ухода” этих частиц “на бесконечность” в расширяющейся неограниченно Вселенной могут рассматриваться как причины эргодичности, необратимости эволюции и существования “стрелы времени” “здесь и сейчас”.

Автор благодарен В. Н. Рыжову и П. И. Арсееву за полезные обсуждения данных вопросов, а также И. В. Данилову за помощь в оформлении статьи. Автор также благодарен рецензентам за ценные советы и замечания.

Финансирование работы. Данная работа была выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) номер 24-12-00037.

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

1. В. В. Бражкин, УФН **191**, 1107 (2021).
2. А. Н. Рубцов, УФН **193**, 783 (2023).
3. Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц, *Статистическая физика*, Наука, М. (1976).
4. M. Schlosshauer, Rev. Mod. Phys. **76**, 1267 (2005).
5. L. Maccone, Phys. Rev. Lett. **103**, 080401 (2009).
6. J. Vaccaro, Proceedings of the Royal Society A **472**, 20150670 (2016).
7. L. Boyle, K. Finn, and N. Turok, Phys. Rev. Lett. **121**, 251301 (2018).
8. A. Aguirre and S. Gratton, Phys. Rev. D **67**, 083515 (2003).
9. S. M. Carroll and J. Chen, arXiv:hep-th/0410270.
10. H. D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time*, Springer, N.Y. (2007).
11. J. Barbour, T. Koslowski, and F. Mercati, Phys. Rev. Lett. **113**, 181101 (2014).
12. J. Barbour, T. Koslowski, and F. Mercati, arXiv:1604.03956.
13. J. Barbour, T. Koslowski, and F. Mercati, arXiv:1507.06498.
14. S. Goldstein, R. Tumulka, and N. Zanghi, Phys. Rev. D **94**, 023520 (2016).
15. В. В. Бражкин, УФН **176**, 745 (2006).
16. <https://en.wikipedia.org/wiki/Metastability>.
17. https://en.wikipedia.org/wiki/Future_of_an_expanding_universe.
18. https://en.wikipedia.org/wiki/False_vacuum_decay.