

О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ “СТРЕЛЕ ВРЕМЕНИ”

Шпаковский Р.П.

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева, Россия (606026, г. Дзержинск, Нижегородская обл., ул. Гайдара, 49), e-mail: rst-shpk@list.ru

Рассматривается связь термодинамической “стрелы времени” с моделью расширяющейся Вселенной. Возрастание энтропии в термодинамически необратимых процессах связано с диссипацией. Существует также связь временного фактора и диссипации в виде формулы следующего типа:

$$\frac{dI_0}{d\tau} \equiv \int_V \rho \frac{\partial \rho}{\partial \tau} dV = - \int_V D (\nabla \rho)^2 dV$$

которая выводилась применительно к диффузии частиц в среде, не имеющей границ, но с общим конечным количеством вещества. Мировое пространство в его огромных масштабах можно рассматривать как некоторый “газ”, в котором отдельными “молекулами” являются галактики, что позволяет применить данное выражение к нашей Вселенной. При этом правая часть этого выражения отрицательна, а в левой его части $\partial \rho < 0$ (плотность “газа” падает вследствие разбегания галактик), из чего следует, что $\partial \tau > 0$, т.е. время в нашем мире всегда течёт в одну сторону (все его приращения положительны).

Ключевые слова: стрела (направление) времени, термодинамика, вселенная

ON THERMODYNAMIC “ARROW OF TIME”

Shpakovski R.P.

Nizhny Novgorod state technical University, Russia (606026, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, Ul. Gaidar, 49), e-mail: rst-shpk@list.ru

The connection between the thermodynamic “arrow of time” with a model of the expanding Universe. The increase of entropy in a thermodynamically irreversible processes associated with dissipation. There is also a link for the time factor and dissipation in the form of an equation of the following type:

$$\frac{dI_0}{d\tau} \equiv \int_V \rho \frac{\partial \rho}{\partial \tau} dV = - \int_V D (\nabla \rho)^2 dV$$

which was transmitted in relation to the diffusion of particles in the environment, without borders, but with the general finite number of substances. The space (the Universe) of its huge scale can be considered as a kind of “gas”, in which individual “molecules” are of the galaxy, so one can use this expression to our Universe. While the right part of this expression is negative, and in the left part $\partial \rho < 0$ (the density of the “gas” is falling due to the recession of galaxies), which implies that $\partial \tau > 0$, i.e. the time in our world is always flowing in one direction (all its increments positive).

Keywords: arrow (direction) of time, thermodynamics, the universe

Английский астрофизик Д. Джинс указывал на три “стрелы” времени: первую – термодинамическую, связанную с возрастанием (производством, генерацией) энтропии, вторую – выражающуюся в излучении звёзд в мировое пространство, и третью – выражающуюся в старении живых организмов. Последнюю, на наш взгляд, можно было бы и исключить: по существу, оно (старение) относится только к эукариотам, а к прокариотным организмам не имеет отношения и представляет собой переход к более совершенной биологической эволюции.

А. Эддингтон полагал, что в области физики “стрела времени” (направление хода реального времени) есть свойство энтропии и только её одной [4, 8]. Однако им отмечалась трудность, заключающаяся в том, что при этом связываются между собой “две вещи, которые мы более или менее понимаем, но которые, насколько мы их понимаем, совершенно различны” (т.е. ход времени и энтропия).

И. Пригожин пишет [5, с.175]: “...энтропия задаёт стрелу времени”. Этим автором отмечается, что в классической и квантовой физике время играет роль “лишь метки, “привязанной” к траекториям или волновым пакетам “, тогда как время, прежде всего, имеет “совершенно другой смысл – оно связано с эволюцией” [5, с. 181].

В отличие от формально обратимого времени, присутствующего в уравнениях классической и квантовой физики, это время И. Пригожин называет “внутренним”, поскольку оно связано с эволюцией соответствующего материального объекта.

В послесловии к книге [5] научный редактор русского перевода Ю.Л. Климонтович отмечает, что “при формулировке флуктационно-диссипационных соотношений на различных уровнях описания понятие времени расширяется и становится более содержательным. Его роль уже не сводится к роли простого параметра”.

На с. 219 монографии [5] И. Пригожин говорит о необходимости “*осознания роли необратимости в эволюции всей Вселенной в целом*” (выделено мною. – Р.П.), а там же на с. 246 пишет: “Роль второго начала термодинамики как принципа отбора должна представлять особый интерес для общей теории относительности, где второе начало должно привести к отбору *физически реализуемых* (курсив автора [5]) структур пространства-времени”. Он полагает, что “...необратимость [имеется в виду термодинамическая необратимость] приводит к глубоким изменениям понятий пространства, времени и динамики” (предисловие к [5]).

В связи со “стрелой времени” И. Пригожин там же отмечает: “Никому ещё не удавалось наблюдать звезду, которая бы, находясь на Главной последовательности, эволюционировала в обратном направлении”.

В целом, можно полагать, что наличие и признание роли термодинамически необратимых процессов во Вселенной в настоящее время является аксиомой.

Для дальнейшего заметим, что локальная величина энергии диссипации $E_{\text{дис}}$, образующейся в термодинамически необратимом процессе, связана с соответствующим локальным производством энтропии σ соотношением

$$E_{\text{дис}} = T\sigma ,$$

где T – абсолютная термодинамическая температура.

Другими словами, производство энтропии обусловлено необратимостью и диссипацией энергии в макроскопических реальных (термодинамически необратимых) процессах.

После того, как стала общепризнанной модель расширяющейся Вселенной, фактически появилась ещё одна “стрела времени”, которая очевидным образом должна быть связана с другими ”стрелами”.

Так, например, в [2] ставился вопрос о “космологической природе закона монотонного возрастания энтропии”.

Рассмотрим следующую возможность связи принципа возрастания энтропии с необратимостью хода времени в масштабе Вселенной и её (Вселенной) расширением.

Связь временного фактора и диссипации существует в виде формулы следующего типа [1]:

$$\boxed{\frac{dI_0}{d\tau} \equiv \int_V \rho \frac{\partial \rho}{\partial \tau} dV = - \int_V D (\nabla \rho)^2 dV} \quad (1)$$

Данная формула выводилась для диффузии частиц в среде, не имеющей границ, но с общим конечным количеством вещества. В ней ρ – плотность среды; коэффициент диффузии D зависит от точки пространства, времени τ и самой плотности; V — эффективный занятый объём в данный момент времени τ ; $I_0 = \frac{1}{2} \int_V \rho^2 dV$.

Правая часть формулы (1) выражает величину диссипации в объёме V , обусловленную данным термодинамически необратимым процессом, что соответствует общему представлению локальной величины энергии диссипации через термодинамические потоки J_i и термодинамические (обобщённые) силы X_k в виде соотношения:

$$E_{\text{дис}} = \sum_{i,k=1}^n J_i X_k .$$

При этом формула типа (1) предполагает также отсутствие взаимного влияния различных потоков и допустимой связь термодинамических потоков и сил в форме $J_i = L_i X_i$, где L_i – соответствующий феноменологический коэффициент.

На данном этапе существования Вселенной мировое пространство в его огромных масштабах можно рассматривать как некоторый “газ” [3], в котором отдельными “молекулами” являются галактики. Указанное обстоятельство позволяет использовать выражение (1) применительно к вопросу о связи принципа возрастания энтропии с необратимостью хода времени и расширением Вселенной.

При этом правая часть указанного выражения отрицательна, а в левой его части $\partial \rho < 0$ (плотность “газа” падает вследствие разбегания галактик), из чего следует, что $\partial \tau > 0$, т.е. время в нашем мире всегда течёт в одну сторону (все его приращения положительны). “Коэффициент диффузии” может быть определён, исходя из существующих моделей Вселенной.

В итоге термодинамическая необратимость, находящая своё выражение в диссипации и производстве энтропии, через соотношение типа (1) оказывается связанной с необратимостью времени и расширением Вселенной, имеющими космологическую природу.

Обратимся также к известным космологическим моделям.

В нестатической взрывной модели Вселенной, предложенной Фридманом, радиус R расширяющейся Вселенной коррелируется со временем τ следующим соотношением:

$$R = A\tau^{2/3}, \quad (2)$$

где τ – время от “начала” (момента “рождения”) Вселенной, A – постоянная.

Модель Фридмана связана с общей теорией относительности (ОТО) Эйнштейна и описывает постоянно расширяющуюся (по достаточно простому закону) Вселенную. Согласно формуле (2) расширение Вселенной и время “идут” в одну сторону; однако в данной модели диссипация явным образом никак не задействована.

Исследования Вселенной, особенно в последние десятилетия, вызвали замечания, касающиеся как данной модели Фридмана, так и альтернативных моделей, базирующихся лишь на ОТО, см., например, [9].

Развивавшаяся в эти же годы теория “раздувания” (инфляции) Вселенной решает многие проблемы теории Большого Взрыва.

Согласно А.Д.Линде, при зарождении Вселенной существовало особое скалярное поле с уравнением состояния, близким к вакуумно-подобному. Это состояние можно рассматривать как специальный вакуум, у которого есть потенциальная энергия. Записывая уравнения движения этого поля в формах

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{m^2}{6} \phi^2, \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -m^2\phi, \quad (4)$$

автор [9] сравнивает последнее с уравнением для осциллятора с трением

$$\ddot{x} + \alpha\dot{x} = -kx. \quad (5)$$

(В уравнениях (3)-(5) m – масса, H – параметр Хаббла, ϕ – плотность энергии, x – линейная координата, α и k – постоянные коэффициенты; точка над символом означает скорость изменения соответствующей величины со временем, две точки – ускорение).

В интересующем нас аспекте обращает на себя внимание, что в [9] прямо говорится об эффекте “трения” во Вселенной; очевидно, что “трение” при этом можно понимать в широком смысле, т.е. как эквивалент термину “диссипация”.

Тогда с точки зрения феноменологической термодинамики в такого рода необратимых процессах должен происходить переход “поточной” (упорядоченной) формы энергии, обу-

словленной движением (или превращением) некоторого термодинамического субстрата, в “тепловую” (как принято выражаться) форму энергии.

При этом следует, однако, иметь в виду, что на начальном этапе рождения Вселенной (когда ещё не произошло формирования галактик) диссипация может быть связана с собственно “взрывом”, т.е. с освобождением потенциальной энергии скалярного поля, её переходом в неупорядоченные формы и далее - в термическую форму. Собственно поэтому и происходил быстрый разогрев Вселенной до температур порядка 10^{13} К и выше. В термодинамическом плане определёнными аналогиями этому являются известные процессы: экзотермические химические реакции и “обычный” ядерный взрыв.

Если к начальной стадии зарождения Вселенной применимы те же временные масштабы, что и в настоящее время, то скорости образования “энергии диссипации” и соответственно генерации энтропии при этом должны быть громадны.

Однако на дальнейших этапах характер процессов, происходящих во Вселенной, меняется; вместе с этим должен меняться и сам характер диссипации (и в связи с этим, возможно, и сам характер хода времени).

В связи с последним остановимся также на мнениях, высказывавшихся другими авторами.

В [5, с. 235] И. Пригожин пишет: “Средний возраст состояния «идёт в ногу» с внутренним временем или временем, отсчитываемым по обычным часам”.

И.С. Шкловский [6, с. 92], имея в виду этап зарождения Вселенной в соответствии с моделью Большого Взрыва, отмечал: “Вообще само понятие “время” при таких огромных плотностях может потерять всякий наглядный смысл. Столь же бессмысленно говорить при таких условиях о каком-то “начале времени”.

С. Хокинг и Р. Пенроуз полагают [10], что в развитии нашей Вселенной могут быть две временные границы; одна из них соответствует начальной стадии Вселенной. Их мнения по этому вопросу не вполне совпадают, но вот что об этом говорит Стивен Хокинг: “Каким образом две временные границы могут быть различными? Почему возмущения должны быть малы в одной из них, но не в другой? Причина этого в том, что уравнения поля имеют два возможных комплексных решения... Очевидно, что одно решение соответствует одной границе времени, а другое - другой... В одном конце времени [в начальной стадии – Р.П.] Вселенная была очень гладкой и Вейлевский тензор – мал. Однако точно он не мог быть равен нулю, поскольку это приводит к нарушению соотношения неопределённости. Вместо этого должны иметь место небольшие флуктуации, которые позже могут превратиться в галактики и тела, подобно нам самим”.

В [1] речь шла о диссипации, формально обусловленной ”чисто” диффузионным процессом. Однако диссипативный переход в ”тепловую” форму энергии всегда представляет собой переход в микрофизическую форму движения, которую обычно характеризуют как ”неупорядоченную”, но где, по сути, на первый план выходит взаимодействие субмолекулярных и субатомных структур вещества с передаваемыми при этом квантами энергии электромагнитного поля (фотонами).

В ”обычной” термодинамике известен термодинамически необратимый процесс Гей-Люссака – расширение газа в пустоту (газ из одного сосуда расширяется в другой сосуд, в котором был создан технический вакуум). Этот процесс может служить определенной аналогией нынешнему этапу расширения Вселенной, но есть и серьёзные отличия. В частности, в процессе Гей-Люссака суммарный объём системы (двух сосудов) ограничен. Кроме того, в процессе Гей-Люссака передача квантов энергии происходит при сближении молекул на весьма близкие расстояния (как принято выражаться, при ”столкновениях” молекул и соответственно возникающих при таких сближениях деформациях внешних электронных оболочек; это относится и к ”обычной” газовой диффузии вследствие того, что существует распределение молекул по скоростям и импульсам).

Если говорить о связи диссипации и направления времени на нынешнем этапе расширения Вселенной, то возникает естественный вопрос: с каким конкретно физическим процессом диссипация связана в этом случае?

Выше уже отмечалось, что макро- (и мега-)скопические процессы, происходящие во Вселенной на настоящей стадии её развития, являются термодинамически необратимыми.

Так, в [6] обращается внимание на необратимый процесс в современной Вселенной – превращение водорода в гелий при термоядерных реакциях в недрах звёзд.

Известно о разогреве межзвёздной среды и межгалактического газа, оставшегося от ранних этапов формирования Вселенной, ультрафиолетовым и рентгеновским излучениями от звёзд и галактических ядер. Температура межгалактического газа за счёт этого соответствует десяткам миллионов градусов (одновременно надо учитывать его весьма низкую плотность порядка 10^{-4} частицы на см^3). Процесс на этом не заканчивается: этот газ должен сам излучать в мировое пространство.

М.Ю. Хлопов, касаясь вопроса о диссипации энергии во Вселенной, предполагает, что указанная диссипация имеет место при сжатии ”газа” частиц тёмной массы [7]. (Заметим также, что тёмная масса поглощает свет, т.е. фотонное излучение).

Однако, как представляется автору данной работы, связь хода времени с нынешней стадией эволюции Вселенной должна существовать, прежде всего, в соответствующем ”вселенском” масштабе.

Если ориентироваться на формулу типа (1) (т.е. рассматривая разбегание галактик, соответственно, “газ” галактик), на первый план должно выходить взаимодействие излучения галактик с некой другой материальной субстанцией Вселенной, по смыслу *пронизывающей* всю Вселенную.

При этом речь может идти об излучениях разных типов, но, очевидно и в конечном итоге, об излучении фотонов.

Возможно, на роль такой субстанции (если не будут открыты ещё более загадочные частицы) может претендовать и нейтрино.

На роль среды, “в конечном итоге” принимающей излучение, в настоящее время наиболее вероятным кандидатом представляется тёмная энергия. (Хотя, возможно, не последнюю роль здесь могут играть и чёрные дыры.)

Сказанное означает также связь самого галактического излучения с термодинамической “стрелой времени”, поскольку в целом процесс излучения является термодинамически необратимым процессом. В случае выяснения соответствующих моментов будет получен ответ и на вопрос, возникающий в связи со “второй стрелой времени по Джинсу”, т.е. куда, в конце концов, излучение со звёзд девается.

Если принять, что ход времени связан с диссипацией, то надо будет также признать, что бездиссипативные процессы сами по себе являются вневременными процессами, как например, рассматриваемое в теории движение инерциальных систем. Точно так же электромагнитные колебания, возбуждённые в физическом вакууме, или, по-другому, фотоны, излучённые в пространство-физический вакуум, в нём самом движутся без сопротивления с максимально возможной скоростью - скоростью света.

Возможно, что здесь существует также связь с известной формулой специальной теории относительности, согласно которой при приближении скорости объектов к скорости света, течение времени в них для внешней системы отсчёта замедляется. В пределе время для таких объектов должно “остановиться”. В этой связи обратим также внимание на феномен реликтового излучения, существующего с момента своего зарождения “вечно”.

В связи с настоящим рассмотрением возникает также вопрос о возможности отнесения Вселенной в термодинамическом плане к “диссипативным структурам” (термин “диссипативные структуры” был предложен И. Пригожиным). Отметим существенно важный момент, что именно таким структурам присуща самоорганизация.

В то же время надо заметить, что рассматриваемые в современной нелинейной термодинамике диссипативные структуры возникают в неизолированных системах; впрочем, сейчас в космологии активно дискутируется вопрос о возможности существования не только единственной “нашей”, но и сложной “Мульти-вселенной”.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б. Элементы математической физики / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис – М.: Наука, 1973. – 352 с.
2. Ландау Л.Д. Статистическая физика. Часть 1 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1976. – 584 с.
3. Акоста В. Основы современной физики / В. Акоста, К. Кован, Б. Грэм: Пер. с англ. – М.: Просвещение, 1981. – 495 с.
4. Шамбадаль П. Развитие и приложения понятия энтропии / П. Шамбадаль: Пер. с франц. – М.: Наука, 1967. – 280 с.
5. Пригожин И. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках / И. Пригожин. Пер. с англ. – М., Наука, 1985. – 327 с.
6. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум / И.С. Шкловский – М.: Наука, 1976. – 368 с.
7. Хлопов М.Ю. Диссипация энергии / М.Ю. Хлопов // Большая Российская энциклопедия. – Т. 9. – М., 2007. – С. 74.
8. Eddington A.S. The Nature of the Physical World / A.S.Eddington - Cambridge University Press, 1929. – 125p.
9. Линде А.Д. Многоликая Вселенная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elementy.ru/lib/430484> (Лекция в ФИАНе, 2007. – 35 с.).
10. Хокинг С.и Пенроуз Р. Природа пространства и времени [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.kabanik.ru/page/nature-of-space-and-time (Выдержки из публичных лекций, прочитанных в Кембриджском ун-те в 1994г. Лекции выпущены в 2010г. изд-ом Princeton University Press).

Рецензенты:

Добротин С.А., д.т.н., профессор, директор ООО «НТЦ «Безопасность», профессор РАНХ и ГС при президенте РФ, г. Дзержинск.

Сидягин А.А., д.т.н., профессор Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Дзержинск.