

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА

УДК 531.5

ТЕРМОДИНАМИКА ФОТОННОГО ГАЗА И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

В.М. Самсонов

Кафедра теоретической физики

Исследована термодинамическая модель Вселенной, представленная сферой, однородно заполненной фотонным газом. Проведена оценка скорости понижения средней температуры и ускорения разбегания «пробных» галактик, помещенных в такую Вселенную. Установлено, что данная модельная Вселенная расширяется с положительным ускорением. Этот результат согласуется с современными данными наблюдательной астрономии.

1. Введение. В 1865 г. выдающийся немецкий физик и физико-химик Р. Клаузиус ввел в рассмотрение энтропию S как количественную меру степени хаотизации термодинамической системы и сформулировал законы термодинамики как законы эволюции Вселенной [1]:

- 1) энергия мира постоянна;
- 2) энтропия мира стремится к максимуму ($\Delta S \geq 0$).

Первый из этих законов постулирует изолированный характер рассматриваемой термодинамической системы. Приведенная выше формулировка второго закона была положена самим Клаузиусом в основу концепции тепловой смерти Вселенной. На протяжении столетия рассмотрение Вселенной как термодинамической системы и концепция тепловой смерти Вселенной вызывали критику, подчас резкую, в том числе со стороны основоположников марксизма-ленинизма.

Для начального этапа расширения Вселенной положительный вклад в ускорение расширения $a = \frac{\Lambda c^2}{3} R$ предсказывает и модель «пустой» Вселенной де Ситтера [2]. Здесь c – скорость света в вакууме, Λ – космологическая постоянная. Этот эффект, интерпретируемый как отрицательная гравитация, положен в основу предпринимаемых в настоящее время попыток объяснения положительности ускорения разбегания галактик.

В 1963 г. научная общественность достаточно широко отмечала 75-летие со дня рождения А.А. Фридмана, который в 1920-х гг. в голодном и холодном Петрограде получил решения уравнений общей теории относительности (ОТО), описывающие эволюцию открытой и закрытой моделей однородной Вселенной [3-5]. Результаты А.А. Фридмана удивили самого А. Эйнштейна [6], который затем [7] изменил свое первоначальное негативное отношение. Обе модели Фридмана отвечают шару радиусу R , равномерно заполненному веществом с некоторой плотностью ρ . Если

плотность ρ не достигает некоторой критической плотности ρ_c , то реализуется открытая модель, для которой $v = dR/dt > 0$ (t – время), отвечающая расширению Вселенной. При $\rho > \rho_c$ скорость расширения v меняет знак, т.е. расширение сменяется сжатием (пульсирующая модель). Гораздо позднее стало ясно, что основные результаты теории Фридмана можно получить [8] и без использования общей теории относительности, т.е. в рамках классической теории гравитации Ньютона.

Данная работа посвящена разработке концепции, в которой определяющая роль в законах эволюции Вселенной отводится заполняющему ее фотонному газу (тепловому радиоизлучению). На современном этапе эволюции Вселенной это излучение, открытое американскими радиоастрономами, имеет температуру $T \approx 3 K$. Известный советский астрофизик И.С. Шкловский назвал его реликтовым [9; 10], поскольку оно является «отзвуком» (реликтом) Большого Взрыва.

Открытие Э. Хабблом (1929 г.) явления разбегания галактик привело к триумфу теории Фридмана и появлению концепции Большого Взрыва [2]. Уже в конце 90-х гг. прошлого столетия прочные позиции теории Фридмана были поколеблены сенсационным открытием американских астрономов, которые на основании многолетних наблюдений установили, что наша Вселенная не просто расширяется, а расширяется с положительным ускорением, т.е. $a = d^2R/dt^2 > 0$ [11]. Сенсационность этого результата обуславливается тем, что его принятие равноценно опровержению теории Фридмана, поскольку при $a > 0$ расширение ($v = dR/dt > 0$) не должно смениться сжатием, независимо от соотношения между ρ и ρ_c .

Более строгий подход должен, очевидно, включать рассмотрение двух подсистем: вещества и поля. Возможно, необходимо учитывать и третью подсистему – физический вакуум. Однако решение такой задачи связано с серьезными трудностями. Пока автору не вполне ясно, является ли фотонный газ (реликтовое излучение) лишь свидетелем эволюции Вселенной или же природа отвела ему важную роль в механизмах этой эволюции. Рассмотренная выше модель не позволяет ответить на этот вопрос.

Хотя пока необходимо проявлять некоторую осторожность, возможность противоречий между результатами ОТО и эволюцией реального мира представляется автору вполне возможной. Действительно, хотя речь идет о великой и красивой теории, обладающей большой эвристической силой, следует отметить ее механистический характер. Эволюция Вселенной уподобляется в теории Фридмана колебаниям пружины в отсутствие диссипации энергии. Точка зрения автора вполне согласуется с воззрениями И. Пригожина, отмечавшего ограниченные возможности классической физики, в том числе теории относительности, которую можно рассматривать как обобщение представлений классической механики и электродинамики [12]. Вместе с тем исследование эволюции макроскопических систем должно

основываться на исследовании законов термодинамики, в том числе неравновесной. Это не исключает синтеза термодинамики и теории относительности, хотя релятивистская термодинамика [13-15] по-прежнему остается наименее разработанным разделом теории относительности.

2. Постановка задачи. Более адекватной по сравнению с одномерной моделью Фридмана (рис. 1, *a*) является неоднородная (гетерогенная) модель Вселенной, в которой вещество сконцентрировано в малых объемах, а пространство между плотными объектами (звездами, черными дырами) заполнено фотонным газом (рис. 1, *б*), хотя веществу отвечает основная масса Вселенной, ее основной объем отвечает фотонному газу. Следовательно, достаточно адекватно эволюцию Вселенной, т.е. зависимость от времени ее радиуса R , скорости расширения v и средней температуры T , можно описать в рамках модели, показанной на рис. 1, *в*, в которой вещество вообще отсутствует и определяющую роль в законах эволюции отводится фотонному газу.

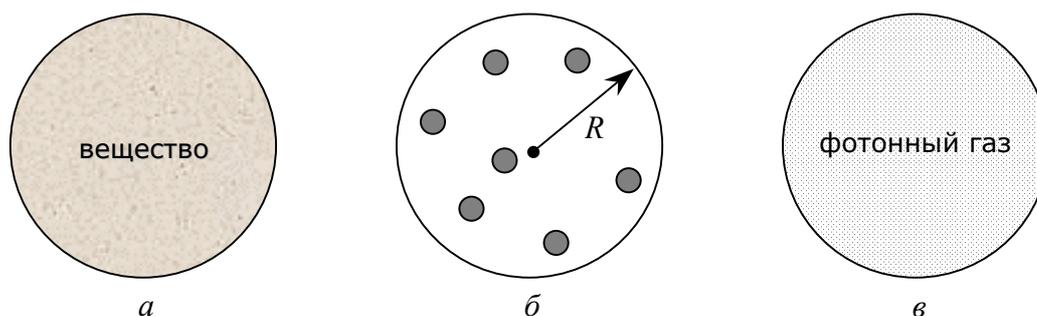


Рис. 1. Модели Вселенной: *a* – однородная модель Фридмана (однородное вещество), *б* – гетерогенная модель, *в* – наша модель (однородный фотонный газ)

3. Уравнения эволюции шара, заполненного однородным фотонным газом. Из закона Стефана-Больцмана следует, что плотность энергии фотонного газа пропорциональна T^4 :

$$u(T) = \alpha T^4, \quad (1)$$

где α - коэффициент пропорциональности. Закон (1) может быть получен и в рамках термодинамики (см. [16]). Уравнение состояния фотонного газа может быть найдено из тензора энергии-импульса для данной области макроскопического тела [5]

$$T^{(ik)} = \begin{bmatrix} u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{bmatrix},$$

где p – давление. Основным свойством тензора $T^{(ik)}$ является его

конформальная инвариантность

$$Sp\hat{T} = T_i^i = u - 3p \geq 0, \quad (2)$$

причем знак равенства отвечает полевой форме материи. Таким образом, для фотонного газа

$$p = \frac{u}{3} = \frac{1}{3}\alpha T^4. \quad (3)$$

С учетом уравнения состояния (3) и первого закона термодинамики

$$\delta Q = dU + pdV, \quad (4)$$

находим

$$d(T^3V) = TdeS, \quad (5)$$

где $V = (4/3)\pi R^3$ – объем шара, $deS = \delta Q/T$ – поток энтропии. В (4) $U = uV$ – внутренняя энергия, δQ – элементарное количество теплоты. Для изолированной системы ($deS = 0$) из (5) следует известное уравнение адиабаты для фотонного газа [16]:

$$T^3V = const. \quad (6)$$

Из (5) нетрудно также получить соотношение для скорости изменения температуры в рассматриваемой нами модельной Вселенной:

$$\frac{dT}{dt} = -TH + \frac{1}{3} \frac{1}{VT} \frac{deS}{dt}, \quad (7)$$

где $H = (dR/dt)/R$ – постоянная Хаббла.

В дальнейшем мы не накладываем требование, что Вселенная идеально отвечает модели изолированной термодинамической системы. Однако если исключить возможность экзотических ситуаций (например, по Шкловскому [9; 10], черные дыры являются «стоками» в другие Вселенные), то следует исходить из вполне разумного допущения, что степень открытости Вселенной не является существенной*. Тогда на современном этапе эволюции второй член в правой части (7) должен быть пренебрежимо малым, поскольку $V \sim R^3$, а $deS/dt \sim R^2$.

Дифференцируя (6) или отбрасывая второй член в правой части (7), находим

$$dT/dt = -TH < 0. \quad (8)$$

Дифференцируя далее равенство (6) дважды, получим уравнение, связывающее скорость изменения температуры с ускорением расширения

$$\frac{d^2T}{dt^2} + 2H \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R} \frac{d^2R}{dt^2} = 0. \quad (9)$$

* Здесь и далее термины «открытая система», «закрытая система» и «изолированная система» используются в термодинамическом смысле, т.е. не соответствуют терминологии Фридмана.

Это уравнение содержит две неизвестные функции - $R(t)$ и $T(t)$, поэтому его непосредственное решение не представляется возможным. Однако ввиду малости производной dT/dt (количественная оценка представлена в п. 4), можно положить $d^2T/dt^2 = 0$. В этом приближении

$$a = \frac{d^2R}{dt^2} = -2HR \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = 2H^2 R = \frac{2V^2}{R} > 0, \quad (10)$$

т.е. шар, состоящий из фотонного газа, расширяется с положительным ускорением.

4. Количественные оценки. Согласно [8], на современном этапе эволюции Вселенной $H = 75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{МПК})$, причем $t_{\text{жизни}} = 1/H = 6 \cdot 10^{17} \text{ с} = 20 \cdot 10^{19} \text{ лет}$ имеет смысл характерного времени жизни нашей Вселенной. Подставляя принятое значение H в (8) и полагая $T = 3 \text{ К}$, найдем скорость изменения средней температуры T для современного этапа эволюции Вселенной

$$dT/dt = -10^{10} \text{ К}/\text{год}.$$

Эта величина отрицательна, но очень мала по величине: изменению температуры $\Delta T = -1 \text{ К}$ отвечает 10^{10} лет, т.е. половина времени жизни нашей Вселенной.

Оценка ускорения расширения a по формуле (10) для нашей Вселенной не представляется возможной, поскольку радиус Вселенной R достоверно не оценивался. Однако в рамках однородной модели аналогичное соотношение

$$w = 2H^2 r = 2 \frac{v^2}{r} > 0 \quad (11)$$

может быть записано для ускорения w разбегания двух «пробных» галактик, находящихся на расстоянии r друг от друга и «помещенных» в эту Вселенную. Величина w уже может быть определена из астрономических наблюдений. Однако поскольку характерное расстояние между галактиками отвечает 1 МПК , то формула (11) предсказывает очень малую величину положительного ускорения при адекватной величине скорости разбегания галактик (см. таблицу).

Зависимость скорости и ускорения разбегания галактик от расстояния между ними

$r, \text{ МПК}$	1	2	3	4
$v, \text{ км}/\text{с}$	75	150	225	300
$w, 10^{-19} \text{ км}/\text{с}^2$	0,4	1,5	3,4	6,0

5. Дискуссия. В соответствии с представленными выше результатами модель шара, однородно заполненного фотонным газом, дает адекватные (по крайней мере на качественном уровне) результаты для скорости изменения

температуры нашей Вселенной и ускорения разбегания галактик. Малость последнего и является причиной того, что его положительность была открыта астрономами лишь в конце 90-х гг. прошлого столетия. Результаты, показывающие, что $dT/dt < 0$, а $a = d^2R/dt^2 > 0$, свидетельствуют, очевидно, о правоте Р. Клаузиуса, предсказавшего тепловую смерть Вселенной ($T \rightarrow 0$ К при $t \rightarrow \infty$). Этот вывод вполне резонен даже с философской точки зрения. Следует, однако, отметить, что в нашей модели производство энтропии не учитывается. Таким образом, при точном выполнении равенства $deS = 0$ (отсутствие потока энтропии) исследованная модель отвечает изэнтропической Вселенной и отрицательность производной dT/dt не обуславливается ростом энтропии, как это предполагал Р. Клаузиус.

6. Заключение. Таким образом, эволюция Вселенной как сферы, однородно заполненной фотонным газом, адекватно отвечает эволюции нашей Вселенной. В частности, предложенная модель предсказывает понижение температуры Вселенной с течением времени и положительное ускорение расширения.

Литература

1. Спасский Б.И. История физики. М.: Высшая школа, 1977. Т. 1.
2. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Структура и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
3. Фридман А.А. О кривизне пространства // УФН. 1963. Т. 80, вып. 3. С. 439-446.
4. Фридман А.А. О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной // УФН. 1963. Т. 80, вып. 3. С. 447-452.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука. 1973. С. 458.
6. Эйнштейн А. Замечания к работе А. Фридмана «О кривизне пространства». // УФН. 1963. Т. 80, вып. 3. С. 451.
7. Эйнштейн А. К работе А. Фридмана «О кривизне пространства» // УФН. 1963. Т. 80, вып. 3. С. 451.
8. Зельдович Я.Б. Теория расширяющейся Вселенной, созданная А.А. Фридманом // УФН. 1963. Т. 80, вып. 3. С. 357-390.
9. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1987.
10. Шкловский И.С. Звезды. М.: Наука, 1984.
11. Glanz J. Cosmic Motion Revealed // Science. 1998. V. 282, No. 5398. P. 2156-2157.
12. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1975.
13. Паули В. Теория относительности. М.: Наука, 1983. С. 190-199.
14. Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология. М.: Наука, 1974.
15. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Наука, 1975.
16. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и физическая кинетика. М.: Наука, 1983.