

Термодинамический подход в космологии

Ихлов Б. Л.
Ikhlov B. L.

Введение

Напрямую соединить теорию случайных процессов, теорию информации и релятивизм затруднительно, естественным соединяющим звеном является своего рода «термодинамический дискурс».

На сегодняшний момент подробно разработана теория горячей Вселенной, где значительное место занимают физическая кинетика, термодинамический и статистический подход с функциями распределения, уравнениями состояния вещества и т.д.

Однако в теме термодинамики в теории гравитации и, соответственно, в космологии, существуют две проблемы: 1) адекватность термодинамики для Вселенной в целом, 2) формулирование термодинамики в ковариантном виде для локальных систем.

Термодинамическая система — это система многих частиц, которые делятся на группы тождественных частиц (атомов или молекул). Эти частицы постоянно сталкиваются между собой, что позволяет ввести длину свободного пробега и средний квадрат скорости. Термодинамика твердых тел базируется на наличии нескольких типов тождественных многих частиц, колеблющихся около положения равновесия. Термодинамика жидкостей, в том числе плазмы, подразумевает наличие таких связей, как уравнение непрерывности, уравнения теплопереноса и т.д.

Для системы или двух, тех, соприкасающихся систем можно вести понятия равновесия, термостата и температуры.

Во Вселенной же нет столкновений в термодинамическом смысле. Одна часть пространства заполнена галактиками, массы которых колеблются от порядка 10^1 до порядка 10^3 млрд. солнечных масс. Всего порядка звезд в видимой части (в нашей галактике — 10^{11} звезд), порядка 10^{11} галактик. Галактики сцепляются в скопления, 90% галактик — в скоплениях.

Из них 10^7 — сверхскопления из тысяч галактик, — галактические группы, — гигантские галактики, — карликовые галактики, и это лишь малая часть, т.к. 9/10 галактик от нас скрыто.

Сверхскопления образуют цепочки, например, цепочка Маркаряна.

Другие части Вселенной, войды, размером в сотни Мпк — пусты. Цепочки и войды иногда образуют так называемые стены, например, Великая стена Слоуна. Великая стена CfA2, находящаяся от нас на расстоянии 200 млн световых лет, имеет толщину 15 млн световых лет и протяженность порядка 500 млн световых лет. Стена «Громадная группа квазаров» имеет размер 4 млрд. световых лет, Великая стена Геркулес — Северная корона — 10 млрд. световых лет.

Наконец, предполагают существование еще не обнаруженного Великого Аттрактора, кластера множества сверхскоплений, притягивающего вещество нашего сектора Вселенной.

Часть Вселенной — барионная материя, 5%, часть — темная энергия, 75%, часть — темная материя, 20%. Вселенная заполнена протонами, электронами, водородом, гелием, реликтовым излучением, излучением звезд, астероидами. 60% барионной материи — в межгалактическом пространстве, недавно там обнаружены нити плотного газа из высоко ионизированных атомов кислорода при температуре 60 млн градусов, которые составляют 30% всей барионной материи [1].

Недавно обнаружилось, что число галактик ранее недооценивали в 10–20 раз, т.к. неверно определяли скорость образования галактик в ранней Вселенной. Есть отдельные холодные и тёплые облака, окружённые более горячим газом, а также реликтовые черные дыры.

Предполагается, что в масштабах порядка 300 Мпк Вселенная практически однородна и представляет собой совокупность нитевидных скоплений галактик, между которыми — войды.

То есть, по своей консистенции Вселенная не является термодинамической системой. Вселенная напоминает биомассу океана, где микроорганизмы — межзвездный газ, атоллы — звездные скопления, но без воды.

Внутри себя Галактики — бесстолкновительны. То есть, говорить даже о термодинамике внутри галактик — затруднительно. Чаше соударяются сами галактики. Если исходить из частоты соударений молекул в газе, частота соударений галактик порядка 10^{-14} в год, реально — на два порядка меньше. Кроме того, столкновения галактик не носят характер соударений между молекулами, в случае их слияния (мерджинга) в них активизируется процесс звездообразования. Следовательно, и термодинамика галактик — под вопросом.

Во Вселенной нет локального термодинамического равновесия, невозможно ввести понятия равновесия в целом, термостата в целом, следовательно, и температуры. Можно говорить лишь о термодинамике электронов, спектр их энергий описывается распределением Максвелла, о термодинамике реликтового излучения (уравнение Стефана-Больцмана), о термодинамике облаков газа, для которых можно записать 1-е начало термодинамики.

Приведем определение: вечный двигатель второго рода — неограниченно долго действующая машина, которая, будучи пущена в ход, превращала бы в работу всё тепло, извлекаемое из окружающих тел. Невозможность осуществления вечного двигателя второго рода постулируется в термодинамике в качестве одной из эквивалентных формулировок второго начала термодинамики: во всех необратимых процессах энтропия изолированной системы неизменно возрастает: $dS > 0$.

Вселенная, являясь изолированной системой, не обменивается теплом, поэтому $\delta Q = 0$, следовательно, $dS = 0$ и $S = const$. Адиабатический процесс, при котором $dS = 0$, обратим. Кроме того, в отличие от расширения газа в пустоту, в случае расширения Вселенной пустота отсутствует, Вселенная еще должна каждый момент расширения порождать пустое пространство вокруг себя. Что показывает, что представления о невозможности вечного двигателя 2-го рода ограничены локальными системами. (В [2, с. 64, 119] сформулирован закон сохранения энтропии в сопутствующей, т.е. расширяющейся системе $sa^3 = const$, где s — плотность энтропии, которая падает с увеличением радиуса a . Что подтверждает вывод о сохранении энтропии в объеме всей Вселенной. Это, казалось бы, подтверждает справедливость предыдущего утверждения. Однако в [2] указывают, что это ковариантный закон. Но дело в том, что S является аддитивной величиной, поэтому данное соотношение справедливо для любых расширяющихся изолированных систем.)

Введение только классического гравитационного поля нарушает 2-й закон термодинамики (в известной задаче о нагреве двух шаров, на подставке и на нити, см. [3]. Закон можно спасти, как это и предлагается в [4], путем введения энергию шаров в гравитационном поле Земли во внутреннюю энергию.

Следовательно, в общем виде внутренняя энергия

$$U \rightarrow U + \frac{1}{2} \int \rho \phi dV$$

Где ρ — плотность, φ — потенциал внешнего гравитационного поля. Тогда можно записать видоизмененный 1-й закон термодинамики:

$$\delta Q = d\left(U + \frac{1}{2} \int \rho \varphi dV\right) + \delta A$$

Однако, поскольку хаббловское расширение совершает работу против гравитационных сил, и, поскольку внешние источники расширения отсутствуют, Вселенная представляет собой вечный двигатель 1-го рода.

В струнной М-теории, в модели пульсирующей Вселенной и в модели Линде-Старобинского Вселенная — тоже вечный двигатель.

Кроме того, как многократно отмечалось в литературе, если говорить о сингулярном состоянии в момент рождения Вселенной, температура и плотность не могут быть одновременно бесконечными, т.к. при бесконечной плотности энтропия стремится к нулю, чего при бесконечной температуре не может быть. Но и в планковском масштабе при высокой температуре энтропия — исчезающе малая величина.

На планковском масштаб пространство-время не является определенным, позволить процедуру усреднения, поэтому, казалось бы, ввести температуру не представляется возможным. Но, хотя в фазе Великого объединения спонтанного нарушения общей калибровочной группы до электромагнитного (1)-сектора еще не произошло, излучение возникает уже в начале планковской эпохи, что и позволяет говорить о планковской температуре как некоей предельной.

Еще одно затруднение в том, что 1-й закон термодинамики — не эволюционный, он фиксирует только начальное и конечное состояние, потому не может быть записан в ковариантном виде.

Соответственно, и определение энтропии в форме Шеннона тоже приложимо в теории гравитации лишь локально.

Наконец, в общей теории относительности (ОТО) нет понятий термостата и равновесия.

Межзвездное пространство

В межпланетном пространстве содержится около 10 молекул водорода и гелия на 1 см³; в межзвездном пространстве содержится около 1 молекулы в 1 см³; в межгалактическом пространстве содержится 10⁻⁶ молекул в 1 см³. По количеству частиц с ненулевой массой покоя космические лучи на 92% состоят из протонов, на 6% — из ядер гелия, около 1% составляют более тяжелые элементы, и около 1% приходится на электроны.

Плотность энергии реликтового излучения составляет 0,25 эВ/см³ (4·10⁻¹⁴ Дж/м³) или 400-500 фотонов/см³. К нему добавляется электромагнитный диффузный фон и нейтрино от сверхновых, наконец, фотоны видимого спектра.

Энергетический спектр космических лучей на 43% состоит из энергии протонов, на 23% — из энергии альфа-частиц и 34% из энергии, переносимой остальными частицами.

Температура смеси газов должна определиться по формулам:

$$T = \sum_i \frac{p_i V_i}{C_{pi} / C_{vi} - 1} \left(\sum_j \frac{T_j p_j V_j}{C_{pj} / C_{vj} - 1} \right)^{-1} \text{ или } T = \sum_{i \neq j} \rho_i T_j \left(\sum_k \rho_k \right)^{-1}$$

$$T = \frac{\sum_i (T_i m_i^{-1})}{\sum_k m_k^{-1}} \quad \text{или} \quad T = \overline{m_i / T_i} \cdot \overline{m_k}$$

где \overline{x} — среднее гармоническое величин x . Между тем температура межзвездного пространства — 4 К, в то время как температура реликтового излучения — 2,7 К, т.е. за миллиарды лет равновесие так и не установилось (см. также [5, с. 150-151]).

Охлаждение Вселенной

В популярных лекциях (например, А. Линде) принято указывать, что внутренняя энергия Вселенной убывает по закону $dU = -pdV$, где V — объем вселенной, если таковой может быть, p — давление, оно постоянно. Соответственно, при увеличении объема внутренняя энергия и температура убывают. Однако утверждение о постоянстве давления — ошибка, расширение Вселенной — адиабатический процесс, когда система не отдает теплоту и не получает ее извне.

При адиабатическом расширении идеального газа $pV^z = k$, где k — константа. Обозначим $z = C_p / C_v$. То есть, при увеличении объема давление уменьшается. Соответственно, уравнение имеет вид:

$$dU = -kV^{-z} dV$$

Отсюда снижение внутренней энергии при расширении имеет несколько иной характер:

$$U = -kV^{1-z} / (1-z) + c_1$$

Поскольку гравитационные силы на много порядков слабее ван-дер-ваальсовых, можно представить Вселенную как идеальный газ.

Однако дело в том, что если представить содержимое Вселенной как идеальный газ, то его внутренняя энергия при расширении не зависит от объема, как было показано Джоулем еще в 1845 году.

В реальном газе

$$(V - b)(p + a / V^2) = \nu RT$$

Постоянные Ван-дер-Ваальса a и b учитывают притяжение между молекулами на больших расстояниях (постоянная a) и сильное отталкивание на малых (постоянная b). Это отталкивание делает недоступным внутреннее пространство молекулы для остальных молекул и уменьшает общий свободный объем.

Поскольку во вселенной проникновение во внутреннее пространства не грозит, то постоянную можно смело положить равной нулю:

$$V(p + a / V^2) = \nu RT$$

Причем постоянная a перестает быть постоянной: $a = 1/r^2$, $a \rightarrow a'$, и

$$V(p + a' / r^2 V^2) = \nu RT$$

где r — радиус Вселенной, ν — число молей, a' — новая константа.

Оценим скорость изменения температуры Вселенной.

В реальном газе при расширении в пустоту среднее расстояние между молекулами увеличивается, силы притяжения совершают отрицательную работу, и потенциальная энергия увеличивается. Поскольку полная внутренняя энергия остается постоянной, кинетическая энергия молекул, а значит, и температура газа, уменьшаются.

Во Вселенной роль сил Ван-дер-Ваальса играют силы гравитации, причем исключительно на «поверхности», т.к. «внутри» Вселенной сумма гравитационных сил в точке равна нулю в приближении ньютоновской механики и не равна нулю лишь в ОТО. Однако говорить о снижении кинетической энергии элементов, составляющих Вселенную, затруднительно. Это, во-первых, галактики, которые в выделенной системе отсчета не только не снижают свои скорости, но при удалении от точки отсчета их увеличивают.

Можно говорить о межзвездной пыли, реликтовом излучении, электронах, протонах, ядрах гелия, излучении звезд, температура всего этого содержимого, действительно, теряет температуру, несмотря на продолжающийся процесс звездообразования.

Можно представить давление в уравнении Ван-дер-Ваальса как внутреннее давление, определяемое законом Хаббла. Если представить Вселенную в виде шара, вся масса которого в центре, то в классическом случае и приближенно работа, совершаемая при расширении Вселенной:

$$dA = \int_s \rho \left(\frac{GM}{r^2} + H\dot{r} \right) dr ds$$

(Если массу «размазать» равномерно по Вселенной, то получим для средней плотности величину порядка 10^{-31} г/см³. По другой версии считается, что в галактиках должно быть много невидимого вещества, иначе нельзя понять, почему некоторые галактики группируются в системы со спутниками. Если такая точка зрения правильна, то оценка средней плотности вещества увеличивается до 10^{-30} г/см³, т. е. до — 1 нуклон/м³).

Примем среднее расстояние между галактиками 2 (по другим данным — 0,7 Мпк). Примем среднюю массу галактики за 300 млрд. солнечных масс: $m = 2 \cdot 3 \cdot 10^{11} \cdot 10^{30} = 6 \cdot 10^{41}$ кг.

В одном квадрате $2 \cdot 2 \text{ Мпк}$ содержится одна галактика. Радиус Вселенной — 78 млрд. световых лет, или 10^{16} м \times $78 \times 10^9 = 7,4 \times 10^{26}$ м. Площадь одного квадрата $s = 0,36 \cdot 10^{34} \text{ м}^2$.

$1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{16} \text{ м}$. Итого поверхностная плотность $\rho = 1,6 \cdot 10^6 \text{ кг} / \text{м}^2$, что на 9 порядков меньше,

чем в Млечном пути. Площадь сферы $S = 4\pi R^2 = 0,68 \cdot 10^{54} \text{ м}^2$.

Тогда, если считать галактики точечными

$$dA \sim 10^{60} \text{ кг} \left(\frac{GM}{r^2} + H\dot{r} \right) dr \text{ и } A \sim 10^{60} \left[GM \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0} \right) + H \int_{t_0}^{t_1} \dot{r}^2 dt \right]$$

Используем еще раз закон Хаббла:

$$A \sim 10^{60} \left[GM \left(\frac{e^{-Ht_1} - e^{-Ht_0}}{r_0} \right) + \frac{r_0^2 H}{2} (e^{2Ht_1} - e^{2Ht_0}) \right]$$

где r — константа интегрирования. Если сегодняшний момент времени принять за точку отсчета $t = 0$ и r_0 — современный радиус Вселенной, то

$$A \sim 10^{60} (-GM/R + R^2 H e^{2Ht} / 2)$$

При больших t работа определяется хаббловским вкладом, что было ясно с самого начала, и, поскольку в адиабатическом процессе

$$dA = -v C_v dT,$$

то очевидно, что, в виду множителя 10^{60} температура Вселенной почти мгновенно должна упасть практически до нуля, что не наблюдается. Если за исходную принять поверхностную плотность в Млечном пути, порядка 70 масс Солнца на квадратный парсек [6, с. 462.], то множитель еще больше увеличится, до 10^{69} . Таким образом, термодинамический подход не применим ко Вселенной как к целому.

Релятивистская температура

В подходе Планка-Эйнштейна система будет холоднее с точки зрения наблюдателя, движущегося относительно нее, а поток тепла будет меньше, $T = T_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$.

В подходе Отта законы преобразования обратны. Если за δQ принять полную переданную энергию, то

$$T = T_0 (1 - v^2 / c^2)^{-1/2}.$$

Тогда для движущегося наблюдателя система горячее, а тепловой поток больше: $\delta Q_v = dE = \delta Q_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$

Утверждается, что разночтения связаны это с произволом в определении количества теплоты. Передаваемую теплоту в СТО можно определить либо при постоянном импульсе (как предложили Планк и Эйнштейн), либо при постоянной скорости. Ландсберг полагал, что температуру следует считать лоренцевым инвариантом, тогда как для переданного тепла остается верным старое планковское преобразование. Де Бройль в данном вопросе исходил из того, что давление не существует внутри системы, а лишь, на границе, Мёллер предположил, что в 1-е и 2-е начало термодинамики входит разная теплота. Ван-Кампен предложил схему с инвариантной температурой и инвариантным потоком тепла. Балеску показал, что существует целый класс преобразований, который не противоречит обобщению термодинамики в рамках специальной теории относительности [7]. Авторы вывели, что температура и прочие интенсивные параметры — лоренц-инвариантны. В планковской же релятивистской термодинамике молярный объем становится интенсивным параметром, а давление — экстенсивным.

Появляются новые работы, где объем лоренц-инвариантен, но экстенсивен [4].

Толмен следует Планку и Эйнштейну и аргументирует следующим образом: в СТО импульс может меняться и при постоянной скорости, если изменяется энергия системы, а следовательно, должна существовать внешняя сила, которая производит работу и поддерживает постоянную скорость.

релятивистской поправкой

$$dA = pdV - \frac{u^2}{c^2} d(U + pV)$$

где u — скорость движения относительно наблюдателя [8, с. 163].

Передача энергии от одной системы к другой связана с изменением импульса и массы.

Количество тепла определяется как количество энергии за вычетом работы $c \frac{v^2}{c^2} dp$ (— импульс). В системе покоя при постоянном объеме $dE_0 = \delta Q_0$. В движущейся системе координат [там же, с. 165]:

$$dE = \frac{\delta Q_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad dp = \frac{1}{c} \frac{v^2}{c^2} \frac{\delta Q_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\text{И } dQ_p = dE - c \frac{v^2}{c^2} dp = \sqrt{1 - v^2/c^2} \delta Q_0$$

Далее Толмен переходит к общей теории относительности и логично утверждает, что и теплота, и температура являются скалярами и потому их значения никак не связаны с системой отсчета. Однако далее он после некоторых вычислений приходит к выводу, что инвариантом является отношение

$$\delta QT = \delta Q_0 / T_0$$

[там же, с. 304, 306]. Тем не менее, несмотря на то, что температура — скаляр, Толмен вычисляет распределение температур в гравитирующей жидкой сфере в состоянии равновесия — при перемещении в радиальном направлении, [там же, с. 320]. Кроме того, Толмен указывает на релятивистский 1-й закон термодинамики, но он так и не сформулирован.

Но такого не может быть, чтобы температура, например, удаляющихся звезд определялась тремя разными способами, становятся ли в СТО они теплее, холоднее или не меняют температуру при преобразованиях Лоренца, это мгновенно бы сказалось на их спектрах. Отметим, что, например, в [9, 10] релятивистская термодинамика не упоминается.

Дело в том, что в СТО кинетическая энергия определяется как разность полной энергии и энергии покоя:

$$E_k = E_{\text{полн}} - mc^2$$

В системе покоящихся частиц температура равна нулю, а энергия покоя — нет. Следовательно, вычитать нужно не таинственную работу внешних сил, а энергию покоя, которая к термодинамике не имеет отношения. Можно показать, что в СТО преобразования координат сохраняют усредненный импульс. Температура же является экстенсивной величиной и определяется в точке через усредненный по малому элементу системы квадрат скорости частиц, например:

$$m \overline{v^2} = 3kT$$

При преобразованиях Галилея сохраняется усредненный квадрат скорости, сохраняется

и квадрат проекции скорости на вектор скорости движущейся системы, поскольку температура не меняется:

$$\overline{v_u^2} = \overline{(v_u' + u)^2} = \overline{v_u'^2}$$

То есть: постоянная скорость при усреднении отбрасывается.

В СТО скорость преобразуются следующим образом:

$$v_u = \frac{v_u' + u}{1 + uv_u' / c^2}$$

При $v_u \ll u$ соотношение сводится к виду:

$$v_u = v_u'(1 - u^2 / c^2) + u$$

при усреднении, поскольку постоянная скорость системы отбрасывается, получим

$$T = T'(1 - u^2 / c^2)^2$$

То есть, температура в движущейся системе для покоящегося наблюдателя будет меньше, чем в сопутствующей. В ультрарелятивистском пределе, но при малых u соотношение сохраняется. Таким образом, уравнение, например, Клапейрона-Менделеева не является Лоренц-инвариантом.

Первое начало термодинамики

1. Запишем первое начало термодинамики:

$$\delta Q = dU - \delta W$$

где δQ — теплота, dU — внутренняя энергия, δW — работа, в равновесных процессах

$$W = -PdV$$

P — давление, V — объем; в неравновесных процессах δW тоже не является дифференциалом. Это линейная дифференциальная форма Пфаффа для двух независимых переменных. Для данной пфаффовой формы условие интегрируемости Эйлера не выполняется, то есть, δQ — функционал, а не полный дифференциал несуществующей функции $Q(U, W)$. Приращения работы и теплоты не являются полными дифференциалами, их бесконечно малые приращения не могут быть представлены в виде суммы бесконечно малых приращений аргументов с коэффициентами, точнее, в виде суммы попарных произведений частных производных на дифференциалы соответствующих переменных.

Второе начало термодинамики постулирует, что пфаффова форма δQ при любом числе переменных всегда голономна и, следовательно, для любой закрытой термодинамической системы существуют энтропия.

Неравновесная термодинамика, исходя из постулата локального равновесия, бездоказательно переносит определение энтропии, данное для равновесия, на неравновесные состояния.

Очевидно, что указанные выше постулаты и определения могут быть отменены в ОТО. Уравнения, описывающие систему в ОТО, не обязаны быть голономными, следовательно, энтропия

в них не определена, говорить о ее возрастании бессмысленно. В космологическом смысле это может означать либо усиление диссипативных процессов во Вселенной, либо, наоборот, некие ограничения диссипации.

Но еще до решения вопроса о неголономности пфаффовых форм в ОТО в рамках расширенной необратимой термодинамики, в которой нет локального равновесия, можно говорить об ограничениях 2-го начала термодинамики. Если в космологических моделях учесть вклад вакуума, то 2-й закон термодинамики $\partial S / \partial t \geq 0$ выполняется, если и только если не нарушается энергодоминантность [11]. Однако мы знаем, что нарушение энергодоминантности в полевых моделях — не редкость [12]. Таким образом, учет вакуумных поправок заставляет переосмыслить классическое понимание закона сохранения.

2. Хотя, как указывалось, различные авторы придерживаются разных взглядов на определению температуры, связанной с движущимся телом [13], если ввести лоренц-инвариантную температуру, можно придать второму началу термодинамики $dQ = TdS$, где энтропия — инвариант, релятивистскую форму. Ввести 4-скорость и записать первое начало термодинамики следующим образом:

$$\delta Q = dU - \delta W = dU - pdV + u\delta p$$

Где — внутренняя энергия, — работа внешних сил, — давление, — объем.

В общем случае в уравнение входят обобщенные внешние силы и химический потенциал μ и изменение числа частиц N . Поскольку границы влияют на систему, наиболее естественной независимой переменной является давление p , в связи с чем в качестве [термодинамического потенциала](#) удобно брать энтальпию. Для такой системы «обычная» энтальпия и импульс системы \vec{g} образуют 4-вектор и за определение инвариантной энтальпии, одинаковой во всех системах отсчёта, берётся инвариантная функция этого 4-вектора:

$$H = \sqrt{(U + pV)^2 - c^2 \vec{g}^2}$$

Введем

$$\gamma = \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Основное уравнение релятивистской термодинамики записывается (см. [14]) через дифференциал инвариантной энтальпии следующим образом:

$$dH = TdS + Vdp / \gamma + \mu dN$$

Поскольку объем преобразуется как $V = \gamma V'$, из уравнения Клапейрона-Менделеева следует, что давление преобразуется следующим образом: $p = \gamma^3 p'$. Тогда из 1-го начала термодинамики следует, что теплота и внутренняя энергия преобразуются так же, как

и температура: $Q = \gamma^4 Q'$ и $U = \gamma^4 U'$.

Поскольку $\mu = \gamma^4 \mu'$ — инвариант, то

Функция распределения

Для формулировки релятивистских кинетических уравнений [15], релятивистских уравнений сплошной среды с температурой [16], в подходе Гиббонса и Хокинга для описания черных дыр использовался классический канонический ансамбль Гиббса.

Но дело еще и в том, что второй закон термодинамики, закон возрастания энтропии, не меняется в классическом гравитационном поле, например, на Земле, потому, что в его основе лежит симметрия евклидова пространства. Законы физики эквивалентны относительно преобразований группы Галилея в евклидовом пространстве, в пространстве Минковского — относительно группы Лоренца. Но сильно искривленные пространства описываются иными группами симметрии, группой Бонди-Метцнера-Сакса и др. То есть, теория вероятности в ОТО — другая, в ней распределения Гаусса (нормальное распределение Пирсона типа IX), Коши, Фишера, логнормального, Пуассона — не симметричны.

В [2, с. 112] распределения Бозе и Ферми получают, исходя из классической функции распределения с релятивистским аргументом. Однако очевидно, что при преобразованиях Лоренца, если распределение случайной величины — вдоль вектора скорости системы отсчета, смещается математическое ожидание

$$M = (M' + ut) / \gamma$$

и в формуле для плотности вероятности

$$f(x) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp[-(x - M)^2 / 2\sigma^2]$$

уменьшается дисперсия σ

$$f(x) = (\gamma\sigma'\sqrt{2\pi})^{-1} \exp[-(x' - M')^2 / 2\gamma^2\sigma'^2]$$

Следовательно, сама плотность вероятности при переходе в движущуюся систему координат преобразуется сложным образом.

Аналогично преобразуется и формула Шеннона для энтропии.

Заключение.

Таким образом, функции распределения не могут быть использованы для Вселенной как целого. Система найденных элементов релятивистской термодинамики может позволить сделать шаг к ее ковариантной формулировке для локальных систем и к релятивистской корректировке спутниковых коммуникаций на границах Солнечной системы.

Литература

1. Nicastro F, Kaastra J., Krongold Y. et al. Observations of the missing baryons in the warm—hot intergalactic medium // Nature. — 2018. — Vol. 558. — P. 406–409. DOI <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0204-1>
2. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М.: ЛКИ, 2008. 552 с.
3. Palma G., Normale S., Sormani M. C., Peierls R. Counterintuitive effect of gravity on the heat capacity of a metal sphere: re-examination of a well-known problem.

-
4. <https://arxiv.org/pdf/1502.01337.pdf>
 5. Даныльченко П. Релятивистская термодинамика с лоренц-инвариантным экстенсивным объемом. Винница: ГНПП «Геосистема», 2006. 8 с.
 6. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975. 736 с.
 7. Фридман А. В., Хоперсков А. М. Физика галактических дисков. М.: Физматлит, 2011. 640 с.
 8. Каллен Г., Горвиц Дж. Релятивистская термодинамика // УФН. — 1972. — Т. 107. — вып. 3. — С. 489–502
 9. Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология. М.: Наука, 1974. 520 с.
 10. Воронцов-Вельяминов Б. А. Внегалактическая астрономия. М.: Наука, 1978. 480 с.
 11. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1981. 504 с.
 12. Жоу Д., Касас-Баскес Х., Лебон. Расширенная необратимая термодинамика. М: Институт компьютерных исследований, 2006. 528 с.
 13. Ихлов Б. Л. Хиггсовский вакуум в калибровочной теории гравитации: Автореф. дисс. канд. физ. мат. наук, М., 1988. 14 с.
 14. Шмутцер Э. Симметрии и законы сохранения в физике». М.: Мир, 1974. 159 с.
 15. Болгарский А. В., Мухачев Г. А., Щукин В. К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 495 с.
 16. Де Гроот С., ван Леувен В., ван Верт Х. «Релятивистская кинетическая теория». М.: Мир, 1983. 424 с.
 17. Черный Л. Т. Релятивистские модели сплошных сред. М.: Наука, 1983.