

ФИЗИКА МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА

Борис Ихлов

Введение

Возможности использовать термодинамический подход ко Вселенной наталкиваются на известные трудности. 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, трех, n соприкасающихся систем можно вести понятия равновесия, термостата и температуры.

Во Вселенной нет столкновений в термодинамическом смысле. Часть пространства заполнена галактиками, массы которых колеблются от 10^1 млрд. до 10^3 млрд. солнечных масс. Всего порядка $3 \cdot 10^{22}$ 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, $2,5 \cdot 10^{10}$ – галактические группы, $3,5 \cdot 10^{11}$ – гигантские галактики, $0,7 \cdot 10^{13}$ – карликовые галактики, и это лишь малая часть, т.к. 9/10 галактик от нас скрыто. Число астероидов не поддается учету.

Сверхскопления и отдельные галактики образуют цепочки (галактические нити, филоменты), например, цепочка Маркаряна – крупнейшие структуры во Вселенной, со средней длиной 60-80 Мпк. Филоменты заполнены очень горячим (миллионы и десятки миллионов градусов) и очень разреженным (1-10 атомов на m^3) газом. По стандартной модели эволюции Вселенной галактические нити формируются и следуют вдоль сетевидных потоков тёмной материи. Другие части Вселенной, войды, размером в сотни Мпк – пусты. Цепочки располагаются между войдами. 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, к которому Млечный Путь стремится со скоростью 400 км/с.

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.

В направлении созвездия Эридана находится холодное пятно, на 70 мкК холоднее среднего значения температуры реликтового излучения (больше, чем среднеквадратичное отклонение реликтового

излучения 18 мкК). Его диаметр около 10 угловых градусов, предполагается, что это супервояд диаметром около 150-500 Мпс, который находится в 2-3 Гпс от Земли.

Внутри себя Галактики почти бесстолкновительны. То есть, использовать законы термодинамики внутри галактик – затруднительно. Чаще соударяются сами галактики. Если исходить из частоты соударений молекул в газе, частота соударений галактик порядка 10^{-14} в год, реально – на два порядке меньше. Кроме того, столкновения галактик не носят характер соударений между молекулами, в случае их слияния (мерджинга) в них активизируется процесс звездообразования. Следовательно, стандартная термодинамика к системам галактик неприменима.

Часть Вселенной – обычное вещество, 5%, из которого масса нейтрино – 0,1-3%, часть – темная энергия, 70-75%, часть – темная материя, 25-20%. Темная энергия не может участвовать в термодинамических процессах во Вселенной.

Масса межзвездного газа, включая излучение, составляет 99% всего обычного вещества во Вселенной (по другим данным – всего несколько процентов), 60% барионной материи – в межгалактическом пространстве.

Пыль – 1% от массы газа, на реликтовое излучение приходятся сотые доли общей массы вещества.

Межзвездный газ состоит из протонов, электронов, водорода, гелия, из их ионов, из излучения звезд. Именно эту часть, несмотря на отсутствие механизма теплопроводности, можно в некоторых задачах рассматривать как термодинамическую систему.

Состав межзвездного газа

Во Вселенной нет локального термодинамического равновесия, невозможно ввести понятие равновесия в целом, поскольку нет термостата, следовательно, нельзя ввести такой интенсивный параметр, как температура. Можно говорить лишь о термодинамике, например, электронов, спектр их энергий описывается распределением Максвелла, о термодинамике реликтового излучения (уравнение Стефана-Больцмана), о распределении по скоростям Больцмана, о термодинамике облаков газа, для которых можно записать 1-е начало термодинамики.

По количеству частиц с ненулевой массой покоя космические лучи на 92% состоят из протонов, на 6% - из ядер гелия, около 0,1% - 1% числа атомов составляют O, C, N, Ne, S, Ar, Fe, и около 1% приходится на электроны. Кроме того - алифатические углеродные соединения, соединения жирного ряда, подобные смолам, образующиеся у некоторых звезд. Считают, что 30% межзвездного углерода, наполняющего космическое пространство, может состоять именно из этих жиров. Кроме того, микрометеориты от 1 до 180 мкм (космическая пыль) – 1% массы межзвездного газа, плюс нейтрино от сверхновых и реликтовое излучение, плотность которого составляет порядка 10^{-34} г/см³ (0,25 эВ/см³ или $4 \cdot 10^{-14}$ Дж/м³ или 400-500 фотонов/см³), что на 4 порядка меньше оценок плотности вещества во Вселенной, электромагнитный диффузный фон, фотоны видимого спектра, рентгеновские лучи и гамма-кванты. Некоторые галактики, например, Млечный Путь, испускают гамма-кванты в виде пузырей.

По энергиям космические лучи на 43% состоит из энергии протонов, на 23% — из энергии альфа-частиц и 34% из энергии, переносимой остальными частицами.

В межпланетном пространстве содержится около 10 молекул водорода и гелия на 1 см^3 ; в межгалактическом пространстве содержится 10^{-6} молекул в 1 см^3 .

По другим данным средняя плотность межзвездной среды – менее 1 атома вещества на 1 см^3 [1, 2].

Таким образом, длина свободного пробега $l = 1/n\sigma$, где n – концентрация частиц, а σ – эффективное сечение, крайне велика, порядка 10^{12} м, а вероятность рассеяния $P = r/l$, где r – среднее расстояние между частицами, исчезающе мала. Соответственно, для сферических частиц диаметра d , в частности, для водорода или гелия, на 4 порядка не выполняется вытекающее из закона Клапейрона-Менделеева $pV = nRT$ соотношение $kT = \sqrt{2}\pi nd^2 pl$, где давление p – порядка 10^{-14} Па (газокинетическое сечение упругого рассеяния атомов или молекул на большой угол при тепловых энергиях имеет величину порядка 10^{-19} м^2).

Соотношение выполняется, если брать другие данные [3-5], согласно которым концентрации частиц межзвездного газа – $10^3/\text{см}^3$. Однако в таком случае масса межзвездной среды на 1-2 порядка превосходит оценку массы Вселенной 10^{52} кг, если ее радиус – порядка 10^{26} м.

В обычном газе модель соударений – лишь грубое приближение, например, молекула не обязательно ударяется о стенку объема, в реальности она подлетает к ней, некоторое время удерживается на ней и отлетает. При этом в среднем выполняется закон сохранения импульса. Поэтому, несмотря на крайне редкое число соударений частиц межзвездного газа, для него можно ввести температуру,

пропорциональную среднеквадратичной скорости частиц газа $T \propto \overline{mv^2}$, которые, в отличие от звезд и галактик, могут оказывать давление на стенки достаточно большого объема, наподобие звездного ветра. Температура межзвездного молекулярного газа - в диапазоне от -269 до -167°C , в межзвездных ударных волнах (см., напр., [6]) температура может превышать 1 млрд. К, в скоплениях галактик типичные температуры составляют млн. К, в коронах галактик различного возраста за 10 млрд. лет температура выросла с 200 000 К до 2 млн К. В то же время температура туманности Бумеранг в созвездии Центавра, находящегося в 5000 световых лет от Земли за счет быстрого расширения составляет лишь 1 К, ниже температуры реликтового излучения. Недавно обнаружены нити плотного газа из высоко ионизированных атомов кислорода при температуре 60 млн К, которые составляют 30% всей барионной материи [7].

Реликтовое излучение

Реликтовое излучение отделяется от вещества эпоху рекомбинации. По первым оценкам Гамова температура космического излучения - примерно 3-7 К [8]. В 1955 году Тигран Шмаонов экспериментально обнаружил шумовое СВЧ-излучение с температурой около 3 К. В 1964 А. Пензиас и Р. Вилсон открыли космический фон излучения и измерили его температуру - 3 К.

По определению смещение $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$, из закона Вина $\lambda_{\text{max}} = 0,29 / T$ получим $T = T_0(1 + z)$.

Соответственно, для удаленных галактик температура фонового излучения выше, с помощью телескопа Кека получены спектры двух квазаров с красными смещениями $z = 1.776$ и $z = 1.973$, что показывают, что они облучаются тепловым излучением с температурой $7.4 \pm 0,8$ К и $7,9 \pm 1,1$ К, что соответствует расчетным данным $T(1,776) = 7,58$ К и $T(1,973) = 8,11$ К. Казалось бы, теория Гамова подтвердилась.

Температура реликтового излучения – 2,7 К., в то время как средняя температура межзвездного газа – 4 К. Представим пространство Вселенной как сосуд, в котором между различными газами убрали перегородки. Температура смеси газов определяется по формуле:

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

Для одноатомных газов, когда сумма внутренних энергий не меняется, равновесная температура определяется из легко получаемого соотношения:

$$T = \sum_i (T_i m_i^{-1}) / \sum_k m_k^{-1}$$

или $T = \overline{m_i / T_i} \cdot \overline{m_k}$, 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. [9], также [10, с. 150-151]). Таким образом, температуры реликтового излучения и остального межзвездного газа должны были выровняться.

Обычно в числе причин отсутствия локального термодинамического равновесия указывают на то, что, например, электронная и ионная температуры межзвездного газа могут сильно отличаться друг от друга, т.к. обмен энергией при соударении происходит крайне редко. Кроме того, в межзвездной среде прямые и обратные процессы ионизации и рекомбинации имеют разную природу, и поэтому детальный баланс установиться не может. Малая оптическая толщина для жёсткого излучения и быстрых заряженных частиц приводит к тому, что энергия, выделяющаяся в какой-либо области пространства, уносится на большие расстояния, и охлаждение идёт по всему объёму сразу, а не в локальном пространстве, расширяющемся со скоростью звука в среде. Аналогично происходит и нагрев, причем механизм теплопроводности не способен передать тепло от удалённого источника.

Однако всё перечисленное не имеет отношения к балансу между реликтовым излучением и остальным межзвездным газом, который должен был бы установиться в течение более чем 13 млрд. лет.

Если температура реликтового излучения оказалась ниже, за счет указанного Зельдовичем обратного эффекта Комптона энергия реликтовых фотонов должна увеличиваться, и за миллиарды лет температура реликтового излучения должна была сравняться с температурой межзвездного вещества.

Расширение межзвездного газа

В газовых облаках у разных слоев газа температура может быть различна. Пусть n_i – число частиц i -го слоя, n_i / T_i – оптическая толщина i -го слоя, сумма оптических толщин равняется полному числу атомов, деленному на среднюю температуру, соответственно, средняя температура

$$T = \sum_i n_i \left(\sum_j n_j / T_j \right)^{-1}$$

Рассмотрим уравнение состояния межзвездной среды вне облаков и галактик. При нерелятивистских скоростях вследствие малой плотности вещества межзвездная среда является классической.

Расширение Вселенной - адиабатический процесс, система не отдает теплоту и не получает ее извне.

Обозначим отношение теплоемкостей $\gamma = C_p / C_v$. При адиабатическом расширении идеального газа

$pV^\gamma = k$, где k – константа. В идеальном газе при адиабатическом расширении температура падает в

зависимости от величины $\gamma = C_p / C_v$. Из 1-го начала термодинамики $\delta Q = c_v dT + p dV$ нетрудно получить зависимость уменьшения температуры от объема в отсутствие теплообмена: $TV^{\gamma-1} = const$.

То есть, для идеального газа при увеличении объема температура медленно уменьшается. Уравнение для внутренней энергии имеет вид: $dE = -kV^{-\gamma} dV$. Отсюда $E = -kV^{1-\gamma} / (1-\gamma) + c_1$.

Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса складывается из его кинетической энергии (энергии теплового движения молекул) и потенциальной:

$$E = c_v T - kV^{1-\gamma} / (1-\gamma) + c_1$$

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 в 1845 году. В газе Ван-дер-Ваальса $(V - b)(p + av^2 / V^2) = \nu RT$. 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 внутренние пространства не имеет места, то постоянную b можно положить равной нулю. Причем постоянная a перестает быть постоянной: $a \propto 1/r^2$, $a \rightarrow a'$, и

$$V(p + a'v^2 / V^{8/3}) = \nu RT,$$

где r – радиус Вселенной, ν - число молей, a' - новая константа. Т.е. в начальной стадии расширения, когда главную роль играет член $a' / V^{8/3}$, температура быстро падает. При больших объемах, когда 2-й член в правой части мал, температура уменьшается медленно, т.к. давление с ростом объема падает.

При адиабатическом расширении газа Ван-дер-Ваальса $dT = \frac{a}{c_v} \frac{dV}{V^2}$. Т.е. температура $T \propto V^{-1}$ падает

обратно пропорционально объему, что явно не соответствует реальности.

В более адекватной для малых давлений модели Дитеричи $pV = RT \exp(-a / RTV)$, т.е. при $b = 0$, картина приблизительно та же: поскольку взаимодействие между атомами разреженного газа мало,

можно использовать соотношение для идеального газа $pV^\gamma = const$, $T = \frac{const}{V^{\gamma-1}} \exp(a / RTV)$ и,

учитывая, что при больших объемах показатель в экспоненте стремится к нулю, видим, что температура медленно падает при увеличении объема точно так же, как в идеальном газе.

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. Медленность уменьшения обусловлена слабым взаимодействием между частицами газа. Таким образом, все части межзвездной среды крайне медленно остывают с расширением Вселенной, в том числе и реликтовое излучение, но остывают по-разному.

Термодинамика фотонного газа существенно иная, уравнение его состояния

$$pV = E/3$$

Поскольку E аддитивна, давление не зависит от объема.

Внутренняя энергия фотонного газа прямо пропорциональна объему, в то время как энергия обычного газа пропорциональна объему в степени $(1 - \gamma)$.

По-разному меняется также и плотность разных компонент среды. Поскольку $S = const$, из уравнений $dE = pdV$ и $\rho = E/V$ получаем зависимость плотности от радиуса Вселенной (или масштабного фактора) $d\rho + 3(p + \rho)dr/r = 0$; для плотности излучения $\rho \propto r^{-4}$, поскольку энергия обратно пропорциональна длине волны $E \propto 1/\lambda \propto 1/r$, для остального газа $\rho \propto r^{-3}$.

Следовательно, при расширении Вселенной у фотонного газа и остального межзвездного газа должны установиться различные температуры.

Разогрев межзвездного газа

Вследствие того, что межзвездный газ устремляется, всё ускоряясь, к галактикам и далее к их центру, происходит нагрев газа внутри галактик. Как уже указывалось, средняя температура газа в коронах галактик составляет около 2 млн К., что в 10 раз горячее, чем 10 млрд. лет назад [11].

Процесс нагрева галактик будет продолжаться до тех пор, пока не израсходован весь межзвездный газ. К этому времени температура внутри галактик может превысить температуру денатурации белка.

Теперь выберем такой период в эволюции Вселенной, когда межзвездный газ еще можно считать термодинамической системой, но плотность Вселенной уже практически постоянна, т.е. указанные 10 млрд. лет назад. При таких условиях давление, действующее на пробную массу в газе, не зависит от радиуса:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT = \frac{\rho V}{\mu} RT$$

Сила расталкивания, действующая на пробную массу, будет равна

$$F_T = a_1 T$$

Внутри массивного шара сила, действующая на пробную массу:

$$F = -m \frac{4}{3} \pi \rho G r$$

Согласно закону Хаббла результирующее ускорение $-H^2 r$. Тогда

$$T \sim (H^2 + \frac{4\pi}{3} \rho G) r$$

Т.е. в данный период средняя температура Вселенной должна возрастать – за счет генерации отрицательной массы вакуума и положительной массы обычного вещества и темной материи. На этой стадии должна была расти не только температура газа внутри галактик, но и вне галактик.

Литература

1. Бочкарев Н. Г. Основы физики межзвездной среды. М., URSS. 2020. 352 с.
2. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. М., Едиториал УРСС. 2004. 544 с.
3. А.В. Засов, К.А. Постнов. Общая астрофизика. — М.: МГУ, 2006. 576 с.

4. Dyson J., D.A. Williams. *Physics of the Interstellar Medium*, London: CRC Press, 1997. 165 p.
5. Ferriere K. *The Interstellar Environment of our Galaxy* // *Rev. of Mod. Physics*. 2001. Т. 73(4). P. 1031–1066.
6. Лихнерович А. Теория относительности и математическая физика. В сб. «Астрофизика, кванты и теория относительности», М., Мир, 1982. С. 169-203.
7. 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>
8. 11. Gamov G. A. *Physics Today*, 1950. №3(8), P. 76; Gamow G. *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Mat.-Fis. Medd.* 1953. 27 (10). 1.
9. 12. Ихлов Б. Л. Термодинамический подход в космологии. *Евразийский научный журнал*. 2019. №1. http://journalpro.ru/articles/termodinamicheskiy-podkhod-v-kosmologii/?sphrase_id=14205
10. 13. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. *Строение и эволюция Вселенной*. М.: Наука, 1975. 736 с.
11. Yi-Kuan Chiang, Ryu Makiya, Brice Ménard, Eiichiro Komatsu. The Cosmic Thermal History Probed by Sunyaev–Zeldovich Effect Tomography. *The Astrophysical Journal*. 2020. V. 902 №1, P. 56 **DOI** 10.3847/1538-4357/abb403.