© **М.Х. Шульман (shulman@dol.ru)**

# Размышления о втором начале термодинамике

(05.03.2011)

Обсуждаются некоторые вопросы, связанные с интерпретацией второго начала термодинамики.

## 1. Введение

Второе начало термодинамики относится к числу тем, над которыми задумываешься в течение всей жизни, тем более, что многим оно кажется одним самых загадочных законов природы. Ниже я останавливаюсь на некоторых важных моментах, связанных с интерпретацией энтропии.

В первой четверти 19-го века, когда господствовала теория теплорода и еще не был открыт закон сохранения энергии, гениальный француз Сади Карно выдвинул блестящую идею – сравнить тепловую машину с гидравлической. Как энергия падающей воды, преобразуемая гидравлической машиной в механическую работу, пропорциональна *перепаду высот* между ее входом и выходом, так и тепловая энергия, преобразуемая в работу тепловой машиной, пропорциональна *перепаду температур* между ее входом и выходом. Отсюда сравнительно несложно вывести знаменитое выражение для коэффициента полезного действия идеальной тепловой машины: $\eta = (1 - T_2/T_1)$, где $T_2$ – температура охладителя на выходе тепловой машины, $T_1$ – температура нагревателя на ее входе.

Развивая идеи Карно и других исследователей, Клаузиус ввел понятие энтропии и сформулировал первое и второе начало в следующем виде:

1. Энергия Вселенной остается постоянной.
2. Энтропия Вселенной стремится к максимальному значению.

Если первый закон всего лишь распространяет на теплоту свойства механической энергии, то второй закон вполне мог поставить в тупик, пока Больцман не предложил его статистическую интерпретацию на основе гипотезы о молекулярной природе материи[1]. Обычно считается, что процесс установления равновесного состояния (в ходе которого как раз и достигается максимальное значение энтропии системы) задает так называемую термодинамическую стрелу времени. Однако хочу заметить, что с моей точки зрения этот подход не вполне адекватен, поскольку упускается из виду предшествующий этап – когда неравновесие тем или иным способом *создается*.

## 2. Можно ли *всю* тепловую энергию преобразовать в механическую работу?

Начиная с Карно, все специалисты в области термодинамики отвечают на этот вопрос отрицательно, ссылаясь на вышеприведенное формальное соотношение для коэффициента полезного действия тепловой машины, т.е. (фактически) на второе начало термодинамики[2]. Я бы, однако, хотел здесь

[1] На самом деле с подходом Больцмана не все так просто, см. монографию **[Хайтун, 1996]**.

[2] Следует отметить, что второе начало термодинамики неявно базируется на предположении, что тепло всегда перетекает от горячего тела к холодному. Это предположение часто можно связать с диффузионным процессом, когда поток теплоносителей от горячего источника просто превышает встречный поток от холодного источника. Однако указанное предположение справедливо только для тел с *положительной* теплоемкостью, температура которых *понижается* при отдаче тепла.

обсудить разделение энергии движения на механическое и тепловое. Фактически речь должна идти об упорядоченном и неупорядоченном движении, причем под неупорядоченным движением понимается та его часть, которая дает суммарный нулевой перенос массы. Если мы рассматриваем молекулы как обычные шарики, то возможны два подхода к преобразованию теплоты в работу.

В первом случае *внешним* образом меняется только средняя энергия неупорядоченного движения в расчете на одну молекулу. Иначе говоря, при отборе тепла в обычной тепловой машине просто уменьшается средняя скорость теплового движения. Разумеется, если температура охладителя больше абсолютного нуля, то действительно может быть отобрана только часть исходной тепловой энергии, в полном соответствии с идеей Карно.

Однако, вообще говоря, возможна попытка вмешательства, так сказать, *изнутри* системы (например, с помощью “демона Максвелла” выполнить сортировку молекул по скоростям). Если бы речь шла не о молекулах, а о достаточно больших *макроскопических* шарах, такая схема действительно могла бы работать в течение некоторого конечного периода времени (пока результат не будет достигнут с некоторой заданной точностью). Но для газа из *реальных* молекул устройства измерения их скорости, построенные *из тех же молекул или других элементарных частиц*, потребляют, как было показано, столько же (или даже больше) энергии, сколько отбирается у носителя тепла.

## 3. Термодинамические системы с прогрессирующей эволюцией

Изучение термодинамических процессов было начато в связи с использованием тепловых машин, в которых осуществляется преобразование теплоты в работу или работы в теплоту. Под термодинамическим процессом понимают всякое изменение, происходящее в термодинамической системе и связанное с изменением хотя бы одного ее параметра состояния. Очевидно, что такие системы обмениваются энергией с другими системами и поэтому являются *открытыми* в термодинамическом смысле. Для систем такого рода целесообразно рассматривать два вида входных потоков тепла и энтропии: входные и выходные. Напомним, что приращения тепла dQ и энтропии dS связаны между собой простым соотношением $dS = dQ/T$, где T – температура системы. Поскольку мы рассматриваем открытые системы (рис. 1), то разность между входным и выходным потоками энтропии может быть, вообще говоря, и нулевой, и положительной, и отрицательной.

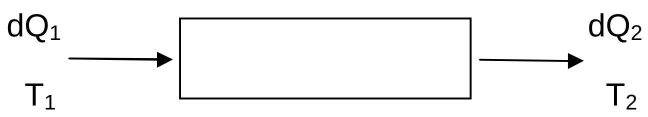


Рисунок 1. Термодинамическая система.

Системы с постоянной или нарастающей энтропией хорошо изучены в термодинамике, и мы на них останавливаться не будем. Зато огромный интерес для нас представляют системы, в которых происходит накопление *отрицательной* энтропии. Я хочу рассмотреть два примера именно таких систем.

В качестве первого замечательного примера рассмотрим систему “Солнце-Земля-Космос”. Температура поверхности Солнца, которое играет роль нагревателя, составляет около 6000 К ($T_1$), а эффективная температура Космоса (охладителя), куда Земля переизлучает полученное от Солнца тепло, не превышает 3 К ($T_2$). Заметим, что этот процесс продолжается миллиарды лет, при этом температура Земли принципиально не повышается. В такой открытой системе энтропия Земли непрерывно *понижается* (поскольку $dQ_1= dQ_2$, а $T_2<T_1$)[3].

К чему приводит понижение энтропии Земли? Очевидно, к регулярной и значительной дифференциации земных физических, химических и биологических структур, т.е., в конечном счете, к прогрессирующему развитию земной биосферы. Очевидно также, что и на огромном количестве других планет, даже несмотря на возможно менее благоприятные условия, должны с той или иной скоростью протекать сходные процессы.

Второй пример может оказаться еще более (и даже исключительно) важным. В свое время выдающийся американский физик Дж. Уилер (об этом сообщается в публикации **[Smolin, 1994]**) выдвинул гипотезу, что наша Вселенная (и иные вселенные) представляют собой черные дыры, *необратимо* расширяющиеся во времени. Я независимо (разумеется, гораздо позже, см. **[Шульман, 2004, 2007]**) пришел к той же идее, из которой следует поразительный, но неизбежный вывод: энергия нашей Вселенной не сохраняется, а неизменно возрастает за счет ее поглощения извне.

С другой стороны, несколько десятилетий назад астрофизики обнаружили, что внутри нашей Вселенной в ядрах галактик расположены сверхмассивные черные дыры, суммарная энтропия которых на 20 порядков превышает суммарную энтропию всех прочих элементов Вселенной (см. **[Egan and Lineweaver, 2009]**). Расчеты показывают, что температура поверхности (т.е. горизонта событий) этих дыр практически равна абсолютному нулю, т.е. заведомо меньше средней температуры во Вселенной. Они являются идеальными и исключительно мощными поглотителями тепла.

Таким образом, наша Вселенная, будучи черной дырой во внешнем мире и обладая внутренними черными дырами, по существу может рассматриваться как термодинамическая система, “обдуваемая” регулярным потоком энергии, в которой температура охладителя ниже температуры нагревателя. Отсюда немедленно следует, что *энтропия такой системы регулярно и неотвратимо понижается*. Термодинамическая незамкнутость нашей Вселенной радикально опровергает теорию ее тепловой смерти по Клаузиусу и оказывается в полном согласии с данными наблюдений.

### 4. Энтропия гравитирующих систем

В обзоре **[Иванов]** обсуждается проблема аддитивности энтропии[4]. Автор отмечает, что это свойство характерно для систем, в которых силы между ее частями – короткодействующие. Однако для больших астрофизических объектов, где доминируют дальнодействующие силы гравитации (например, для холодного облака межзвездной пыли), это не так:

> “… каждая частица чувствует не несколько ближайших соседей, *а всю систему целиком, все другие частицы*. И теперь, если мы мысленно разобьем облако на две части, то эти части будут взаимодействовать не по границе соприкосновения, а полностью всеми объемами.
>
> … Таким образом, в гравитирующих системах очень сильно нарушается термодинамическая аддитивность: такую систему нельзя разбить на приблизительно независимые подсистемы. Энтропия в таких системах не

---

[3] Здесь отношение ($T_1/T_2$) характеризует численное соотношение потоков энтропии.

[4] Обзор посвящен новому подходу к вычислению энтропии, предложенному в 1988 году бразильским ученым Константино Тсаллисом.

будет экстенсивной величиной. Такие системы не могут быть описаны обычной, больцмановской термодинамикой."

Между тем, для одного класса сильно гравитирующих систем – черных дыр – формула для вычисления энтропии была предложена Я. Бекенштейном (аспирантом Дж. Уилера) в 70-х годах прошлого века. Эта формула выглядит следующим образом:

$$S_{BH} = c^3A/4G\hbar$$

где $S_{BH}$ – энтропия черной дыры, c – скорость света, A – площадь поверхности горизонта событий черной дыры, G – гравитационная постоянная, ħ – постоянная Планка.

Заметим, что для *внешнего* наблюдателя черная дыра ведет себя (в частности, в отношении механических, электромагнитных и термодинамических характеристик) в точности подобно 2-мерной мембране, т.е. как объект с иной топологической характеристикой, нежели окружающее пространство. И в этом смысле аддитивность энтропии восстанавливается – только теперь мы имеем дело с аддитивностью не по объему, а по площади, из которой, собственно, только и состоит 2-мерный объект.

В упомянутом обзоре **[Иванов]** отмечается, что решение проблемы вычисления энтропии может быть получено за счет перехода к более удобному набору новых степеней свободы. Например, энтропия кристаллов не поддается вычислению на основе статистики поведения отдельных атомов, но эта задача легко решается благодаря высокой симметрии кристалла, если перейти к статистике коллективных колебаний – фононов.

В случае черной дыры аддитивность энтропии фактически достигнута с помощью похожего приема: Бекенштей перешел от элементов объема к элементам площади, поскольку именно из площади состоит черная дыра для внешнего наблюдателя.

Возникает заманчивая мысль: нельзя ли подобрать подходящий прием и для “обычного” источника тяготения, не являющегося черной дырой? Тем более, что в известной работе **[Verlinde, 2010]** был выдвинут тезис о вторичности гравитации, ее “энтропийном” происхождении. Ниже показано, что все обстоит совершенно противоположным образом, и что гравитирующей системе (любому массивному телу) неизбежно соответствует хорошо определенная энтропия.

Действительно, пусть тело с массой M создает *центрально-симметричное* поле тяготения с потенциалом $\Phi(r) \sim 1/r$ . Как известно, поле на расстоянии r от такого источника определяется только той частью массы, которая сосредоточена *внутри* сферы этого радиуса. По аналогии с тем, как это принято для горизонта ЧД, мы можем сформулировать данное утверждение несколько иначе: *поле на расстоянии r определяется эквивалентным поверхностным гравитационным зарядом* $\sigma(r) \sim 1/r^2$ *для сферы такого радиуса, причем одна и та же эквивалентная величина σ может соответствовать очень большому числу конфигураций реального распределения масс внутри сферы*. Ключевым обстоятельством здесь являет сохранение центральной симметрии, новые степени свободы – это сферические слои, которые можно (мысленно) менять местами.

Говоря иначе, для наблюдателя, связанного с пробной частицей, всегда имеется *реальная* неопределенность в распределении массы центрального источника – взаимодействие пробной частицы с источником силы просто физически не способно предоставить большей информации об этом распределении. При заданной величине этой массы неопределенность зависит от расстояния между пробной частицей и центром источника. Поскольку напряженность гравитационного поля может быть выражена через эквивалентный поверхностный гравитационный заряд, то энтропия, отвечающая поверхности соответствующей сферы, совпадет с (безразмерной, выраженной через квадрат планковской длины) площадью поверхности сферы.

Сказанное можно сформулировать и в терминах термодинамики. Как известно, приращение энергии/работы dW можно представить в виде произведения обобщенной силы на приращение обобщенной координаты. Например, это может быть произведение обычной силы (например, тяготения) на перемещение вдоль координаты ($dW=F\cdot dx$), или произведение давления (газа) на приращение объема ($dW=p\cdot dV$). Но с таким же успехом это может быть и произведение температуры (удельной энергии на единицу поверхности) на приращение площади поверхности ($dW=T\cdot dA$), так что последняя вполне может выполнять функцию энтропии (поверхность вычисляется в безразмерных единицах).

Следуя примеру Бекенштейна, рассмотрим падение пробной частицы на источник поля тяготения. Пусть пробная частица пересекает мысленную сферу определенного радиуса, окружающего источник (в данном случае – не черную дыру). Для другой пробной частицы вне этой сферы дело выглядит так, что масса источника увеличилась за счет первой пробной массы и, соответственно, увеличилось число возможных конфигураций распределения массы внутри указанной сферы. То есть первая пробная масса привносит в сферу связанную с ней энтропию, что в точности напоминает ситуацию с черной дырой.

Фактически мы приходим к формуле для энтропии черной дыры, однако это приводит к фундаментальному парадоксу, который заметил и Верлинде: если коэффициент пропорциональности в формуле одинаков, то энтропия черной дыры оказывается намного *меньше* энтропии обычного тела, поскольку его гравитационный радиус много меньше фактического. В действительности же, как отмечал Бекенштейн, энтропия черной дыры должна превышать энтропию обычного тела с той же массой (например, Солнца) на 20 порядков.

Для устранения этого парадокса представляется целесообразным ввести в коэффициент пропорциональности, связывающий площадь горизонта и энтропию произвольного массивного тела, дополнительный сомножитель вида $(\rho/\rho_{cr})$, где $\rho$ – фактическая плотность тела, $\rho_{cr}$ – “критическая” плотность сколлапсировавшего тела такой же массы. Таким образом, предлагаемая мной формула для энтропии S любого тела (в том числе и ЧД) принимает вид:

$$S = S_{BH}\cdot(\rho/\rho_{cr})$$

Таблица 1

Отношение $(\rho/\rho_{cr})$ для различных астрофизических объектов

| **Объект** | **Масса M (кг)** | **Радиус R (м)** | **Гравитационный радиус $R_G$ (м)** | $(\rho/\rho_{cr}) = (R_G/R)^3$ |
|---|---|---|---|---|
| Земля | $6\cdot10^{24}$ | $6\cdot10^{6}$ | $10^{-2}$ | $\sim 10^{-26}$ |
| Солнце | $2\cdot10^{30}$ | $7\cdot10^{8}$ | $3\cdot10^{3}$ | $\sim 10^{-16}$ |
| Млечный Путь | $3\cdot10^{42}$ | $\sim 10^{19}$ | $\sim10^{15}$ | $\sim 10^{-12}$ |
| Вселенная | $\sim 10^{53}$ | $\sim 10^{26}$ | $\sim 10^{26}$ | $\sim 1$ |

Очевидно, сомножитель $(\rho/\rho_{cr})$ эффективно увеличивает энтропию тела при его приближении к состоянию коллапса. Кроме того, он естественным образом учитывает прямую корреляцию энтропии с массой вещества, заключенной под мысленной сферой, окружающей тело, с площадью поверхности А.

Заметим, что площадь А пропорциональна квадрату радиуса сферы, а плотность ρ обратно пропорциональна (при заданной массе) кубу этого радиуса, поэтому в конечном счете энтропия S обратно пропорциональна радиусу сферы, т.е. *возрастает с уменьшением радиуса*. Отсюда следует важный результат: процесс взаимного притяжения массивных тел приводит к *увеличению их суммарной энтропии*, т.е. соответствует направлению времени, отвечающему второму началу термодинамики.

К аналогичному выводу приводят и "энергетические" соображения: предоставленная самой себе пробная частица притягивается к источнику поля тяготения, стремясь минимизировать разность гравитационных потенциалов между своим текущим положением и поверхностью источника. Если же пробная частица вращается с постоянной скоростью вокруг источника поля тяготения, то минимизируется алгебраическая сумма гравитационной и кинетической энергии, в результате чего вращение происходит по соответствующей стационарной орбите.

Известен знаменитый "предел Бекенштейна" (универсальный предел для энтропии), который в простейшем случае позволяет оценить сверху энтропию обычного массивного тела величиной энтропии черной дыры, имеющей такой же размер. Наш результат заменяет эту чрезмерно высокую оценку точным соотношением.

## Ссылки


**[Smolin, 1994]** Lee Smolin. The fate of black hole singularities and the parameters of the standard models of particle physics and cosmology, arXiv:gr-qc/9404011v1 7 Apr 1994

**[Egan and Lineweaver, 2009]** Ch. Egan and Ch. Lineweaver. A larger estimate of the entropy of the universe. ArXiv:0909.3983v1 [astro-ph.CO] 22 Sep 2009. См. русский перевод "Увеличенная оценка энтропии Вселенной" по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Universe_entropy.pdf

**[Srinivasan, 2001]** J. Srinivasan. Sadi Carnot and the Second Law of Thermodynamics. RESONANCE, November 2001. Доступно по ссылке: http://www.ias.ac.in/resonance/Nov2001/pdf/Nov2001p42-48.pdf
См. русский перевод "Сади Карно и второе начало термодинамики по ссылке": http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Carnot.pdf

**[Verlinde, 2010]** Erik Verlinde. On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. arXiv:1001.0785v1 [hep-th] 6 Jan 2010. Русский перевод "О природе тяготения и законов Ньютона" доступен по ссылке http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Gravity_and_entropy.pdf

**[Иванов, ] Иванов** И. Революция в термодинамике. Доступно по ссылке: http://www.scientific.ru/journal/tsallis/tsallis.html

**[Левич, 1989]** Левич А.П. Метаболическое время естественных систем. Академия наук СССР. Всесоюзный НИИ системных исследований. Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1988. Издательство "Наука", М., 1989. Доступно по ссылке: http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/levich_sistemnye.djvu

**[Левич, 2003]** Левич А.П. Метаболический и энтропийный подходы в моделировании времени. Доступно по ссылке: http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/levich_metabolichesky/levich_metabolichesky.htm

**[Левич, 2004]** Левич А.П. Почему выполняются экстремальные принципы для энтропии и времени? В сб.: Пространство и время: физическое, психологическое, мифологическое. М.: КЦ "Акрополь". 2004. С. 87-94. Доступно по ссылке: http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/levich_pochemu.htm
**[Хайтун, 1996]** Хайтун С.Д. *Механика и необратимость.* Москва, Янус, 1996.
**[Шульман, 2004]** Шульман М.Х. Парадоксы, логика и физическая природа времени. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Origin.pdf
**[Шульман, 2007]** Шульман М.Х. Космология: новый подход. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/New_approach.pdf
**[Шульман, 2009]** Шульман М.Х. Время, энтропия и Вселенная. Доступно по ссылке: http://www.timeorigin21.narod.ru/Time_and_entropy_rus.pdf
**[Шульман, 2010]** Шульман М.Х. Энтропия источника поля тяготения. Доступно по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_time/Force_and_entropy_rus.pdf