

Ответ на замечания рецензента на статью А.Д. Суханова
“Перечитывая Эйнштейна: истоки статистической термодинамики”

Структура полученной мною рецензии довольно своеобразна. Только около трети ее объема посвящена анализу основного содержания статьи – истории создания Эйнштейном основ статистической термодинамики, причем только ее начальному этапу (1902-1904 г.г.). Остальной материал содержит критику совсем другого текста – опубликованной ранее статьи Ю.Г. Рудого и А.Д. Суханова (УФН, 170, 12, 1265, 2000) – и анализ взглядов автора статьи на современный статус статистической термодинамики, содержащихся отчасти, во введении и в заключении к рецензируемой статье, но в основном, в других его публикациях последних лет.

Указанные обстоятельства делают несколько затруднительным полный ответ на содержащиеся в рецензии замечания, ибо, по-моему, имеет смысл обсуждать лишь то, что явно содержится в предлагаемой статье, а не в других работах автора. Как и в случае с предыдущей рецензией, я считаю, что вступать в анонимную полемику по вопросам, не относящимся непосредственно к тексту данной статьи, было бы непродуктивно. Поэтому ниже я вовсе не буду касаться заочной критики уже опубликованной статьи, а по поводу затронутых рецензентом общих вопросов ограничусь лишь несколькими замечаниями в конце моего ответа. Основное внимание мною будет уделено ответам на замечания к исторической части статьи, содержащимся в п. 4 рецензии.

Замечания к разделу 1. ("Введение"), в основном, сводится к упреку в подмене содержания сложившихся терминов. В первую очередь, рецензент имеет в виду термин "статистическая термодинамика". Действительно, мною не было уделено должного внимания пояснению вложенного в него смысла, что, по-видимому, и привело к данному замечанию рецензента.

В связи с этим я хотел бы еще раз сформулировать свою позицию. По моему мнению, в большом разделе теории, связанном с эпитетом «статистическая», сегодня было бы желательно провести определенное ранжирование. Термин «статистическая физика» является, разумеется, наиболее широким, так что он способен охватить все теории подобного рода. Далее, однако, приходится различать два независимых уровня описания природы – микроуровень, или механику, и макроуровень, или термодинамику. Описание на каждом из этих уровней может быть стохастическим. Тем самым, подразумевается, что в механике могут быть случайными, способными флуктуировать, все *микропараметры*, а в термодинамике – все *макропараметры*. В соответствии с этим, ту термодинамику, в которой рассматриваются флуктуирующие макропараметры, естественно было бы назвать статистической в противоположность феноменологической термодинамике. При этом флуктуации макропараметров существуют сами по себе, независимо от какого-либо микроописания.

Некоторая путаница, по моему мнению, возникает из-за того, что сложилась традиция отождествлять статистическую термодинамику со статистической механикой, т.е. с механическим обоснованием феноменологической термодинамики. Однако соответствующие термодинамические характеристики и соотношения в рамках статистической механики могут быть получены только в термодинамическом пределе, когда

и . Но ведь при любые флуктуации макропараметров исчезают. Тем самым, при таком обосновании термодинамика остается, по-прежнему, феноменологической.

Таким образом, сегодня термином "равновесная статистическая физика" реально объединены два качественно различных, хотя и в какой-то мере взаимосвязанных раздела – статистическая механика (в ней температура фиксирована) и статистическая термодинамика (в ней температура флуктуирует). Несмотря на это во многих случаях расчеты по этим теориям дают совпадающие результаты, что находится в согласии с принципом соответствия.

Замечания к разделу 2 в целом сводятся, в основном, к неприятию рецензентом "попыток автора сформировать из работ Эйнштейна фундамент для нового толкования статистической термодинамики". С подобным мнением трудно согласиться по следующим причинам.

Действительно, в существующей литературе по истории физики по поводу оценки термодинамического наследия Эйнштейна имеет место некоторая разногласия. Ее можно свести к трем основным вариантам суждений:

вклад Эйнштейна ограничивается ученическими работами 1901-1904 г.г. и потому не представляет интереса;

в трех работах Эйнштейна (трилогия 1902-1904 г.г.) содержатся основы статистической механики, сформулированной независимо от Гиббса, хотя и в менее разработанной форме;

идеи работ этой трилогии изначально вышли за рамки идей Больцмана и Гиббса, но этими работами все и исчерпывается.

Большинство прежних исследователей истории физики склонялось либо к первому, либо ко второму из этих вариантов. Однако проведенный мною, разумеется, с позиций сегодняшнего дня, анализ статей из третьего тома «Собрания научных трудов» А. Эйнштейна, а также статей других авторов подобные суждения не подтверждает. Кроме того, уже после получения рецензии мне стала доступна написанная по специальному заказу редакции журнала «Physica» (79A, 447-477, 1975) статья знаменитого историка физики Дж. Мехры “Einstein and the Foundation of Statistical Mechanics”. В ней автор, правда, также ограничивается анализом только трилогии Эйнштейна, но делает при этом выводы в духе третьего варианта: “Einstein ... has to be regarded together with Gibbs as the founder of the ensemble-theoretic basis of statistical thermodynamics”; “In certain respects, especially in the search... of fluctuations, Einstein’s work went beyond Boltzmann’s and Gibbs’s”.

Не могу не отметить, что в статье Мехры и моей статье основные оценки идей, содержащихся в указанной трилогии, практически совпали. Вместе с тем, мною найдено и проанализировано продолжение и развитие этих идей в более поздних работах Эйнштейна и его ближайших последователей, что отсутствует в работах других авторов.

Замечание к п. 2.1. состоит в том, что нет оснований считать, что в статье 1902 г. "Эйнштейн имел в виду некую статистическую термодинамику, вовсе не связанную с какой-либо динамикой".

Я считаю это замечание справедливым, если данную статью рассматривать саму по себе. Однако с точки зрения всей трилогии, и тем более, последующего развития, как подтверждает и анализ Мехры, оно выглядит не столь убедительно.

Замечание к п. 2.2 состоит в том, что "систематически повторяемый рефрен "в пространстве макропараметров" по отношению к рассматриваемым работам Эйнштейна не имеет под собой основания".

С этим утверждением трудно согласиться. По существу, ответ на центральный вопрос, когда идейно разошлись пути Гиббса (статистическая механика) и Эйнштейна (статистическая термодинамика), заключается в раскрытии тайны, давно отмечаемой всеми исследователями (включая рецензента): практически полной внешней схожести двух статей трилогии – 1902 и 1903 г.г. Обычно из этого делается вывод, что вторая работа – это просто повторение первой. Однако он противоречит как отсутствию подобной практики у Эйнштейна, так и необъяснимому согласию одного и того же серьезного научного журнала *Annalen der Physik* публиковать дважды практически одно и то же. На самом деле, хотя обе статьи и совпадают по форме, они качественно отличаются своим подходом к обоснованию термодинамики. В статье 1903 г., впервые в истории физики, оно дается в универсальной форме, применимой в принципе и на микро- и на макроуровнях. Неточность в тексте моей статьи, с указанием на которую я согласен, связана в данном случае с излишним акцентом только на макроописание вместо подчеркивания универсальности подхода Эйнштейна.

Замечание к п. 2.3 состоит в том, что "во всех работах Эйнштейна нет вообще никаких новых формулировок нулевого начала".

С этим выводом никак нельзя согласиться. Мнение Эйнштейна звучит вполне определенно: "Если система, окруженная средой с некоторой постоянной температурой находится в тепловом взаимодействии ("касании") с этой средой, то, как показывает опыт, эта система также принимает температуру и сохраняет ее навсегда. Однако, согласно общей молекулярной теории теплоты, этот закон выполняется не строго, а только с некоторым приближением, хотя и очень хорошим для доступных прямому опыту систем".

Этим утверждением Эйнштейн, фактически впервые, сформулировал нулевое начало как сущностное независимое положение термодинамики в целом. До него оно сводилось просто к идее теплового равновесия как строгого равенства температур системы и термостата, представление о котором было введено Дж. Блэком еще во второй половине XVIII века и не считалось во времена Эйнштейна чем-то фундаментальным. Другое дело, что Эйнштейн не использовал самого термина "нулевое начало", вошедшего в научный оборот только в середине 30-х годов XX века. Однако при этом формулировка Эйнштейна многие годы практически не использовалась, а сама идея флуктуаций температуры была предметом острой полемики.

В наши дни ситуация изменилась. Утверждение о введении Эйнштейном в 1904 г. обобщенного нулевого начала принадлежит, отнюдь, не автору статьи. Его в разные годы высказывали столь авторитетные исследователи как Сцилард, Мандельброт, Уффинк и др. Конечно, я согласен с рецензентом в том, что использование мною формул (4) и (12) в п. 2.3., относящемся к работе Эйнштейна 1904 г., можно рассматривать как преждевременное. Вместе с тем, в последующих работах Эйнштейна (1911 г.) и его ближайших последователей Франка, Фюрта и Лауэ (1916, 1917 г.г.) аналогичные формулы используются явно.

Замечание к п. 2.4 состоит в том, что "Эйнштейн пренебрег возможностью ввести в рассмотрение флуктуации температуры, которые так и остались присутствующими неявно в его работах".

В данном случае я согласен с рецензентом в том, что мой анализ работы Эйнштейна 1910 г., взятой самой по себе, не был достаточно убедительным. Если же эту работу рассматривать в цепочке работ 1907–1910–1911 г.г., то было проделано мною при подготовке ответа рецензенту, то все становится на свои места. В частности, в Сольвеевском докладе 1911 г. у Эйнштейна содержится явная формула для флуктуации температуры.

В то же время, существует ответ на вопрос, почему сам Эйнштейн не учитывал флуктуации температуры в анализе критической опалесценции. Очевидно, что в критической области флуктуации объема (или плотности) намного превосходят флуктуации температуры.

Обращаюсь теперь к последнему разделу рецензии "Общая оценка...".

Я согласен с рецензентом, что в статье не была достаточно обоснована идея распространенности и востребованности взглядов Эйнштейна на термодинамику. Однако для подтверждения справедливости этого тезиса достаточно познакомиться с опубликованными в третьем томе "Собрания научных трудов" Эйнштейна материалами I Сольвеевского конгресса, а также со статьями той поры известных ученых Фюрта, Лауэ, Сциларда. Я также признаю, что ссылка на книгу Ландау и Лифшица, содержащую теорию флуктуа-

ций Эйнштейна, в свете дополнительно проанализированных статей на ту же тему 1907–1917 г.г., упомянутых выше, не совсем уместна.

В заключение приведу четыре принципиальных позиции рецензента, с которыми никак не могу согласиться.

Первое. "Проведенный выше анализ проблемы вычисления давления и его флуктуаций явно указывает на то, что результаты микро - и макроописания одного и того же физического объекта совпадают далеко не всегда" (из статьи Рудого и Суханова). {" То есть, вообще – конец физики как науки !! (рецензент) }.

Что касается принципиального вопроса о взаимосвязи микроописания и макроописания, то ситуация здесь такова. Макропараметры, имеющие аналоги на микроуровне, и взаимосвязи между ними могут быть получены с помощью статистической механики, но только в термодинамическом пределе, т.е. при отсутствии флуктуаций. Однако важнейшая для макроописания величина – температура – не имеет аналога на микроуровне, ибо характеризует состояние системы в целом. Она изначально задана как модуль распределения Гиббса и не может быть независимо рассчитана в рамках статистической механики.

Таким образом, о неполном совпадении результатов микро - и макроописания фактически известно очень давно. Однако от этого факта физика до сих пор не погибла, ибо здесь, как и в других случаях, согласие результатов достигается на основе принципа соответствия.

Второе. "Однако правильной постановкой измерений можно уменьшить влияние классических флуктуаций на определение среднего до сколь угодно малой степени. На чем стоит вся физика" (рецензент).

По-видимому, здесь имеются в виду тепловые флуктуации. Думаю, что о принципиальной неустранимости таких флуктуаций достаточно известно, чему примером служит броуновское движение и связанные с ним ограничения чувствительности любых приборов (с учетом того, что абсолютный нуль температуры недостижим). Кроме того, из теории флуктуаций Эйнштейна

следует, что их величина (при конечных T и V) определяется только постоянной Больцмана. Тем самым, предположение о принципиальной устранимости тепловых флуктуаций эквивалентно требованию обращения в нуль постоянной Больцмана. Но уж на этом вряд ли стоит вся физика!

Третье. "Постоянная Больцмана... является переводным коэффициентом между разными системами единиц и может быть без всякого ущерба исключена из всех соотношений, в которых температура служит масштабом энергий..." (рецензент).

В этой фразе содержится весьма распространенная позиция. Однако температура вовсе не является универсальной характеристикой масштаба энергии (достаточно сопоставить формулы Клапейрона и Стефана-Больцмана), так что энергия и температура являются самостоятельными физическими характеристиками. Более того, они качественно различны, ибо температура – интенсивная, а энергия – экстенсивная величина. Как по этому поводу заметил Гегель еще в 1813 г., различные значения температуры (градусы) имеют смысл порядковых, а не количественных числительных. Недаром, Максвелл в своей "The Theory of Heat" подчеркивал, что одни и те же интервалы в разных участках температурной шкалы имеют совершенно разный физический смысл.

Конечно, при промежуточных расчетах можно временно положить постоянную Больцмана (как и любую фундаментальную постоянную) равной единице, но с принципиальной точки зрения этого делать не следует. Таким образом, отождествлять температуру с энергией и тем самым считать постоянную Больцмана техническим коэффициентом физически неправомерно.

В связи с этим отметим, что постоянная Больцмана отсутствует и у Больцмана и у Гиббса, что само по себе знаменательно. Она была введена Планком в 1899 г. и вошла в число четырех (а не трех!) фундаментальных, по его мнению, констант h, c, G, k на которых держится мир. Универсальное определение постоянной Больцмана принадлежит Эйнштейну (1904 г.), в связи с чем Мехра вообще предложил эту постоянную называть постоянной Больцмана-Планка-Эйнштейна. Что касается возможности рассматривать как равноправные постоянные Планка и Больцмана, то она, по-видимому, обусловлена тем, что каждая из них является мерой соответствующей фундаментальной характеристики – действия в механике и энтропии в термодинамике. Продолжать здесь эту тему не считаю возможным, ибо по ней существует обширная литература. В ней с современных позиций обсуждаются обобщенные соотношения неопределенностей и в квантовой динамике, и в статистической термодинамике.

Четвертое. "Первое прочтение работы оставляет впечатление, что в статистической физике происходит если не революция, то, по крайней мере, очень серьезное потрясение" (рецензент).

Иронию рецензента по этому поводу разделить не могу. Приведу лишь несколько характерных высказываний и литературных ссылок.

а) Фок В. А. (1950 г.). "Можно предположить, что между макроскопическими характеристиками и обычным микроскопическим описанием существует своего рода дополнительность..."

б) Мандельброт Б. (1963 г.). "Наш подход реализует мечту сторонников "энергетизма" XIX века: описать материю на макроуровне без ссылки на существование атомов".

в). Лафлин Р. (1998 г.) "Я подозреваю, что все выдающиеся проблемы в физике, включая квантовую гравитацию, по сути связаны именно с такими

коллективными явлениями, которые нельзя вывести из свойств составляющих систему частей".

г). Названия ряда типичных работ самых последних лет:

" Thermodynamics and the measure of entanglement" (Popescu, Rohrlich, Phys. Rev. A, 1997);

" Physical limits on the notion of very low temperatures" (Wu, Widom, Phys. Rev., E, 1998);

"Thermodynamics uncertainty relations" (Uffink, van Lith. Found.Phys, 1998)

д) Примеры монографий и трудов конференций:

"Статистическая физика: вероятностный подход" (Лавенда Б., 1999, англ. изд. 1991)

" The quantum limits of the second law" (San-Diego, 2002).

Сам факт появления серии конференций, начатой представительной встречей в Сан-Диего, указывает на то, что закрыть глаза на эту проблематику вряд ли удастся. Из всего этого напрашивается вывод, что распространение термодинамики на сверхмалые, включая открытые квантовые, системы и на сверхнизкие температуры вполне может привести к обобщению ее начал.

Еще раз благодарю редакцию за внимательное отношение к моей статье.

С уважением

А. Суханов