Н.В. Губина

ПРОДОЛЖЕНИЕ О ХАОСЕ

Москва
Российский университет дружбы народов
2010

ББК 22.317
Г 94

Утверждено
РИС Ученого совета
Российского университета
дружбы народов

Губина Н. В.
Г 93 Продолжение о хаосе. - М.: РУДН, 2010. - 44 с.

ISBN 978-5-209-03765-1

В книге представлен критический анализ обзорной статьи Ж. Брикмона об основаниях статистической физики и термодинамики "Наука о хаосе или хаос в науке?"

Просьба присылать отзывы и замечания на адрес электронной почты: gubinanadya@gmail.com.

ISBN 978-5-209-03765-1 ББК 22.317

© Губина Н. В., 2010
© Российский университет дружбы народов, Издательство, 2010

ПРОДОЛЖЕНИЕ О ХАОСЕ

Введение.

До настоящего времени существует масса неясностей и противоречивых мнений в объяснении оснований статистической физики и термодинамики, и реальное согласованное понимание не достигнуто. К этим проблемам относятся введение вероятности при детерминистской механике и появление необратимости в термодинамике при обратимой динамике частиц. Имеется несколько крупных авторитетных обзоров, которые появляются относительно редко - П. и Т. Эренфестов [1], Н. С. Крылова [2], Д. Тер-Хара [3], А. А. Власова [4,5], К. П. Гурова [6], Р. Балеску [7], Н. Н. Боголюбова [8], И. Р. Пригожина [9]. Они анализировали трудности, но или оставили проблему нерешенной, или предлагали неверные решения. Проблему необратимости давно решил М. Смолуховский [10,11]. Поначалу его объяснение приняли, но позже оно было отвергнуто из-за субъективности. В последнее время рассмотрение этого вопроса вышло за рамки строгого научного рассмотрения, поиски продолжились и в области философии. Много было сделано на пути популяризации науки и ее парадоксов, поэтому за развитием событий имеет возможность наблюдать достаточно широкий круг читателей. Здесь обсуждается популярная и наиболее полно отразившая современное состояние проблемы согласования термодинамики и статистической механики статья Жана Брикмона «Наука о хаосе или хаос в науке?» [12]. Написанная доступным языком, свободная от громоздких формул, она дает возможность читателю постигнуть множество нюансов и противоречий в вопросе, о котором, казалось бы, все, что можно было сказать, уже сказано. Однако и последний автор так и не справился с объяснением необратимости.

Предлагаемая статья посвящена анализу работы Ж. Брикмона на основе подхода М. Смолуховского и со ссылкой на книгу В. Б. Губина [13] (которому я благодарна за руководство в этой области, идею статьи и ценные замечания по ней).

1. Детерминизм и предсказуемость. Поскольку обсуждение проблемы согласования механики и термодинамики, как было сказано, распространяется уже на уровень философских категорий, проблема точного определения понятий, которыми при этом оперируют, становится наиболее острой. Путаница в этом вопросе, вызванная отчасти некорректным, а порой и совсем неверным использованием терминов, была сильно усугублена и приобрела принципиальный характер после того, как Л. Брюллиэн в своей книге «Наука и теория информации» [14] приравнял понятия «неопределенности» как непредсказуемости «индетерминизму» как отсутствию однозначного непрерывного следования событий в природе или модели. По широкому кругу проблем неопределенность, хаос стали конструктивно использоваться И. Пригожиным и его последователями [15]. Но в этих работах необоснованно преувеличена фундаментальность хаотичности вплоть до отказа от представления о траекториях. Автор обсуждаемой нами статьи задается вопросом, является ли новый этап развития науки «Наукой о хаосе или хаосом в науке?». Для того чтобы прояснить суть вещей и уточнить смысл понятий, Брикмон начинает с Лапласа, беря у него понятие о детерминизме в следующем виде (перевод цит. по [16]): «Разум, который для какого-нибудь данного момента знал бы все силы, действующие в природе, и относительное расположение ее составных частей, если бы он, кроме того, был достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, обнял бы в единой формуле движения самых огромных тел во Вселенной и самого легкого атома; для него не было бы ничего неясного, и будущее, как и прошлое, было бы у него перед глазами».

Таким образом, в этом аспекте под детерминизмом следует понимать однозначность следствий в самом процессе, что может быть как в самой природе, так и в какой- либо модели. Предсказуемость же соответствует нашей и инструментальной способности наблюдать, анализировать, вычислять. Для ее получения необходимо собрать данные о начальном состоянии с достаточной точностью и полнотой и строго рассчитать процесс в соответствии с точными законами природы.

Принципиальное отличие «детерминизма» от «предсказуемости» в том, что в природе или модели результаты в будущем получаются без вычислений. Как говорил Эйнштейн, по свидетельству Л. Инфельда [17], «Господа бога не интересуют наши математические трудности. Он интегрирует эмпирически».

При детерминизме в природе или модели та или иная предсказуемость поведения системы есть следствие наших субъективных возможностей, а не только объективных или принятых в модели законов. Вопрос о критерии полной детерминистичности автор обсуждаемой статьи рассматривать отказывается, ссылаясь на его сложность. В действительности этот вопрос не решаем ввиду неисчерпаемости изучаемого мира, но в модели он при необходимости просто постулируется.

Брикмон указывает на то, что если какие-то обстоятельства не позволяют знать точные условия эволюции детерминистической системы, то она перестает, конечно, быть предсказуемой для нас, но детерминистской быть продолжает. И существование так называемых хаотических систем, динамика которых такова, что два близких друг к другу в данный момент состояния через какое-то продолжительное время становятся далеки, никак не противоречит детерминизму. «Хаотические системы,- говорит Брикмон, - конечно, непредсказуемы на практике, по крайней мере, на достаточно больших временах наблюдения, так как всегда будут ошибки в измерении начальных условий». Добавим, что при детерминизме действительно хаотических систем не существует, так что в этом случае не следует буквально понимать это название. Хаотические системы - это попросту вероятностные системы. В каждый следующий момент частица может занимать любое сколь угодно удаленное от предыдущего положение в допустимой области. Брикмон критикует смешивание понятий «детерминизм» и «предсказуемость», разводя эти понятия в принципиальном смысле, как нечто объективное и субъективное.

2. О вероятностном описании и траекториях. Далее, в разделе «Траектории и вероятности», Брикмон обращается к тезису Пригожина: «Понятие траектории для хаотических динамических систем должно быть отброшено и заменено вероятностями», потому что «при измерении мы никогда не получаем одну, а всегда набор траекторий».

Сходный отказ от детерминизма в пользу статистики находим и в намного более ранней работе Р. Мизеса [18], где о добавлении к механике статистического метода при описании сложных систем говорится следующее: «Лишь одного оно не сделало: не спасло детерминизма, и даже вообще не стало для него никакой опорой. Все действительные успехи физической атомистики, начиная с Больцманна, достигнуты исключительно благодаря тому, что к положениям классической физики прибавили статистические соображения».

При этом, признавая, что «без добавления типично статистических понятий, как молекулярный беспорядок, равномерное распределение известных признаков, а также чисто теоретико-вероятностных рассуждений - нельзя притти ни к каким иным заключениям, кроме ранее упомянутых выражений механики», Мизес указывает на необходимость введния статистического описания из-за невозможности «объяснить классическими детерминистскими положениями всего многообразия земных явлений», потому как «все запутанные силы, воздействующие на тело … познаются лишь, как *совокупность* (в статистическом смысле)».

И еще: «нет ни одного самого малого положения кинетической теории газов, которое вытекало бы только из классической физики без допущений статистического характера».

Во-первых, логически неверно переносить неопределенность нашего знания и невозможность точного расчета на саму природу элементарных (фундаментальных) взаимодействий.

Во-вторых, статистику надо применять к каким-то законам движения. Она сама вместо таких законов не работает и мы в большой области успешно применяем статистику именно к детерминистским законам. Более того, мы реально обнаруживали области, когда расчеты на детерминистской микрооснове оказывались несостоятельными даже на макроскопическом уровне. Например, в случае сверхпроводимости. Именно невозможность моделировать явления, применяя классическую механику, вынудила признать наличие природной квантовомеханической вероятности.

Таким образом позиция Мизеса неконструктивна.

Вернемся к позиции Пригожина. Обсуждая его, Брикмон приводит пример с бильярдным шаром, положение которого в начальный момент заменено распределением вероятности. Через некоторое время нахождение его в различных точках стола становится равновероятным. Но на самом деле шар всего-то в одном, конкретном месте, как легко убедиться. То есть в этом случае, отмечает Брикмон, мы больше теряем, когда вводим вероятностное описание. Также Брикмон указывает на то, что, различая уровни анализа, можно отмечать положение шара в каждый момент времени хотя бы с какой-то точностью, а значит он не где угодно, как предполагается по «неприводимому» (неуточняемому - Н.Г.) вероятностному описанию. «Далее можно найти приближенные законы движения шара, решить уравнения движения (не всегда, но это не отвергает прошлые шаги). Даже сознавая всю приближенность этого, зачем отвергать траектории? Конечно, можно выбрать вместо рассмотрения эволюции траекторий эволюцию распределений, но не стоит забывать, что, делая таким образом, мы изучаем не только систему, но также и нашу способность или неспособность к более детальному анализу».

Далее Брикмон рассматривает вероятность с точки зрения «незнания»: в случае бросания кости «мы не способны контролировать или точно знать начальные условия каждого бросания, но можем, однако, определить средний результат большого числа бросаний». «Вероятностное описание невероятно успешно на практике, но те случаи, когда оно работает, вызваны нашим частичным знанием. Было бы неверным уделять какую бы то ни было конструктивную роль нашему незнанию. И также ошибочно предполагать, что система обязана быть каким-либо образом индетерминистской, когда мы применяем к ней вероятностное описание».

Можем резюмировать, что при детерминизме вероятность отражает наше незнание или пренебрежение точностью. Нельзя придавать нашим практическим представлениям об объекте реальности смысл точного отражения истинного состояния. Нельзя приписывать самому объекту изучения неопределенность нашего знания, считая объект индетерминистским самим по себе. Детерминистская система не может становиться индетерминистской сама по себе при накоплении любых условий, в том числе и неточностей нашего наблюдения.

Эти проясняющие суть рассуждения Брикмона очищают проблему в области обоснования классической статистической механики от неточностей, внесенных смешиванием субъективного с объективным.

3. Необратимость и возвратная теорема Пуанкаре. В главе «Необратимость и стрела времени» Брикмон подходит к проблеме необратимости на примере стремлении газа в сосуде к равновесию. Его интерпретация обычная. Он говорит, что число конфигураций, реализующих состояние равномерного распределения газа по объему, настолько подавляюще велико по сравнению с тем, когда все частицы собрались в одной части сосуда, что увидеть систему возвратившейся в первоначальное неравновесное состояние можно «чрезвычайно редко», «один раз в миллион лет».

По теореме Пуанкаре, замкнутая изолированная система движется квазипериодически, но для большого количества частиц времена возврата очень велики. Брикмон видит, что возвращения хотя и редки, но возможны, но в отличие от предыдущего пункта, где он разделял объективное и субъективное, здесь он не отмечает принципиальной роли субъективного в появлении и существовании закона необратимости термодинамических систем.

Смолуховский, наблюдая развитие неравновесных состояний у систем с разными числами частиц, от малых до относительно больших, экспериментально подтвердил резкий рост времен возврата с ростом числа частиц и наступление момента, когда реального возвращения уже невозможно дождаться. При этом у наблюдателя начинает создаваться впечатление, что система развивается необратимо. Он четко и определенно написал об этом: «Кажущиеся необратимыми процессы в действительности являются обратимыми» [10]. «Представляется ли нам какой-либо процесс обратимым или необратимым … зависит только от начального состояния и от продолжительности наблюдения» [11]. Но наблюдение за системой с небольшим числом частиц или ожидание повторения не слишком сильного отклонения от положения равновесия покажут ошибочность впечатления необратимости.

Такое понимание шло вразрез с привычкой физиков считать явления, изучаемые физикой, чисто объективными. Отчасти поэтому интерпретация Смолуховского была забыта, постепенно замолчена и оставила свой след в искаженном, замутненном виде, иногда в форме, выдаваемой за объективную. Например, Д. В. Сивухин [19] закон возрастания энтропии также объясняет в конечном счете малым временем наблюдения, но слова «представляется», «кажется», «впечатление» в адрес необратимости, в отличие от Смолуховского, не произносит: сказав «А», не говорит «Б». Более придирчивые авторы, например, Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц ([20], с. 47-48), отчетливо видели субъективный характер интерпретации Смолуховского и за это ее полностью отвергли, но сами не смогли предложить объективистской интерпретации, не смогли объяснить закона возрастания энтропии исключительно только как следствие свойств механики частиц систем, как классической, так и квантовой.

Брикмон же не увидел принципиальной роли субъективного в появлении второго начала и в превращении «долго» в «бесконечно» и малой вероятности в нулевую. Эти превращения порождают впечатление необратимости. Естественно, не у системы самой по себе, а у наблюдателя. В результате Брикмон здесь и в последующем понимает необратимость как объективное явление.

Термодинамика, если ее правильно понимать, не выделяет направления времени [13,21,22]. А «вина» за появление несогласованности с механикой ложится на субъективный фактор. Термодинамика - это условная субъективная надстройка над механикой, обусловленная конечными пределами наблюдений и ожиданий, а также обусловленная конечной точностью выбранного характера деятельности субъекта с системой.

4. Парадокс Лошмидта и теорема Пуанкаре о возвращениях. Об эволюции фазового ансамбля.

Н-теорема Больцмана вызвала критику. В. Я. Френкель описывает возражения так [23].

«Первое из них принадлежало его старшему коллеге по Венскому университету, И. Лошмидту, который обратил внимание (в 1876 г.) на очень простой факт. …при обращении знака времени система пройдет в обратном порядке положения, занимавшиеся составляющими ее молекулами, в то время как энтропия системы, являясь функцией состояния, будет теперь убывать (Н - возрастать) - в противоречии с ее ходом, предсказываемым Н-теоремой Больцмана. Это замечание Лошмидта получило название «парадокса обратимости» (Umkehreinwand).

Другое возражение против Н-теоремы принадлежало ученику Макса Планка, Е. Цермело. Оно получило название «парадокса повторимости» (Wiederkehreinwand) и было выдвинуто в 1896 г. Парадокс повторимости связан с теоремой, установленной (в 1890 г.) А. Пуанкаре. Согласно этой теореме механическая система, не подвергающаяся воздействиям извне и состоящая из конечного числа частиц, скорости и положения которых заключены в соответствующие конечные интервалы значений, совершает периодическое движение, возвращаясь к первоначальному состоянию или же бесконечно близко к нему приближаясь. Сам Пуанкаре, как отмечает Цермело в своей первой статье, не обратил внимания на противоречие, к которому приводит применение его теоремы к процессам статистической механики. … Из теоремы Пуанкаре следует, таким образом, что и функция Н должна периодически изменяться, а не монотонно убывать. Ответы Больцмана на эти критические замечания не убедили ни Цермело, ни ряд других крупных авторитетов».

Итак, Брикмон рассматривает движение к равновесию газа, первоначально сжатого под поршнем в половине сосуда. После достижения равновесия он обращает скорости частиц и разбирает возражение Лошмидта против необратимости: если в момент подхода к равновесию обратить скорости частиц, то система опять придет в то состояние, из которого стартовала.

Чтобы обойти это возражение, во избежание «большого нарушения макроскопического закона», Брикмон приводит тот довод, что конфигурации, отвечающие частицам с обращенными скоростями, образуют крошечную часть микроскопических конфигураций, дающих равновесное распределение, и утверждает, что «большинство конфигураций, отвечающих равновесному распределению, не пойдут в левую часть ящика ни в прошлом, ни в будущем (по крайней мере в течение разумного периода времени)».

На самом деле та крошечная, по словам Брикмона, часть конфигураций (соответствующая траекториям микросистемы, пришедшим из исходного неравновесного состояния) сразу же пойдет в левую часть ящика. Остальная же, в его понимании, часть конфигураций, отвечающих равновесному распределению, также побывает в левой части не позднее, чем через время возврата Пуанкаре для данной системы. Апелляция Брикмона к большому числу микросостояний вообще ошибочна. Лошмидт, как и Клаузиус, всегда имеет в виду одну фазовую траекторию - одну систему, а не континуум систем. Одна фазовая точка (система) с обращенными скоростями пойдет обратно по траектории. Таким образом, Брикмон подменил задачу. Он представляет дело так, будто фазовый объем неравновесного состояния был одним, а после времени релаксации стал другим, гораздо большим. Он имеет в виду, что обратятся только траектории, изначально пришедшие из неравновесного состояния. А добавочные траектории, возникшие при построении фазового объема равновесного состояния, не пойдут в исходную малую область фазового пространства. Однако они туда пойдут за время периода Пуанкаре. А во-вторых, о них вообще говорить не приходится, поскольку реально они к исходной системе не имеют никакого отношения, а получены искусственно через макронаблюдаемые, как некоторая оценка макросостояния. Реальная система вообще одна. Неверно представлять себе движение системы по механическому закону движения фазового ансамбля. Ансамбль не самостоятелен. Мы никогда не видим его движения. Наоборот, он в каждый момент строится (в представлении) по макросостояниям, соответствующим конкретным положениям точки на одной фазовой траектории. Представление о самостоятельном движении фазового ансамбля противоречит его определению. Фазовый ансамбль есть чисто фиктивная вещь. Так что связь фазовых объемов разных макросостояний не подчиняется теореме Лиувилля о сохранении фазового объема. (Потому и нет необходимости ([13], гл. 1, §2) в гипотезе Гиббса о перемешивании фазового ансамбля для преодоления противоречия роста энтропии теореме Лиувилля о сохранении фазового объема (см. [24], §36)).

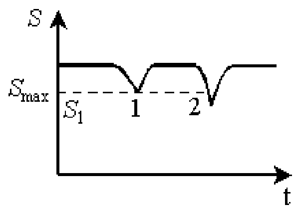
Помимо этого ошибочно считать рассуждение Брикмона разъяснением второго закона термодинамики, потому что, оперируя понятием «разумный период времени», не нужно забывать о его субъективности, условности. Потому что вводя понятие «разумного» периода времени при рассмотрении задачи, Брикмон переходит к субъктивной оценке. В исходной физической модели ее нет. Нет в реальности и мысленных разбиений, определяющих допустимые конфигурации, и вводятся они соответственно нашей обычной практике [13].

Задачу Лошмидта, заключающуюся в опровержении независимости термодинамики от знаков скоростей частиц, Брикмон подменяет задачей сопоставления вероятностей равновесных и неравновесных состояний. В действительности на каждой траектории, что подразумевает Лошмидт, равновесные состояния просто существуют дольше, чем неравновесные: они образуются бОльшим числом комбинаций. Но на ней состояний подхода к равновесию столько же, сколько и ухода от него. Лошмидт верно указывает на неясность в понимании термодинамики. Если обратить скорости на этапе подхода к равновесию, то макросистема пойдет в сторону от равновесия, чего термодинаика не видит. Остается еще вопрос, почему вообще видны движения только в сторону равновесия, раз противоположных столько же.

В случае эргодичности траектория посещает все состояния фазового объема, в том числе и все неравновесные. В случае квазиэргодичности траектория посещает все сколь угодно малые области фазового объема. Хотя она зачерчивает нулевой объем, это означает, что практически невозможно выделить конечную область, которую она не посещала бы. И без квазиэргодичности при более или менее равномерном попадании фазовой точки в разные части допустимой энергетически и геометрически области фазовая траектория будет заходить в область, соответствующую неравновесному макросостоянию. Причем одинаковое число раз входить и выходить.

Представим себе кривую энтропии от времени. На ней имеются редкие отклонения (вниз). Проведем горизонтальную линию, соответствующую фиксированному значению отклонения от равновесия. Пересечения этой линии с кривой встречаются парами. Левая точка оказывается в области ухода от равновесия, а правая в области стремления к равновесию. То есть подход к равновесию и уход от него встречаются одинаково часто.

Рисунок 1 в «Статистической физике» Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [25], схематически изображающий поведение энтропии S во времени в соответствии с возвратной теоремой Пуанкаре, демонстрирует равновероятность этапов



Вид S(t) по книге [25] (рис. 1).

подхода к равновесию и удаления от него. Так что практически причина впечатления необратимости в такой ситуации заключается в приготовлении неравновесного состояния и редкости его в будущем. Что и выразил Смолуховский.

Утверждение, что равновесное состояние реализуется большим числом микросостояний, буквально отражает то, что большая часть кривой энтропии от времени соответствует равновесному состоянию. Поэтому при случайном выборе точки на этой кривой (состояния системы) с подавляющей вероятностью выпадает именно равновесное состояние. Поэтому, имея в начальный момент времени неравновесное состояние, в дальнейшем мы его практически больше не встретим, хотя подходы к равновесию и уходы от него равновероятны. До следующего неравновесного состояния мы не доживаем. И учет относительной краткости нашего наблюдения решает проблему согласования необратимости термодинамики и обратимости механики.

Таким образом пока что Брикмону не удалось преодолеть возражения против необратимости на выбранном им «объективном» пути.

5(а). Попытки согласования термодинамической необратимости с обратимостью фундаментальных законов. В разделе «Необратимость и стрела времени» автор ставит вопрос: «…если основные законы обратимы, почему мы видим некоторое движение, но никогда обращенное по отношению к нему во времени?». Суть взгляда Брикмона на этот вопрос состоит в объяснении необратимости как следствия «подходящих предположений о начальных условиях», потому как сами законы физики «никогда не говорят нам, каков мир или как он развивается». Действительно, законы ничего не говорят о направлении развития мира, однако парадокс относится к замкнутой системе, о чем важно не забывать, и утверждает необратимость для всех начальных условий. И для больших систем мы практически всегда, в конечном счете, видим необратимость. Зачастую неявно озадачиваются односторонними развитиями событий, наблюдаемых в открытых системах, для которых теорема Пуанкаре неприложима. Но в них частицы с разными относительными скоростями неограниченно разбегаются, что не создает парадоксальных проблем.

В вопросе о происхождении необратимости Брикмон придерживается взгляда Больцмана, который считал, что ему удалось согласовать необратимость термодинамики с обратимой динамикой. Брикмон отмечает, что до сих пор насчет этого существует множество заблуждений даже среди знаменитых ученых.

Брикмон цитирует Пригожина: «Больцман был вынужден заключить, что необратимость, постулируемая термодинамикой, была несовместима с обратимыми законами динамики». Хотя на самом деле вот что сам Больцман говорил по этому поводу (Брикмон цитирует): «Из того факта, что дифференциальные уравнения механики остаются неизменными при обращении знака времени при отсутствии других изменений, господин Оствальд заключает, что механический взгляд на природу не может объяснить, почему естественные процессы протекают предпочтительно в определенном направлении (По крайней мере для замкнутой изолированной системы Оствальд прав, см. теорему Пуанкаре.- Н. Г.). Но такой взгляд кажется мне *упущением того, что механические явления определяются не только дифференциальными уравнениями, но также и начальными условиями.* В прямом противоречии с господином Оствальдом я назвал это одним из самых блестящих подтверждений механического взгляда на Природу, поскольку оно обеспечивает чрезвычайно ясную картину рассеяния энергии при условии, если допустить, что мир стартовал из начального состояния, удовлетворяющего определенным начальным условиям» (курсив Брикмона.- Н. Г.). Однако заметим, что Н-теорема не указывает на какие-либо ограничения начальных условий. Движение могло бы стартовать из равновесного состояния и в сторону все большего отклонения от равновесия, например с начала левого склона на упомянутом выше рисунке учебника Ландау и Лифшица. К тому же рассмотрение проблемы относится к замкнутой изолированной системе, для которой Пуанкаре доказал квазипериодичность.

При доказательстве (выводе) следования стремления систем к равновесию (Н-теоремы) из механических законов Больцман использует уравнение для функции распределения по скоростям. Такой шаг, строго говоря, не правомочен, поскольку доказательство касается поведения отдельной механической системы (одной фазовой точки), и применимость статистического метода, то есть замена фазовой точки континуумом, в данном случае не доказана. Аналогичная ошибка была совершена при выводе необратимости в периодической системе М. Каца, также приведенном и обсуждаемом здесь ниже.

Надо подчеркнуть, что в случае открытых систем одностороннее развитие процессов не противоречит обратимости механики, поскольку в них разность скоростей частиц действует во времени без ограничений, в отличие от случая в замкнутом изолированном объеме, когда системе приходится возвращаться.

Вторую причину необратимости, помимо каких-то особых начальных условий, Брикмон видит в большом числе частиц, из которых состоят необратимые системы. В качестве примера такой системы он приводит человека и противопоставляет ей обратимые: одна молекула или биллиардный шар, движущийся без трения по поверхности стола, добавляя, что «при наличии трения мы имеем дело со многими степенями свободы (атомы биллиардного стола, атомы воздуха и т.д.)». Идея роли большого числа частиц верна, но результирующий вывод, достигаемый Брикмоном, как мы покажем ниже, не вполне удовлетворителен.

Важно помнить, что второе начало термодинамики сформулировано для замкнутых изолированных систем. Человек такой системой не является. Что касается биллиардного шара, то его движение, в идеальной модели, конечно, обратимо, и, если заснять его на пленку, мы не увидим разницы, прокручивая ее вперед и назад, как предлагает автор. Но если взять не один шар, а больше, покажется ли естественным при обратном просмотре, что они вдруг снова собираются в пирамиду, и с какого количества шаров эта естественность будет утеряна? Брикмон этого не объясняет и не может объяснить, по его общей установке.

Кроме того, Брикмон не подчеркивает значения величины отклонения от равновесия в начальный момент времени, тогда как при малых отклонениях возвращения могут происходить за доступные времена, но при больших числах частиц даже относительно малые отклонения обычно не наблюдаемы.

Как уже обсуждалось ранее, Смолуховским было показано, что для небольших отклонений от равновесия систем с небольшим количеством частиц такие возвращения легко наблюдаемы, однако время возврата резко увеличивается с ростом числа частиц и начального отклонения от равновесия, что при ограниченных возможностях наблюдателя создает у него впечатление необратимости.

В последнее время против применения возвратной теоремы Пуанкаре выдвигают факт наличия бифуркаций. Однако они, во всяком случае, не способствуют установлению равновесия.

5(б). Интерпретация необратимости на языке фазового ансамбля.

Брикмон пишет: «В классическом объяснении необратимости, в дополнение к микроскопическим законам существуют две основные составляющие. Первая уже была введена: начальные условия. Вторая получается из наблюдения, что мы имеем дело с системой многих степеней свободы: мы *должны* проводить различие между микроскопическими и макроскопическими переменными … Рассмотрим фазовое пространство Ω системы, так что система представляется точкой **x** в этом пространстве и ее эволюция представлена кривой $\mathbf{x(t) = T^t(x)}$. Различные величины, представляющие физический интерес, например, плотность, или средняя энергия, или средняя скорость в данном кубическом миллиметре, могут быть выражены как функции от **Ω**. Эти функции (назовем их **F**) … данному значению **F** обычно соответствует огромное количество конфигураций (tend to be many to one). Например, если **F** - это полная энергия, тогда она принимает постоянное значение на поверхности в фазовом пространстве. Но и если **F** есть число частиц в кубическом миллиметре, также имеется много конфигураций, отвечающих данному значению **F**».

Как было выше сказано, давление не имеет объективного определения ввиду отсутствия объективного способа выделения границ у группы дискретных элементов. К тому же давление не измеряется мгновенно, более того, в модели границы разбиения вообще почти никогда не чувствуют частиц. И прежде чем вести разговор о построении функции **F** и ее эволюции, необходимо понимать, как это делается. Вопрос разрешается практически, но объяснение неочевидное, и оно должно быть изложено. Вместо чего обычно ограничиваются ссылкой на «сложные функции 2**k** переменных» (при **k** степенях свободы) [26]. Что можно ответить на вопрос: какое в данный момент у системы давление? Мгновенно давления нет, потому что частицы касаются стенок только в дискретные моменты.

Брикмон продолжает. «Теперь, позвольте мне сделать два утверждения, первое из которых является тривиальным, второе нет. Если данная микроскопическая начальная конфигурации $\mathbf{x}_0$, порождает траекторию $\mathbf{x(t)}$, то некоторая функция в фазовом пространстве следует индуцированной эволюции $\mathbf{F_0 \rightarrow F_t}$, где $\mathbf{F_0 = F(x_0)}$ и $\mathbf{F_t = F(x(t))}$ (здесь и ниже я буду считать **t** положительным). Это тривиальная часть. Нетривиальное наблюдение состоит в том, что во многих ситуациях, можно найти подходящее семейство функций (я обозначу его через **F**) таких, что вызванная эволюция на самом деле (приблизительно) автономна. То есть можно определить $\mathbf{F_t}$ только через $\mathbf{F_0}$, не обязательно зная микроскопические конфигурации, из которых она следует. Это значит, что различные микроскопические конфигурации, для которых **F** принимает значение $\mathbf{F_0}$, будут порождать ту же эволюцию в $\mathbf{F_t}$. Очень простой пример представляют глобально сохраняющиеся величины (такие как полная энергия): для всех микроскопических конфигураций $\mathbf{F_t = F_0}$ для всех времен. Но это не интересно. Более интересно наблюдать, что решения всех похожих макроскопических уравнений (Навье-Стокса, Больцмана, диффузии,…) могут быть рассмотрены как определение такой порождаемой эволюции $\mathbf{F_0} \rightarrow \mathbf{F_t}$».

Брикмон не получает эти временные макроскопические уравнения из микроскопики, а определяет их феноменологически, подбором подходящих математических выражений. Он говорит, что они справедливы с некоторой точностью: «если мы хотим, чтобы эта эволюция была справедлива для всех времен, тогда этот набор микроскопических конфигураций может стать пустым».

Таким образом Брикмон откровенно уклоняется от возражения теоремы Пуанкаре. Во-вторых, мы видим практически стопроцентное стремление к равновесию не только для «большого поднабора», как по Брикмону, но для всех отдельных систем. При рассмотрении отдельных систем легко видно, что практически все неравновесные состояния через некоторое время - время релаксации - придут к равновесию. Разумеется, раньше, чем через время возврата Пуанкаре.

Если же макроскопические уравнения и законы условны по полноте описания, точности и ограничены по времени, то они существуют только в сфере субъективного, хотя и отражают нечто реальное.

В конце этого пункта Брикмон пишет: «Вернемся к проблеме необратимости: должны ли мы ожидать, чтобы упоминавшиеся макроскопические законы были обратимы? Априори нет. В самом деле, я подчеркивал в кратком описании выше роль начальных условий в их выводе. Макроскопические уравнения могут быть обратимыми или нет - зависит от ситуации. Но так как начальные условия входят в их вывод, нет логического довода ожидать, чтобы они были обратимы». Хотя Брикмон часто обращается к роли начальных условий в объяснении необратимости, ни в каких выводах макроскопических законов он их не использует в явном виде. Все объяснения остаются голословными. Тут его же собственными словами можно возразить: «Это крайне неудовлетворительно, потом что, если подумать над этим, ясно, что слишком много вещей можно «объяснить» простой апелляцией к начальным условиям».

Кроме того, он также не объясняет, почему те или иные выбранные начальные условия приводят к движению в сторону равновесия, а не наоборот. В таком случае это похоже на веру в пригожинский принцип отбора, о котором, Брикмон, кстати, даже не упоминает, что очень странно.

5(в). Принцип отбора Пригожина и монотонность в первый момент благодаря приготовлению состояния.

Случайно обнаружить систему в сосуде в неравновесном состоянии практически невозможно. Поэтому оно должно быть приготовлено. Это можно сделать, соединив два объема - с частицами и пустой. В таком случае начальные объемы с частицами с подавляющей вероятностью находятся в равновесии, то есть имеют симметричные распределения по скоростям. Поэтому в первый момент объединенная система будет также иметь симметричное распределение по скоростям, что приводит к тому, что изменение знака времени не должно влиять на изменение производной энтропии по времени. Производная энтропии по времени в этот момент будет равна нулю, поскольку изменение направления времени ввиду симметрии распределения по скоростям не должно менять ее значения. Это в свою очередь будет означать, что состояние получено в нижней точке отклонения от равновесия, в локальном минимуме энтропии. Дальнейшее развитие системы будет сопровождаться ростом энтропии, как в положительном, так и в отрицательном направлении времени [13,21]. Также см. в [22] обсуждение экспериментального подтверждения, полученного в [27].

Брикмон никак не затронул объяснение Пригожиным второго начала термодинамики. Пригожин отметил, что по симметрии половина из возможных начальных микросостояний ведут вверх к увеличению энтропии, другая половина ведет вниз - в сторону от равновесия. Но реально наблюдается движение только к равновесию. Для разрешения парадокса Пригожин постулировал, что в природе реализуются только начальные состояния первого рода. Он назвал это принципом отбора [9]. Этот подход был проанализирован и отвергнут в [13,21,28]. Отбор Пригожиным начальных состояний первого рода не опровергает квазиобратимости Пуанкаре. То есть Пригожин не объяснил тенденции системы к равновесию. С другой стороны, принцип Пригожина совершенно неестественен. Да и возникает парадокс в модели, и ссылка на природу в этом случае незаконна. Реальное разрешение дано в [13]. Оно заключается в том, что при грубом приготовлении неравновесного состояния система оказывается в максимальной точке получаемого отклонения от равновесия. Движение же оттуда возможно только в сторону равновесия (конечно, в обе стороны по времени). Для получения состояния, которое по инерции еще больше бы удалялось от равновесия, необходимо было бы более тонко скоррелировать движение частиц. При этом точность воздействия понадобилась бы такая, которая потребовалась бы для обращения движения на этапе стремления к равновесию. Движение по инерции не свойственно квазистатической термодинамике.

6. Необратимость и преобразование пекаря. Затем Брикмон вновь обращается к обсуждению взгляда группы Пригожина на проблему необратимости, состоящего в том, что диссипация играет «конструктивную роль», а «стрела времени есть не следствие неких феноменологических аппроксимаций, но внутреннее свойство классов нестабильных динамических систем». Брикмон возражает доводу Д. Дрибье о том, что «необратимые процессы наблюдаются в таких системах, как преобразование пекаря».

Преобразование пекаря представляет собой заданное детерминистским законом разрывание фазового объема с последующим разнесением частей. При этом нарушается изначальная связность преобразуемой области фазового пространства. Преобразование пекаря относится к так называемым размешивающим системам, понятие которых было введено Н. С. Крыловым для того, чтобы с их помощью объяснить краткость времен релаксации [2].

Сравнивая преобразование пекаря с движением биллиардного шара или с любой другой системой, не имеющей микро-/макро-разделения, Брикмон утверждает, что нет смысла говорить о какой-либо необратимости в системе, где невозможно даже определить макропеременные.

Заметим также, что такие системы, как преобразование пекаря, не имеют отношения к обсуждаемым здесь механическим системам, поскольку у механической системы фазовая траектория не имеет разрывов (а также самопересечений, какие имеет кривая Пеано).

В споре с Дрибье, который утверждает, что «если бы суть вопроса состояла только в разделении масштаба, тогда необратимость была бы следствием приближенного наблюдения или ограниченного знания о системе», Брикмон напоминает о роли начальных условий, которые, по его мнению, «должны входить в объяснение» необратимости. Хотя роль начальных условий и важна, но при данной постановке вопроса возражение Брикмона не полно и не верно. Начальные условия не могут играть роль в определении того, что будет являться «внутренним свойством класса нестабильных динамических систем» - обратимость или необратимость. Теоремой Пуанкаре о возвращениях доказано, что этим «внутренним свойством» механических систем является обратимость. Она возникает не в результате движения назад по траектории, как в примере с обращением скоростей, но происходит вследствие обхода траекторией всей разрешенной области фазового пространства. От величины начального отклонения зависит время возврата, а значит и впечатление, которое произведет на наблюдателя эволюция системы. А от распределения по скоростям в начальный момент времени зависит скорость стремления к равновесию в начальный момент, но это не опровергает теорему Пуанкаре.

7. Об иллюзии необратимости. В пункте «Возвратная теорема Пуанкаре», обсуждая применение ее к газу, расширяющемуся в сосуде, Брикмон приводит позицию Пригожина: «Если бы необратимость была только в этом (в длительности. - Н. Г.), то она на самом деле была бы иллюзией, так как если мы подождем дольше, то может случиться, что частицы вернутся обратно в ту же половину сосуда. В этом отношении необратимость была бы вызвана пределом нашего терпения». Но Пригожин не удовлетворяется объяснением необратимости как субъективного явления, поскольку, в его понимании, она играет главную роль в появлении неравновесных структур - реальных объектов, а не иллюзий. Но устойчивые неравновесные структуры возникают в открытых системах при относительно быстром подводе тепла или материала за рамками термодинамического описания, имеющего дело с квазистатическими процессами, и не имеют отношения к стремлению к равновесию в замкнутой изолированной системе.

Возражение Больцмана, касающееся больших времен возврата: «Вы должны жить так долго» (чтобы дождаться возвращения, предсказываемого теоремой Пуанкаре), - кажутся удовлетворительными и для Брикмона «с физической точки зрения». На самом же деле, что касается тенденции установления равновесия в конечном счете, то из-за отсутствия у наблюдателя возможности проследить за дальнейшей эволюцией обратимой по своей сути системы нельзя приписывать ей свойство необратимости. Приписав такой системе свойство необратимости, мы сейчас же получим противоречие, как с теоремой Пуанкаре, так и с наблюдаемым поведением систем с малым числом частиц.

Брикмон указывает на математическую проблему, возникающую при попытке вывести «необратимое макроскопическое поведение из микроскопической динамики» для времен, превышающих периоды возврата Пуанкаре. Естественно, такой строгий математический вывод и не может быть сделан, так как из обратимой динамики математически вообще нельзя вывести необратимость. Из нее уже была выведена квазипериодичность механической системы. Необратимость может быть получена в этом случае только как впечатление наблюдателя.

8. Модель Каца.

Завершив классическое рассмотрение проблемы необратимости, при этом даже не упомянув интерпретацию Смолуховского, Брикмон переходит к разбору модели Каца [29]. К ее достоинствам относится простота и точная разрешимость уравнений движения. Что позволяет, в отличие от ситуации с уравнением Больцмана, ясно проследить тенденции развития данной системы.

Брикмон приводит модель Каца как удачную аналогию больцмановского решения проблемы необратимости. В изложении Брикмона модель представляет собой **n** равномерно распределенных по окружности точек (шаров), которые разделены интервалами. Точки одновременно движутся по окружности в заданном направлении. Они могут быть черными, числом $\mathbf{N_b(t)}$, или белыми - $\mathbf{N_w(t)}$. Интервалы же двух сортов: одни меняют цвет точки, после того, как она пересекла его (это интервалы из набора **S**) или оставляют его прежним (набор **S'**). Количество изменяющих цвет точки интервалов (набор **S**) **m**, а не изменяющих (набор **S'**) соответственно **n-m**. В начальный момент времени все точки начинают последовательно друг за другом двигаться в выбранном направлении, например, против часовой стрелки и в зависимости от того, какой интервал пересекают, меняют цвет на противоположный или сохраняют его. Вопрос в том, что происходит с системой после большого числа шагов. Задача может рассматриваться для различных начальных условий. Например, и для случая, когда в первый момент времени все шары белые, как было сделано в работе Каца $(\mathbf{N_w(0)=n, N_b(0)=0})$.

Проводится аналогия с механической системой, поскольку в модели можно ввести координаты, описывающие положения точек, а цвет может быть чем-то вроде (дискретной) скорости, которая меняется при «столкновении» с интервалом из набора **S**.

Система (уравнения движения) детерминистична и периодична во времени - «спустя **2n** шагов каждый интервал будет дважды пересечен каждой точкой, таким образом, они все вернутся к исходному цвету … это аналог цикла Пуанкаре». Аналогией этой модели может служить и объем с частицами, которые пошагово-циклически закономерно перемещаются между двумя половинами сосуда. Макро-наблюдаемыми оказываются числа частиц в этих половинах. Через **2n** шагов цикл заканчивается. Это замкнутая фазовая траектория. Другой порядок закономерного движения цикла **2n** дает другую траекторию. Все эти траектории, с учетом перестановок, образуют фазовое пространство.

Усреднение по каждой траектории и по всем траекториям, то есть по всему фазовому пространству, дает, конечно, более равновесное распределение частиц по подобъему, чем начальное неравновесное. Это усреднение, по определению, не может обнаружить никакой обратимости. Потому что обязательное будущее через **2n** состояний исходное есть (кратко)временное событие и не может быть изображаемо средним по фазовой траектории. Все такие попытки разными ухищрениями получить необратимость у обратимой системы только замутняют ясное понимание ситуации с необратимостью в термодинамике, разработанное и доказанное Смолуховским.

Эта модель конечно-циклического движения позволяет увидеть появление впечатления необратимости и для замкнутых фазовых траекторий. С достоверным возвращением начального макросостояния, лишь бы период возвращения был велик по сравнению со временем наблюдения.

При получении необратимости для этой системы аналогично Больцману Кац вводит как бы вероятностное описание изменения количества белых и черных шаров на каждом шаге, считая это аналогом действия молекулярного хаоса. Разность числа белых и черных шаров на следующем шаге постулируется пропорциональной имеющейся разности в данный момент с коэффициентом **m/n**, меньшим единицы, так что она монотонно стремится к нулю. Брикмон отмечает, что это сделано с целью разрешения точных уравнений движения «простым способом». «Интуитивным оправданием такого предположения является то, что каждый шар «нескоррелирован» с тем, что «интервал, лежащий перед ним, принадлежит **S**». Возражая Брикмону на то, что «это предположение выглядит вполне разумным», надо констатировать, что введенное описание принудительно, не свойственно самой детерминистской периодической системе, ликвидирует точную закономерность действия интервалов и периодичность через **2n** и очевидно приводит к необратимому выравниванию числа черных и белых шаров. Естественным является четко детерминированное движение, как оно задано. Введение чего-то сверх заданных свойств, а тем более того, что искусственно приводит к привычной необратимости и потере информации о системе, меняет саму задачу и дает ответ, не соответствующий природе системы.

Далее, в рамках другого способа, приводятся формулы точного динамического расчета. Вычисляют поведение во времени макроскопической переменной, определенной как разность числа белых и черных шаров. Затем предлагается рассмотреть все возможные начальные условия (фазовые траектории), то есть способы размещений промежутков **m** и **n-m** по окружности при фиксированном их числе. В результате, как заявляется, чисто динамически, а на самом деле с вмешательством статистики, получают тот же результат, что и в случае псевдостатистического описания с принудительным выравниваем. По поводу полученного результата говорится следующее: «для любого данного **t** (номер шага - Н.Г.) и для больших **n** подавляющее большинство кривых $\mathbf{(1/n)\cdot(N_w(t)-N_b(t))}$ будут приближаться к $\mathbf{(1-2m/n)^t}$».

В этом случае периодичность системы преодолена (отодвинута) взятием больших **n** (порядка числа Авогадро 10^{23}) и относительно малого **t** (порядка 10^6), тогда как возвращение обязательно при **t=2n**. То есть время возврата заведомо не достигается, и обязательная по строгому решению для всех траекторий необратимость просто скрыта, как и в ситуации, когда при увеличении фазового объема период Пуанкаре неограниченно увеличивается. Помимо того усреднение по разным траекториям означает усреднение по всем фазовым траекториям, в то время как теорема Клаузиуса утверждает стремление к равновесию для каждой отдельной траектории (системы) и реально мы наблюдаем для больших систем стопроцентное стремление к равновесию для одной системы. То есть предлагаемое решение не соответствует второму началу термодинамики в формулировке Клаузиуса.

Подводя итоги относительно необратимого характера поведения модели Каца, Брикмон говорит, что проблемы с возвратами Пуанкаре для системы могут быть легко разрешены: «…если бы мы не фиксировали (не ограничивали) **t** и устремили **n** к бесконечности, то не наблюдали бы «необратимого» поведения». Отметим, что, строго говоря, результат в данном случае зависит не только от выбора пределов, но и от скорости стремления к ним выбранных переменных. Действительно, если время наблюдения существенно отстает от времен периодичности при росте числа частиц, то обратимость вряд ли будет наблюдаема. Брикмон говорит, что такое отставание физически корректно в случае большого числа частиц. Однако эта реалистичность не лишает систему периодичности. Ссылки на краткость наблюдения не могут быть связаны с системой. У самой системы такой характеристики как время наблюдения нет. А раз уж **t** связано с наблюдателем, то и необратимость возникает как впечатление наблюдателя. Подобное объяснение было разработано Смолуховским.

Итак, в первом случае при рассмотрении отдельной системы был скрыт закон развития системы и заменен принудительным стремлением к выравниванию, полностью скрыта обязательная периодичность. Влияние конкретного расположения интервалов просто отсутствует.

Во втором же случае после нахождения точного решения уравнений движения, которое обязано приводить к возврату через **2n** шагов, периодичность преодолена взятием времени наблюдения за системой много меньшего периода ее возврата **2n**. Это как бы отменяет теорему Пуанкаре, а стремление к равнораспределению получается усреднением по всем возможным фазовым траекториям из одного и того же макросостояния, что не соответствует формулировке второго начала Клаузиусом. Брикмон признает обратимость системы и открыто признает, что необратимость получена стремлением числа частиц к бесконечности, то есть когда «время возврата огромно по сравнению с любым физически доступным временем», однако не признает, что эта необратимость является иллюзией наблюдателя. На самом деле признание Брикмоном периодичности отвергает доказательство Каца как доказательство действительной необратимости системы. А попытки переинтерпретировать результаты модельных расчетов в соответствии с длительностью времен возврата и относительной краткостью наблюдения все же не заканчиваются осознанием роли наблюдателя.

8(а). Модель Каца и эргодичность. Подводя итог обсуждению модели Каца, Брикмон говорит: «Хотя она и обладает всеми свойствами, которые применялись, чтобы показать, что механические системы не могут вести себя необратимо, и тем не менее это (модель Каца. - Н.Г.) является прекрасным контрпримером, который позволяет отвергнуть все эти аргументы (и понять точно, почему они не верны): она изолирована (шары плюс столкновения), детерминистична, обратима, обладает циклом Пуанкаре и не эргодична». На это можно возразить, что строгая самостоятельная необратимость системы не была получена, что уже было обсуждено нами выше. Следовательно, видно, что Брикмон не осознал положение дел с необратимостью.

Продолжая развивать мысль о том, что свойство эргодичности не является ни достаточным, ни необходимым для стремления системы к равновесию, Брикмон замечает, что «эта модель, хотя и совершенно необратима, эргодической не является». На самом деле система не может быть необратима, поскольку она периодична. Но она действительно не является эргодической: «Более того, поскольку она периодична, никакая траектория не может «посетить» более чем **2n** микроскопических конфигураций. Но «фазовое пространство» состоит из $\mathbf{2^n}$ конфигураций (две возможности - белый или черный шар в каждой позиции). Таким образом, только очень малая часть фазового пространства посещается траекторией». Но, во-первых, для одной неэргодической фазовой траектории Кац получил необратимость совершенно необоснованным приемом, не связанным с реальными свойствами системы. Во-вторых, надо отметить, чтоРаншерелем и Розенталем [30,31] было показано, что эргодических механических систем вообще не существует, и фазовая траектория зачерчивает в фазовом пространстве объем меры нуль.

В самом деле, идея подхода с эргодичностью системы по смыслу приложима к определению средних значений макровеличин на масштабе больших времен, что не позволяет наблюдать малые времена типа времен релаксации. И, следовательно, само движение системы к равновесию не может быть обнаружено, как и возможные будущие временные отклонения от равновесия, которые предсказываются теоремой Пуанкаре.

Планшерель и Розенталь доказали, что эргодических систем не существует. Позднее обратились к свойству квазиэргодичности, когда фазовая траектория зачерчивает фазовый объем «всюду плотно»: фазовая траектория заходит в любую ε-окрестность любой фазовой точки, не проходя через каждую фазовую точку, как при эргодичности. Квази-эргодичность, называемая сейчас просто эргодичностью, доказана для небольшого числа систем. В действительности требования к зачерчиванию траекторией фазового объема гораздо более слабые. И это видно на практике. Макро-величины, конечно, зависят от поведения частиц, но способ учета этого влияния, а именно всей траектории, дает неправильное представление о том, как движение частиц приводит к наблюдаемым.

На самом деле переход к большему равновесию соответствует не замазыванию фазового объема траекторией, а разбеганию частиц в координатном и импульсном пространстве. Реально наблюдаемое равновесное макросостояние получается при измерении одной системы, которая содержит только одну фазовую точку. Разбеганию частиц и импульсов соответствует подходящее положение фазовой точки в разрешенной области фазового пространства, причем таких положений подавляющее количество.

Возьмем два варианта. Рассмотрим распространение дыма из небольшой области по всему объему. Частицы быстро разбегаются по пустому объему, и мы видим весь объем равномерно окрашенным. В действительности фазовая траектория прошла небольшое расстояние, поэтому ни о какой эргодичности речи быть не может. Но мы наблюдаем не в фазовом пространстве, а в трехмерном, в котором частиц много, а не одна фазовая точка. При макроскопическом рассмотрении частицы наблюдаются неточно, и область кажется равномерно заполненной дымом. Таким образом для объяснения выравнивания распределения реально далеко не требуется никакой строгой эргодичности. Второй вариант - измеряем давление снаружи, например накачиваем мяч. Для того, чтобы он равномерно надулся, не необходимо, чтобы фазовая точка пробежала весь фазовый объем, то есть чтобы частицы соприкоснулись со всеми точками поверхности. Это опять же из-за того, что давление измеряется не в каждой точке пространства, а инерционно по отношению к конечным, реально никогда не бесконечно малым, участкам поверхности. Так что даже квазиэргодичность в теории оказывается слишком сильным требованием [13].

9. Эволюция реальных систем.

В разделе, посвященном реальным системам, Брикмон пишет: «Иногда утверждается, что по некоторым причинам (возвраты Пуанкаре, например), истинно изолированные системы никогда не достигнут равновесия. Но это не имеет значения, поскольку полной изолированности никогда не бывает, и внешние («случайные») возмущения (воздействия. - Н.Г.) всегда будут направлять систему к равновесию».

Во-первых, Брикмон отказом учитывать возвратную теорему подменяет задачу. Потому что задача обоснования статистической физики и состояла в том, чтобы согласовать второе начало термодинамики с возвратной теоремой, причем в модели. Во-вторых, утверждение, что наличие случайных воздействий всегда будет направлять систему к равновесию, неверно.

Необратимость необходимо доказать в случае, указанном Клаузиусом: стремится к равновесию отдельная замкнутая изолированная система. Если бы решение проблемы заключалось в неполной изолированности, об этом можно было бы сказать с самого начала. Пренебрежением роли теоремы Пуанкаре Брикмон оправдывает непринятие интерпретации Смолуховского.

Кроме того, при внешних не направляемых специально, то есть случайных воздействиях на систему, ее поведение будет практически случайным, поэтому вероятностно будут образовываться неравновесные состояния. И возвращения состояний будут соответствовать предсказаниям возвратной теоремы Пуанкаре, так как вероятностные оценки и оценки по Пуанкаре основываются на соотношениях фазовых объемов.

А вообще Н. С. Крылов писал, что объяснение случайности внутри системы внешними воздействиями лишь переносит проблему возникновения случайности в более крупную систему ([2], стр. 130).

В общем картина квазипериодического движения, указываемого теоремой Пуанкаре, согласуется со случайным вероятностным поведением частиц. Появление внешних воздействий приводит как бы к случайному поведению внутренней системы. И картина квазипериодичности практически не меняется - так же будут возникать флуктуации - отклонения от равновесия - с частотами, соответствующими их размерам (величинам).

Ссылаясь на то, что большинство реальных систем являются неравновесными, указывая на разные возможные способы введения и уточнения объективного, по его мнению, понятия энтропии, Брикмон говорит, что второе начало термодинамики позволит предсказывать поведение таких реальных систем. Конкретно он говорит, что при отсутствии внешних сил, которые в противном случае могут и должны быть обнаружены, «система никогда спонтанно не пойдет в маленький объем фазового пространства».

Это просто неверно, и по методу Пуанкаре-Цермело можно рассчитать время, через которое система обязательно войдет в указанный фазовый объем. А по вероятностным оценкам можно указать ожидаемое время.

Одним из оснований желания получить необратимость для механической системы как некий термодинамический эффект является ссылка на расплывание дыма, растекание тепла, разлет частиц газа при взрыве, но в случае неограниченного пространства эффект возникает чисто механически из-за разницы скоростей частиц.

10. Принцип отбора и необратимость. Брикмон резюмирует: «…макроскопическая система никогда не выпрыгивает из состояния равновесия спонтанно, более того, изолированные макроскопические системы всегда движутся к равновесию».

Такая формулировка в случае замкнутой изолированной системы практична, но наталкивает на вопрос: как вообще изолированная макроскопическая система может оказаться в неравновесном состоянии? Практически спонтанный скачок запрещен, а эволюция происходит только в сторону равновесия. Единственный естественный выход принять факт, что все изолированные системы, процессы в которых мы рассматриваем как пример необратимых, оказались обнаруженными в начальном неравновесном состоянии в данный момент не в ходе их собственного внутреннего развития при случайном наблюдении, а были приготовлены наблюдателем: путем внешних воздействием или объединением взаимно неравновесных систем и т.п. [13,22]. Сосуд, разделенный на две части: с газом и без, сжатый под поршнем газ, сахар в чае, холодное и горячее тела, приведенные в тепловой контакт - это все примеры искусственно созданных наблюдателем неравновесных систем. Вероятность изначально равновесной системе самостоятельно прийти к такой степени неравновесности, как в этих примерах, пренебрежимо мала.

С фактом приготовления неравновесного состояния связано объяснение Пригожиным второго начала термодинамики, которое Брикмон никак не затронул. Отвергая «иллюзию» [9], Пригожин вынужден получить реальную необратимость, а не иллюзорную. Добавим, что Пригожин вроде бы пытаясь объяснить необратимость как конечный итог, на самом деле рассматривает только вопрос однонаправленности развития в начальный период. Он объясняет однонаправленность движения в начальный период времени введением принципа отбора, которому якобы следует природа и состоящего в том, что «по тем или иным причинам физически реализуются не все состояния или начальные условия, допустимые при динамическом описании, а лишь ограниченный набор состояний, *обладающих асимметрией во времени требуемого типа*» ([9], стр. 227). То есть утверждается, что необратимое стремление к равновесию замкнутой изолированной системы порождается «асимметричной природой физически допустимых состояний». Реально он постулирует, что в природе в начальный момент скорости частиц оказываются такими, что происходит движение к равновесию. Столько же противоположных скоростей запрещены.

Как он сам комментирует, введение такого принципа подобно постулированию Эйнштейном постоянства скорости света, на основе которого были пересмотрены все остальные представления о пространстве и времени. «Аналогичным образом поступаем и мы, когда, не пытаясь объяснить второе начало термодинамики как кажущееся свойство, связанное с той или иной аппроксимацией (или вводимыми в динамику тем или иным «незнанием»), постулируем второе начало термодинамики как фундаментальный физический факт и пытаемся выяснить, к каким изменениям в наших представлениях о пространстве, времени и динамике приводит принятие такого постулата».

Однако введение постоянства скорости света непротиворечиво согласовало описание, а введение нового постулата в фундаментальные свойства мира - шаг в данном случае слабо обоснованный, но что важнее, идущий вразрез с хорошо известными свойствами механики. Даже если представить, что физически реализуема лишь та половина (по равновероятности) начальных состояний, что на начальном этапе ведет к равновесию, то по механической теореме Пуанкаре о возвращениях в системе будет иметься обратное движение к неравновесию, возвращение к начальному состоянию (с исходными, а не обращенными скоростями). Таким образом, согласование термодинамики с механикой, требуемое на модельном уровне, не достигается путем введения принципа отбора, а объективные хорошо известные трудности в этом вопросе просто заметаются под ковер. Более детально ситуация с принципом отбора Пригожина обсуждается в [28]. Здесь решение с приготовлением неравновесного начального состояния уже было изложено выше.

11. Роль хаоса в образовании структур. Брикмон обсуждает пригожинскую концепция «конструктивной роли» диссипации и высказывания его сторонников о том, что с теорией хаоса отпадает необходимость теории естественного отбора. Отстаивая теорию Дарвина, Брикмон доказывает, что конструктивной роли хаос нести не может, как не может и объяснить существования живых существ, как некоторой заметной и устойчивой флуктуации. На основе теории хаоса и второго начала термодинамики невозможно получить эволюцию, расхождение видов, «и, что более важно, сложность живых существ». Со своей стороны, касательно устойчивых макроструктур добавим, что в их образовании хаос конструктивной роли не играет. Хаос, точки бифуркации лишь разделяют области с разными характерами макроскопических движений, а уж при попадании в какую-то конкретную область система стабильно ведет себя некоторым определенным, согласующимся с данными условиями, образом. Образующиеся, например, в жидкости макропотоки являются не результатом диссипации, существуют не вследствие трения, а проходят **при** диссипации и обусловлены большей эффективностью макропотоков по сравнению с диффузным движением. Картина кратера с венчиками при падении капли в воду, картина водяной воронки являются устойчивой и, очевидно, не являются следствием хаоса.

12. О характере измерения. Стараясь указать простой путь к пониманию термина «энтропия», Брикмон на первом же шаге совершает принципиальную ошибку, предлагая рассмотреть *мгновенные* значения некоторых макроскопических параметров. Таких не существует и существовать не может, ибо если рассматривать некую систему с идеальным газом, то давление в этой системе, как следствие взаимодействия со стенками точечных разреженных частиц, мгновенно измерить нельзя. Мгновенно его вообще нет. Нужен ненулевой интервал времени для измерения. И результат измерения будет тем точнее, чем больше этот промежуток времени. Максимальная точность (скажем, в отношении определения энергии газа) достигается в случае бесконечного времени измерения

Напомним, что, вообще говоря, в термодинамике имеет смысл рассматривать и характеризовать квазистатические процессы, изменения в которых происходят бесконечно долго и уж ни о каких абсолютно мгновенных характеристиках там говорить не приходится (см. также [20] стр. 43).

Далее, пытаясь описать энтропию системы более точно, Брикмон заблуждается, утверждая, что не существует резкой границы между микро- и макропараметрами. Пытаясь продемонстрировать это, он разбивает макроскопический объем до рубежа, на котором происходит переход к микромасштабу, утверждая, что так возможно перейти к микроописанию. Мелкое дробление первоначального объема, по идее, должно привести к более полному, тщательному описанию общей энтропии как суммы большого числа в конечном счете микроскопических объемов. По замыслу автора, разбиение должно быть настолько мелким, что, в конце концов, возможно, будет оперировать микроскопическими переменными, то есть характеристиками отдельных частиц. Но здесь надо учесть, что невозможно счетным числом операций разбиений свести конечный объем к масштабу точечных центров масс частиц. Так же, как невозможно зачертить квадрат счетным числом прямых линий. Или как невозможно заполнить отрезок бесконечным числом рациональных чисел.

Даже если такое разбиение было бы возможно или было осуществлено другое, достаточно мелкое дробление, то это совсем не означало бы, что представление об исходной системе, сформированное теперь на основании суммирования энтропий подобъемов, было бы не то что более точно, а хоть сколько-нибудь адекватно. Поскольку представление об этих частностях в отдельности не несло бы никакого представления о более или менее значительных пространственных неоднородностях системы и их взаимном расположении. Тем более, что ответ зависел бы от формы ячеек разбиения. Макроописание несводимо к микроописанию. Именно из-за невозможности устроить ячейки размером с точку в классической термодинамике энтропия определяется с точностью до константы. В случае квантовой термодинамики фазовый объем можно соотносить с квантовой неопределенностью. Поэтому в квантовом случае энтропии можно приписать абсолютное значение.

Вместо заключения.

Длительное занятие данной темой привело к пониманию причин множественных недопониманий, толкований и разногласий в отношении обсуждавшихся вопросов. Причины эти обусловлены многосторонностью рассматриваемой проблемы. Разрешение ее не сводится к построению одной или нескольких формул, как во многих других темах. Кроме того, как показывают изложенные рассуждения, решение следует искать также с учетом вклада наблюдателя, что непривычно для традиционной физики. Многогранность вопроса не позволяет даже кратко перечислить относящиеся к делу аспекты и создает большие трудности в построении полной и четкой картины.

Литература

1. Ehrenfest P., Ehrenfest-Afanassjewa T., The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics, New York: Cornell University Press, 1959; translation of «Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik», in Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Volume IV/2/II/6, Leipzig: B.G. Teubner, 1912.
2. Крылов Н. С. Работы по обоснованию статистической физики. - М.: Изд. АН СССР. 1950.
3. Тер-Хар Д. Основания статистической механики // Успехи физических наук, 1956. Т. 59. С. 60.
4. Власов А. А. Статистические функции распределения. - М.: Наука, 1966.
5. Власов А. А. Нелокальная статистическая механика. - М.: Наука. 1978.
6. Гуров К.П. Основания кинетической теории. Метод Боголюбова. - М.: Наука, 1966.
7. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. Т. 2. - М.: Мир, 1978.
8. Боголюбов Н. Н. О некоторых проблемах, связанных с обоснованием статистической механики // История и методология естественных наук. Вып. XXX. Физика. - М.: Изд-во МГУ, 1983, с. 3-8.
9. Пригожин И. Р. От существующего к возникающему. - М.: Наука, 1985.
10. Смолуховский М. Молекулярно-кинетические исследования по вопросу об обращении термодинамически необратимых процессов и о возврате аномальных

состояний // Эйнштейн А., Смолуховский М. / Броуновское движение. - Л.: ОНТИ, 1936. С. 303.

11. Смолуховский М. Доступные наблюдению молекулярные явления, противоречащие обычной термодинамике // Эйнштейн А., Смолуховский М. / Броуновское движение. - Л.: ОНТИ, 1936. С. 197
12. Bricmont J. Science of Chaos or Chaos in Science? // Physicalia Magazine, 17, 159-208 (1995).
13. Губин В. Б. Физические модели и реальность. Проблема согласования термодинамики и механики. - Алматы: МГП «Демеу» при изд. «Руан» Минпечати Республики Казахстан, 1993.
14. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. - М.: Физматгиз, 1960.
15. Пригожин И. Р. Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. - М.: Едиториал УРСС, 2003.
16. Лаплас П. С. Изложение системы мира. - Л.: Наука, 1982 (с. 364-365).
17. Инфельд Л. Мои воспоминания об Эйнштейне // Успехи физических наук Т. LIX, вып. 1, 1956, с. 147.
18. Мизес Р. О причинной и статистической закономерности в физике // Успехи физических наук, Т. X, выпуск 4, 1930.
19. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. - М.: Наука, 1975 (§80, пп. 1 и 6).
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. - М.: Наука, 1976.

21. Губин В. Б. О проблеме согласования термодинамики и механики // О физике, математике и методологии. - М.: ПАИМС. 2003. С. 8.
22. Губин В. Б. О приготовлении неравновесных состояний/ О науке и о лженауке. - М.: Изд. РУДН. 2005. С. 17-27.
23. Френкель В. Я. Пауль Эренфест - ученый и человек // Успехи физических наук. Т. 98, вып. 3, 1969.
24. Терлецкий Я.П. Статистическая физика. - М.: Высшая школа. 1966, 1973.
25. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. - М.: Наука, 2002.
26. Нейман И. Математические основы квантовой механики. - М.: Наука, 1964. С. 156.
27. Wang G. M., Sevick E. M., Mittag E., Searles D.J., Evans D.J. Experimental Demonstration of Violations of the Second Law of Thermodynamics for Small Systems and Short Time Scales // Physical Review Letters, 89, 050601 (2002).
28. Губин В. Б. История с энтропией //О физике, математике и методологии. - М.: ПАИМС. 2003. С. 76.
29. Кац М. Вероятность и смежные вопросы в физике. Гл. III, п. 14. - М.: Изд. Мир. 1965.
30. Rosenthal A. // Ann. d. Phys., 1913. B. 42, S. 796; 1914. B. 43, S. 894.
31. Planscherel M. // Ann. d. Phys., 1913. B. 42. S. 1061.

Надежда Валерьевна Губина

ПРОДОЛЖЕНИЕ О ХАОСЕ

Издание подготовлено в авторской редакции

Подписано в печать 08.02.2010 г. Формат 60х84/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 5,12. Тираж 200 экз. Заказ 92

Российский университет дружбы народов
117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Типография ИПК РУДН
117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. 952-04-41