

Общие проблемы истории естествознания и техники

С. Д. ХАЙТУН

ФЕНОМЕН АВТОРСКОЙ ИСТОРИКО-НАУЧНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ НА МАТЕРИАЛЕ СТАТЬИ ПАУЛЯ И ТАТЬЯНЫ ЭРЕНФЕСТОВ 1911 ГОДА

В статье предлагается к обсуждению тезис, согласно которому реконструкция событий прошлого науки, т. е. их переосмысление с позиций науки сегодняшнего дня, может и должна быть авторской. Историк науки, проводя такую реконструкцию, должен стремиться к тому, чтобы предельно четко сформулировать свои научные, например, физические, позиции, которые могут в чем-то отличаться от общепринятых. Этот тезис иллюстрируется при обсуждении известной статьи Пауля и Татьяны Эренфестов «Концептуальные основания статистического подхода в механике». Как полагает автор, оценивая проведенный ими анализ проблемы необратимости и эргодической гипотезы с современных позиций, мы должны были бы признать его глубоко ошибочным, однако это не помешало статье служить солидным основанием для плодотворной теоретической работы нескольких поколений физиков в указанных Эренфестами направлениях. В первом случае это решение проблемы необратимости на основе схемы перемешивания Гиббса, во втором – поиски доказательства эргодической гипотезы. Несмотря на тупиковость, с точки зрения автора, обоих направлений, статья Эренфестов имела для развития физики большое положительное значение, выводя ее благодаря своеобразному «туннельному эффекту» на идеи синергетики и теории фракталов. Эта история свидетельствует, в частности, о том, что нельзя отказывать в публикации научных текстов из-за их ошибочности, решающее значение имеет научный уровень, на котором выполнены работы.

Ключевые слова: авторская историко-научная реконструкция, Пауль и Татьяна Эренфесты, проблема необратимости, перемешивание, эргодическая гипотеза, ансамблевый подход, временной подход, теория динамического хаоса, синергетика, фракталы.

Феномен авторской историко-научной реконструкции

Реконструируя то или иное историко-научное событие, многие историки науки до сих пор претендуют на «объективность» и «беспристрастность» изложения: на изображение того, что было на самом деле, а не того, каким прошедшее представляется наблюдателю, т. е. самому историку науки. Эта претензия – следствие авторского самообмана, чреватого неизбежным обманом читателей. Развитие науки и философии науки в XX в. показало тщет-

ность подобных претензий и необходимость возможно более четкого заявления историком науки своих позиций. В том числе и конкретно-научных, например, физических, чего историки науки, как правило, не рискуют делать, опасаясь резкой критики со стороны экспертов, представляющих конкретные дисциплины. О довольно-таки скептическом отношении научного сообщества к историкам и философам науки позволяет судить такое, например, высказывание лауреата Нобелевской премии по физике 2003 г. В. Л. Гинзбурга:

...несомненно, что науковедение и история науки, подобно художественной литературе и в отличие от естественных наук, в особенно заметной мере должны быть обращены вовне – рассчитаны не только на специалистов, но, если угодно, рассчитаны также на «потребителя». Художественная литература, которую читают только литературоведы, это не «большая литература». И читатели, даже весьма далекие от литературоведческих кругов, имеют право судить о художественной литературе, причем их мнение является вполне существенным. Аналогично *физик или астроном имеют право голоса при обсуждении книг по истории науки и науковедению, в то время как высказывания неспециалистов* (под которыми здесь подразумеваются, как это видно из контекста, также и историки науки. – С. Х.) *о физике и астрономии в большинстве случаев вызывают лишь сожаление или раздражение со стороны профессионалов* (курсив мой. – С. Х.)¹.

Между тем предметное поле науки, в котором работают историки науки, имеет сложную (фрактальную) структуру, состоящую из конкурирующих друг с другом теорий, парадигм, исследовательских программ и пр. Эволюция научного знания также фрактальна, что проявляется в его развитии через каскад точек ветвления теорий, парадигм и т. д. Скажем, от механики Ньютона в начале XX в. отпочковались квантовая механика и теория относительности. При этом не все эволюционные линии научного знания имеют общий корень, а между ветвями эволюционных мутовок часто возникают рокадные связи², ввиду чего «дерево научного познания» имеет вид не натурального «дерева» с одним корнем, но, как иногда говорят применительно к органической эволюции, «мангровых зарослей». Игнорирование «мангрового» характера научного знания наносит истории науки немалый ущерб, однако, увы, многие историки науки до сих пор этим грешат:

Занимаясь реконструкцией фундаментальных теорий, вошедших в золотой фонд науки, историки науки [...] сосредотачиваются на всестороннем изучении процесса формирования этих теорий [...] в качестве предмета реконструкции выбираются теории, признанные фундаментальными в настоящее время [...] Теории же, на которые некогда возлагались большие надежды, но все же уступившие в конкурентной борьбе ныне общепри-

¹ Гинзбург В. Л. Как развивается наука? Замечания по поводу книги Т. Куна «Структура научных революций» // Природа. 1976. № 6. С. 73–74.

² Иногда говорят о ретикулярном (сетчатом) характере органической эволюции (лат. *reticulum* – сеточка). Таков же характер и универсальной эволюции, т. е. эволюции всего сущего, включая неорганическую, органическую и социальную эволюцию (Хайтун С. Д. Феномен человека на фоне универсальной эволюции. М., 2005. Разд. 4.6.2).

знанным, отодвигаются на второй план [...] Эти подходы, линии развития рассматриваются в настоящее время как отвергнутые, тупиковые и потому нередко выпадают из рассмотрения или явно недооцениваются [...] Истины «историко-научного разума» обедняются и деформируются при игнорировании или «обрубании» тупиковых линий развития. Более того, нередко оказывается, что многие важные понятия и концепции победивших теорий возникают на этих побочных путях. Даже в физике XX в. существовали крупномасштабные теоретические проекты, которые владели умами десятков выдающихся ученых на протяжении десятилетий, но так и не завершились успехом и были признаны ошибочными. Понять же развитие физики в эти периоды без изучения такого рода проектов и соответствующих линий развития просто невозможно ³.

При более широком взгляде на вещи центральная задача истории науки видится в реконструкции всего эволюционного древа («мангровых зарослей») научных теорий и всего научного знания в целом, со всеми его тупиками, взаимодействием магистральных, альтернативных и тупиковых ветвей и т. д. Выполнение этой грандиозной самой по себе задачи еще более осложняется тем обстоятельством, что по самому роду своей работы историк науки

должен переизложить тексты так, чтобы показать рост, или развитие, знаний. Естественно, что критерием развития служит достигнутый современный уровень развития науки. Соответственно, интерпретация и истолкование текстов «прошлого» совершается через призму современных представлений ⁴.

По идее, история науки должна «перетряхивать» всю свою реконструкцию прошлого науки после каждого фундаментального изменения современной научной картины мира, которые происходят достаточно регулярно. Новейшие открытия вызывают переход ко все новым парадигмам, которые следует каждый раз «опрокидывать» на прошлое науки: «Наука постоянно “переписывает” свое прошлое [...] отчего и история науки выглядит как непрерывный “рост знаний”» ⁵.

Однако на деле все еще сложнее. Современная наука, как и наука прошлых веков, устроена фрактально, представляя собой настоящие «мангровые джунгли». Поэтому, «опрокидывая» на реконструируемое им историко-научное событие новейшие парадигмы, историк науки вынужденно делает это выборочно, принимая во внимание одни из них и не признавая (считая ошибочными или «пока еще неустоявшимися») другие. Никакой общепринятой научной картины мира не существует, каждый ученый, в том числе и историк науки, держит в голове собственную. Вот с такой авторской научной картиной мира и работает каждый конкретный историк науки, изучая то или иное историко-научное событие и «опрокидывая» на него якобы общепринятую и якобы объективную научную картину мира. И чем более четко артикулирует он свою

³ Визгин Вл. П. Проблема истины в историко-научных исследованиях // ВИЕТ. 2007. № 1. С. 16–17.

⁴ Кузнецова Н. И. Наука в ее истории. М., 1982. С. 84.

⁵ Там же. С. 87.

субъективную картину мира, тем более объективно его исследование, тем более оно научно. *Историко-научная реконструкция должна быть возможно более явно авторской*, что включает в себя ее возможную ошибочность. Историк науки, как и «простой» ученый, имеет право на ошибку. С теми же ограничениями, какие действуют в конкретных научных дисциплинах: ошибка историка науки не должна быть следствием низкого профессионального уровня или простой невнимательности – такие ошибки должны, естественно, устраняться. Речь идет именно о парадигмальном наполнении его концепции, которое может оказаться несостоятельным.

Знаменитая статья Пауля и Татьяны Эренфестов «Принципиальные основы статистического подхода в механике» 1911 года⁶ выбрана нами для иллюстрации высказанных историко-методологических положений не случайно. Будучи посвящена проблемам обоснования статистической физики и сыграв в развитии этой дисциплины большую роль, эта статья выражает воззрения физиков тех лет на проблему необратимости и природу феномена стохастического движения механической системы, воззрения, которые сегодня в значительной степени устарели. Вместе с тем в отношении указанных проблемы и феномена по сию пору не выработано единой точки зрения, что делает проводимую далее историко-научную реконструкцию статьи Эренфестов вынужденно и существенно авторской. Выражаться это будет, прежде всего, в возможно более четкой артикуляции собственной точки зрения автора этих строк на проблему необратимости и феномен стохастического движения механической системы, находящиеся в центре внимания Эренфестов в этой статье.

Несколько слов об истории ее написания. Пауль Эренфест (1880–1933) получил заказ на обзорную статью по основаниям статистической механики от Феликса Клейна, главного редактора «Энциклопедии по математическим наукам», издававшейся в Германии в начале XX в. Заказ носил чрезвычайно ответственный характер, в авторы статьи первоначально намечался Л. Больцман. Но он в 1906 г. ушел из жизни, Гиббса не стало в 1903 г., Максвелла не было уже более четверти века, а новые ученые их калибра в статистической физике еще не успели появиться (статьи по статистической физике 1902–1905 гг. А. Эйнштейна, сотрудника бюро патентов, пока всерьез не воспринимались). Остановились на Эренфесте, несмотря на его молодость (в 1906 г. ему было всего 26 лет), потому что, во-первых, он, как говорится, подавал надежды, а во-вторых, защитил у Больцмана докторскую диссертацию и считался кем-то вроде его преемника. Эренфест отнесся к заказу со всей ответственностью, отдав статье несколько лет жизни, подключив к работе над ней жену, Татьяну Афанасьеву-Эренфест (1876–1964), и взяв на себя окончательную редакцию

⁶ *Ehrenfest, P., Ehrenfest, T. Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik // Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften. Leipzig, 1911. Bd. 4. Teil 2. H. 6. S. 32–131. Англ. пер.: Ehrenfest P., Ehrenfest T. The Conceptual Foundation of the Statistical Approach in Mechanics. Ithaca, 1959. Рус. пер.: Эренфест П., Эренфест Т. Принципиальные основы статистического подхода в механике // Пуанкаре А., Эренфесты П. и Т., Нейман Дж. фон. Работы по статистической механике. М., 2011. С. 43–131.*

материала. Статья писалась несколько лет в Санкт-Петербурге, где они в 1907–1911 гг. жили и работали.

В силу критического склада ума Эренфеста обзор оснований статистической механики трансформировался в обзор *проблем ее обоснования*. Таких проблем, как уже говорилось, Эренфесты видели две – проблему необратимости и эргодическую гипотезу.

Статья Эренфестов: решение проблемы необратимости на основе схемы перемешивания Гиббса

Проблема необратимости состоит в противоречии между симметричностью по времени уравнений механики Ньютона – Гамильтона, мир которой, таким образом, обратим, и несимметричностью по времени, т. е. необратимостью, подавляющего большинства реальных процессов, включая эволюцию. В физику необратимость вносится законом возрастания энтропии. Поскольку же понятие энтропии имеет существенно статистическую природу, проблема необратимости оборачивается противоречием между механическими нестатистическими системами, которые сплошь обратимы, и механическими статистическими системами, которые могут быть как обратимыми (таковы, в частности, равновесные системы с постоянной / максимальной энтропией), так и необратимыми (таковы статистические системы с возрастающей энтропией). Вопрос звучит следующим образом: каким образом в статистической механике, которая традиционно опирается на симметричные по времени уравнения Ньютона – Гамильтона, возникает необратимый рост энтропии?

Проблема необратимости имеет богатую историю, принесшую множество попыток решения проблемы. Свои решения предложили Л. Больцман, Дж. К. Максвелл, Э. Цермело, Дж. В. Гиббс, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, М. Смолуховский, М. Планк, авторы метода вывода кинетических уравнений ББГКИ (Н. Н. Боголюбов – М. Борн – Г. Грин – Дж. Кирквуд – Ж. Ивон), Дж. фон Нейман, Л. Д. Ландау, Л. Ван-Хов, И. Пригожин, Н. С. Крылов, Я. Г. Синай и многие другие, однако общепринятого решения этой проблемы не существует по сей день. Все эти решения, за одним исключением, о котором будет сказано чуть далее, предполагают сохранение уравнений Ньютона – Гамильтона в области необратимых процессов.

У автора этих строк есть собственная точка зрения на проблему необратимости, изложенная в монографии «Механика и необратимость»⁷ и пока отнюдь не общепринятая. В книге рассмотрены все решения этой проблемы, какие мне только удалось обнаружить в литературе, и показана, как я считаю, их несостоятельность, а в выводах несимметричных по времени кинетических уравнений и уравнений переноса из симметричных по нему уравнений механики выявлены ошибки. Говоря точнее, всякий раз, когда из симметричных по времени уравнений гамильтоновой механики выводят то или другое необратимое уравнение, имеет место фактический, но никак не оговаривае-

⁷ Хайтун С.Д. Механика и необратимость. М., 1996.

мый отказ в ходе вывода от гамильтоновой механики в области необратимых процессов.

Анализ существующих попыток решения проблемы необратимости приводит и к другому выводу: современная статистическая теория необратимых процессов не предоставила ни одного доказательства того, что механика Ньютона – Гамильтона справедлива за пределами области обратимых процессов или что необратимость может быть внесена в теорию путем добавления к гамильтоновой механике каких-либо «необратимых» предположений.

Так мы приходим к заключению, что симметричные по времени уравнения классической и квантовой механики, теории электромагнетизма, специальной и общей теории относительности в области необратимых процессов не работают⁸ и должны быть заменены здесь на некоторые другие, несимметричные по времени. Современная «гамильтонова» теория необратимых процессов, показывается в монографии, де-факто негамильтонова. Таковы, в частности, в синергетике порождающие фракталы уравнения движения – все они не только несимметричны по времени, но и несовместимы с гамильтоновой механикой⁹. Мне встретилась только одна работа¹⁰, автор которой, Ж. Салмон, так же как и автор этих строк, только раньше, пришел к выводу о неприменимости гамильтоновой механики в области необратимых процессов¹¹.

На момент написания Эренфестами обсуждаемой статьи было предложено уже достаточно много разных решений проблемы необратимости – Максвелла, Больцмана, Цермело, Гиббса, Эйнштейна, Смолуховского и др. Эренфесты выбрали и решительно взяли на вооружение одно из них – решение Гиббса, изложенное им в 12-й главе его «Статистической механики»¹².

⁸ Квантовая механика, как известно, заменяет в гамильтоновой механике динамические величины на операторы, в ней есть свои уравнения Гамильтона и Лиувилля, а уравнение Шрёдингера – это «просто» квантовая версия уравнения Лиувилля в случае чистого ансамбля. Заметим также, что несимметричные по времени уравнения (законы) Кирхгофа, включая, например, закон Ома, не входят в симметричные по времени уравнения Максвелла и не могут быть из них выведены.

⁹ Хайтун С. Д. Место синергетики в структуре физического знания // Исследования по истории физики и механики. 1995–1997. М., 1999. С. 236–267; Хайтун. Феномен человека... Разд. П.5.5.1; Хайтун С. Д. От эргодической гипотезы к фрактальной картине мира: рождение и осмысление новой парадигмы. М., 2007. Разд. 3.5.1.

¹⁰ Salmon, J. Equations cinétiques et forces dissipatives // Annales de l'Institut Henri Poincaré. Section A. 1982. Vol. 37. P. 271–294.

¹¹ Ж. Салмон предложил также свой вариант негамильтоновой статистической теории таких процессов (Хайтун. Механика и необратимость... С. 185–186). Предложенное им конкретное обобщение гамильтоновой механики на область необратимых процессов, однако, представляется некорректным. Дело в том, что Салмон соединяет в принципе несоединимые подходы – кинетический и фрактальный (непрерывный и дискретный), выписывая одновременно и уравнения для фазовой плотности, и для степеней свободы, тогда как в области необратимых процессов эти два подхода исключают друг друга. Такова во всяком случае точка зрения автора этих строк. Один из этих двух подходов – фрактальный – уже благополучно развивается, а второй – негамильтоновый кинетический – еще необходимо создать. Такая попытка, впрочем, также была мною предпринята с выводом несовместимых с гамильтоновой механикой кинетических уравнений (Там же. Гл. 5–10).

¹² Gibbs, J. W. Elementary Principles in Statistical Mechanics, Developed with Especial Reference to the Rational Foundations of Thermodynamics. New York, 1902 (рус. пер.: Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М., 1982. С. 350–508).

В предложенном Гиббсом решении проблемы необратимости, как и во всей его статистической механике, последовательно реализуется идея статистического описания, основанного на представлении о *статистическом ансамбле* механических (микро)систем и уравнении Лиувилля для фазовой плотности, полученном им в 1884 г.¹³ Гиббс весь «сидит» в гамильтоновой механике, возводя в своей книге еще один ее – статистический – этаж. Статистические исследования, пишет Гиббс, «принадлежат к разделу механики, обязанному своим происхождением стремлению объяснить законы термодинамики, исходя из принципов механики»¹⁴.

Э. Цермело первым связал проблему необратимости с объемом фазовой жидкости статистической системы¹⁵. Рост энтропии, указал он, соответствует росту фазового объема, тогда как, согласно теореме Лиувилля гамильтоновой механики, этот объем должен оставаться постоянным:

Я думаю в соответствии с определением Пуанкаре, что вероятность появления определенного свойства молекулярных состояний, например, определенного значения функции S (энтропии. – С. Х.), может быть измерена только «протяженностью» у «области» g всех возможных состояний, обладающих этим свойством, разделенной, конечно, на полную протяженность Γ области G , содержащей все возможные состояния. Но по теореме Лиувилля объем u не зависит от времени; любое такое значение функции должно иметь такую же вероятность в более позднее время, как и в начальный момент, и на основании теории вероятностей не ожидается общее возрастание или убывание¹⁶.

Цермело, однако, не фиксировал внимания на этом противоречии: он брал получаемую с помощью теоремы Лиувилля теорему возврата Пуанкаре и, уже опираясь на нее, утверждал, что механическая теория не согласуется со вторым началом и потому должна быть пересмотрена. Гиббс же все свое внимание сосредоточивает именно на увеличении фазового объема системы, связанном с ростом энтропии, стремясь примирить этот рост с требованием гамильтоновой механики, состоящим в постоянстве этого объема во времени. И ему удалось найти весьма правдоподобное разрешение этого противоречия, выйдя на идею *систем с перемешиванием*.

Идея решения Гиббса состоит в описании роста фазового объема необратимой системы как происходящего в процессе перемешивания фазовой жидкости со все большим ее изрезыванием. Фазовая жидкость мыслится здесь, как того требует теорема Лиувилля гамильтоновой механики, несжимаемой, а занимаемый ею «огигающий» объем фазового пространства полагается растущим в соответствии с ростом энтропии за счет возникновения в этой

¹³ Gibbs, J. W. On the Fundamental Formula of Statistical Mechanics with Application to Astronomy and Thermodynamics // Proceedings of the American Association for the Advancement of Science. 1884. Vol. 33. P. 57–58.

¹⁴ Гиббс. Термодинамика. Статистическая механика... С. 350.

¹⁵ Zermelo, E. Über mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge // Annalen der Physik und Chemie. Folge 3. 1896. Bd. 59. S. 793–801 (рус. пер.: Больцман Л. Избранные труды. М., 1984. С. 452–458).

¹⁶ Больцман. Избранные труды... С. 454.

жидкости связанной сети ускользающе малых лакун. Принимается, что *точная*, или *мелкозернистая* (*fine-grained*), фазовая плотность вследствие несжимаемости этой жидкости подчиняется симметричному по времени уравнению Лиувилля, тогда как *грубая*, или *крупнозернистая* (*coarse-graining*), фазовая плотность, соответствующая «грубой» фазовой жидкости с растущим объемом, удовлетворяет тому или другому несимметричному по времени кинетическому уравнению.

Решение Гиббса, которого придерживаются сегодня, надо сказать, многие физики, на мой взгляд, ошибочно. Кратко изложу здесь аргументы, приведенные в моей монографии¹⁷.

Прежде всего, в решении Гиббса и обратимость, и необратимость имеют место для фазовой плотности, т. е. для ансамбля микросистем. По Гиббсу, таким образом, дело совсем не в том, что необратимость возникает на статистическом, или макроскопическом, уровне описания, а на уровне микроскопическом движение необратимой системы обратимо, как это полагается в решении Максвелла–Больцмана. *Решение Больцмана отменяется решением Гиббса*. Неправы поэтому, на мой взгляд, те физики (включая Эренфеста) и историки физики, которые подают *оба* решения как справедливые.

Само по себе введенное Гиббсом фазовое перемешивание имеет физический смысл и несет важную нагрузку в эргодической теории, теории динамического хаоса и синергетике, отвечая за стохастику. Более того, сегодня в синергетике реализован описанный Гиббсом процесс образования связанной сети исчезающе малых лакун за счет изрезывания фазовой жидкости. Правда, увеличение объема фазового пространства, занимаемого фазовой жидкостью, происходит при этом за счет коренной перестройки топологии фазовой жидкости, приобретающей *фрактальную структуру*, вследствие чего – такова точка зрения автора этих строк – написание и уравнения Лиувилля для точной фазовой плотности, и кинетических уравнений для грубой плотности становится невозможным.

Хотя само по себе фазовое перемешивание, таким образом, физически вполне осмысленно, предложенное Гиббсом на основе разведения *точного* и *грубого* перемешивания решение проблемы необратимости представляется несостоятельным. В защиту этого тезиса могут быть выдвинуты следующие три группы аргументов.

1. Аргументы первой группы связаны с основной заключенной в решении Гиббса идеей, согласно которой рост энтропии отождествляется с ростом объема «грубой» фазовой жидкости. Для *конечного* времени перемешивания фазовые ячейки, чтобы констатировать необратимость, приходится брать также *конечных* размеров. Так как размеры ячеек связаны с точностью наблюдения, то в решении Гиббса подключается наблюдатель, но подключается он здесь противоестественным образом. А именно, система становится в решении Гиббса все более обратимой с *увеличением* точности наблюдения, тогда как в действительности все происходит прямо наоборот: система выглядит все более обратимой с *уменьшением* точности наблюдения. Например, в случае газа бильярдных шаров при грубом рассмотрении столкновения могут

¹⁷ Хайтун. Механика и необратимость... С. 108–112.

выглядеть упругими и, следовательно, обратимыми. Увеличив точность наблюдения, мы заметим возникающие на шарах при столкновениях дефекты, что заставит нас счесть столкновения необратимыми. Любой экспериментатор знает, что если какой-то эффект наблюдается с уменьшением точности измерения и исчезает с ее увеличением, то он вносится прибором, т. е. является *артефактом*, или *иллюзией*. Такой иллюзией и оказывается в решении Гиббса необратимость¹⁸.

2. Вторая группа аргументов направлена против идущего от Гиббса и широко сегодня распространенного убеждения в том, что *перемешивание всегда необратимо*. Представление об обязательной необратимости перемешивания фазовой жидкости подкреплено у Гиббса аналогией с перемешиванием красителя в несжимаемой жидкости, причем перемешивание, утверждает он, может идти с диффузией или без нее – «очевидно, что результат не зависит от наличия этого процесса»¹⁹. Это утверждение Гиббса заведомо ошибочно, поскольку точно известно, что движение жидкости необратимо именно при наличии диффузии или какого-либо другого процесса переноса, если же таковые отсутствуют, то движение жидкости обратимо²⁰. *Фазовое перемешивание может быть как обратимым, так и необратимым*. В первом случае, в отличие от второго, оно происходит без образования лакун и, следовательно, без роста объема фазового пространства, ею занимаемого. Именно обратимое перемешивание имеет место в равновесных газах и жидкостях.

3. Аргументы третьей группы говорят о *логической ошибке*, которая содержится в решении Гиббса и которая состоит в объединении под одной крышей двух разных физических моделей – модели обратимой системы, описываемой точной фазовой плотностью, и модели необратимой системы, описываемой грубой плотностью. Чтобы разрешить противоречие между необратимостью реальных систем и обратимостью гамильтоновых, здесь просто складывают эти две несовместимые модели, образуя гибрид, обладающий свойствами обеих, но не являющийся физической системой и ни в коей мере не решающий проблему необратимости.

Совсем просто: один и тот же процесс нельзя описывать одновременно симметричной по времени точной фазовой плотностью и несимметричной по нему грубой плотностью. Или – или, в противном случае мы не в ладах с элементарной логикой. Или мы используем точную плотность и, соответственно, считаем процесс обратимым, или грубую, считая процесс необратимым.

Можно сделать и более сильный вывод. Грубая фазовая плотность, говорим мы, удовлетворяет несимметричному по времени кинетическому уравнению и потому не удовлетворяет симметричному по времени уравнению Лиувилля. Поскольку же фазовая плотность гамильтоновой системы необходимо подчи-

¹⁸ Аналогичные возражения против решения Гиббса выдвигают и некоторые другие авторы (Blatt, J. M. An Alternative Approach to the Ergodic Problem // Progress of Theoretical Physics. 1959. Vol. 22. Iss. 6. P. 745–756; Хакен Г. Синергетика. М., 1980; Пригожин И. От существующего к возникающему. М., 1985. С. 33; Coveney, P. V. The Second Law of Thermodynamics: Entropy, Irreversibility and Dynamics // Nature. 1988. Vol. 333. P. 409–415).

¹⁹ Гиббс. Термодинамика. Статистическая механика... С. 459.

²⁰ Мы говорим здесь для простоты о системе, находящейся вблизи равновесия, когда необратимые процессы исчерпываются процессами переноса.

няется уравнению Лиувилля, то и получается, что грубая плотность, удовлетворяющая кинетическому уравнению, описывает *негамильтонову* систему. Другими словами, вопреки Гиббсу и сторонникам его решения проблемы необратимости, включая Эренфестов, *в этом решении в области необратимых процессов гамильтонова механика фактически отменяется*.

Вот это ошибочное, как мы утверждаем, решение проблемы необратимости Гиббса Эренфесты и взяли на вооружение в обсуждаемой статье. Их статья по форме удачно дополняет книгу Гиббса. Изложение последнего, отличаясь оригинальностью и глубиной, несколько страдает от недостатка ясности, он далеко не всегда называет вещи своими именами. Так, в 12-й главе, посвященной проблеме необратимости, сама эта проблема ни разу вслух не называется! Напротив, в статье Эренфестов, как представляется, откровенно вторичной по содержанию, силен дух формализации, все расставлено по своим местам.

Вторая особенность их статьи – исповедуя постулаты гамильтоновой механики, авторы изначально считают ее справедливой и в области необратимых процессов. Разделяя в этом пункте, таким образом, позицию Больцмана и Гиббса, Эренфесты полагают, что возражения против аргументов Больцмана²¹ являются следствием двусмысленностей, возникающих из-за недостаточной разработанности принятой тогда в статистической физике терминологии. И прилагают немалые усилия в этом направлении, целый ряд используемых сегодня в физике терминов принадлежит именно Эренфестам. Это они ввели термины « μ -пространство (μ -Raum)» (фазовое пространство одной молекулы), « Γ -пространство (Γ -Raum)» (фазовое пространство всех степеней свободы механической системы), «парадокс обратимости (*Umkehrreinwand*)», «грубая плотность (*Grobedichte*)» и др.

Излагая схему перемешивания Гиббса, Эренфесты формализуют ее, вводя мелко- и крупнозернистую фазовые плотности²² и определяя для Γ -пространства точную

$$\sigma = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int \rho \ln \rho dq dp \quad (1)$$

и грубую

$$\sum = \sum \bar{\bar{\rho}}_i \ln \bar{\bar{\rho}}_i \quad (2)$$

H -функции ($\rho(q, p)$ – фазовая плотность механической системы в пространстве ее координат q и импульсов p). Эренфесты доказывают, что величина (1) постоянна по времени²³. Что касается величины (2), то они следующим образом комментируют Гиббса:

(XVI) Любое нестационарное ρ -распределение размешивается в Γ -пространстве стационарным потоком так, что для неоднородной величины

²¹ Против Гиббса, книга которого, напомним, вышла в 1902 г. в США, тогда как основная наука была тогда сосредоточена в Европе, надо полагать, никто еще не выступил.

²² Эренфест, Эренфест. Принципиальные основы... С. 102, 104.

²³ Там же. С. 104.

(меры негомогенности. – С. Х.) Σ , соответствующей ρ -распределению, справедливо неравенство:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \Sigma(t) \leq \Sigma(t_0) \quad (3)$$

Замечание к (XVI): I. Гиббс настоятельно подчеркивает: он пытается доказать лишь теорему о $\lim_{t \rightarrow +\infty} \Sigma(t)$ для $t = +\infty$, а не теорему о том, что $\Sigma(t_2) \leq \Sigma(t_1)$, если $t_2 > t_1$.²⁴

И дают к этому замечанию такое пояснение:

И эта настоятельность заслуживает внимания, так как здесь Гиббс, очевидно, чувствовал, что его доказательство дает больше, чем требуют поставленные условия. Предпоследний абзац главы XII [книги Гиббса], очень важный для теории необратимости, нам непонятен²⁵.

Эренфесты здесь только придают более законченную форму следующим рассуждениям Гиббса, замыкающим в его книге аргументы в защиту тезиса о росте грубой энтропии в процессе перемешивания:

Следует заметить, что если о среднем значении показателя вероятности [фазы]²⁶ можно в некотором смысле утверждать, что в один момент времени оно меньше, чем в другой, то отсюда не обязательно вытекает, что большее среднее значение соответствует раннему моменту времени. Пусть в момент t' задано распределение, не являющееся статистически равновесным, и пусть в более ранний момент t'' построено распределение, равное исходному при соответствующем значении фаз. Если теперь мы будем увеличивать промежуток времени, оставляя значение t' неизменным и придавая t'' все меньшие и меньшие значения, то в общем случае распределение при t'' будет приближаться к некоторому предельному распределению, описывающему статистическое распределение. Существенным в подобных случаях является различие между данным распределением в данный момент времени и предельным значением этого меняющегося распределения, когда рассматриваемый момент отодвигается в бесконечно удаленное будущее или прошлое²⁷.

Но хотя по отношению к математическим построениям различие между предшествующими и последующими событиями и может являться несущественным, по отношению к событиям реального мира дело обстоит совершенно иначе. В тех случаях, когда мы используем ансамбли для вычисления вероятностей событий, происходящих в реальном мире, нельзя забывать о том, что если вероятности последующих событий довольно

²⁴ Там же. С. 105. Мы используем для крупнозернистой плотности обозначение $\bar{\rho}$ вместо используемого Эренфестами P .

²⁵ Там же.

²⁶ Под показателем вероятности фазы Гиббс понимает величину $\eta = \ln \rho(q, p)$, т. е. логарифм фазовой плотности, так что энтропия системы равна взятому с отрицательным знаком среднему значению показателя вероятности фазы.

²⁷ Можно сравнить это с трюизмом из кинематики, согласно которому расстояние между двумя материальными точками, движущимися с постоянными скоростями, в любой конечный момент времени будет меньше, чем при $t = \infty$ или при $t = -\infty$ (за исключением единственного случая, когда их относительная скорость равна нулю) (сноска Гиббса – С. Х.).

часто можно определить, зная вероятности предшествующих, то лишь в весьма редких случаях удастся определить вероятности предшествующих событий, зная вероятности последующих, ибо лишь чрезвычайно редко можно обоснованно исключить из рассмотрения априорную вероятность предшествующих событий ²⁸.

Второй абзац в процитированном фрагменте книги Гиббса и есть тот самый предпоследний абзац из 12-й главы, который остается для Эренфестов непонятным. И этот абзац, действительно, сформулирован несколько туманно. Может быть, однако, предложен следующий вариант его прочтения: решение кинетического уравнения, связывающего значения фазовой плотности (вероятности событий, по Гиббсу) для разных моментов времени, предполагает задание в качестве необходимого условия такого значения в фиксированный момент времени. Понятно, что практически задаются *начальным*, а не конечным условием. Так или иначе, Гиббс пытается здесь понять, откуда в его схеме перемешивания берется требуемая вторым началом несимметрия во временном поведении системы. Однако это его рассуждение, мне кажется, не может быть принято в качестве доказательства чего бы то ни было. По этой причине, в частности, мы и говорим, что Гиббсу не удалось *доказать* монотонный рост (грубой) энтропии.

Более того, такой рост энтропии, вытекающий из второго начала, для случая произвольной необратимой системы (для обратимой системы энтропия постоянна), когда не используется конкретное кинетическое уравнение, не может быть доказан в принципе, поскольку *этим ростом определяется самое понятие необратимой системы*. Но, очевидно, *не может быть доказано и неравенство* (3), также вытекающее только из второго начала. Поэтому когда Эренфесты указанным образом «уточняют» формулировки Гиббса, создавая иллюзию чего-то доказанного, то это, на мой взгляд, лишь запутывает дело.

Это же верно и относительно всего рассмотрения Эренфестами проблемы необратимости. Больцман и Гиббс, защищая гамильтонову механику в ее противостоянии со вторым началом в области необратимых процессов, занимают, согласно изложенной выше точке зрения автора этих строк, позицию заведомо неправую, исторически обреченную. Из-за этой исторической неправоты в их распоряжении не оказывается бесспорных аргументов. Вынужденная же слабость аргументации заставляет Больцмана и Гиббса прибегать к расплывчатым формулировкам: поскольку четкая, строгая формулировка необходимо приводила их к очевидно ошибочным заключениям, они были вынуждены *не договаривать, формулировать свои доводы многозначно*. И эта *недоговоренность высказываний Больцмана и Гиббса, представляется, объективно сыграла громадную стимулирующую роль в развитии новых физических идей*.

Во всей 12-й главе книги Гиббса, посвященной проблеме необратимости, нет ни одной формулы, однако высказанными в ней идеями физика кормится вот уже более столетия. А ведь Гиббс – математик до мозга костей, остальные главы его книги математикой буквально нашпигованы! Он мог бы и сам формализовать свое решение проблемы необратимости с помощью схемы

²⁸ Гиббс. Термодинамика. Статистическая механика... С. 463.

перемешивания, однако что-то не позволило ему это сделать. И это «что-то», я уверен, – именно смутное ощущение внутренней слабости этого решения. Убрав гениальную недоговоренность высказываний Больцмана и Гиббса, произнеся за них все вслух, набросив флер математической строгости на их аргументацию, Эренфесты, как мне представляется, невольно усилили их ошибки. Последующие поколения физиков при освоении работ Больцмана и Гиббса в качестве руководства часто использовали как раз обсуждаемую статью Эренфестов. Лишив суждения корифеев многозначной таинственной глубины, Эренфесты, на мой взгляд, нанесли физике большой урон.

Но не следует преувеличивать негативное воздействие статьи Эренфестов. Может показаться, что их позиция случайна: вместо того чтобы утверждать позицию Больцмана и Гиббса как изначально верную и заниматься ее математическим оформлением, Эренфесты могли подвергнуть ее критическому анализу, и тогда развитие физики пошло бы по другому пути. Но, на мой взгляд, этого не случилось, потому что не могло тогда случиться в принципе. Предложенное Гиббсом решение проблемы необратимости, несмотря на его ошибочность, было бы принято физической общестественностью и без статьи Эренфестов, потому что этого требовала вся обстановка, сложившаяся в физике в начале XX в., переживавшей революцию.

Во-первых, победил *атомизм*, что сняло часть напряжений, существовавших тогда в физике. Стрельба велась по площадям, и обвинения в адрес механической теории были и обвинениями в адрес атомизма. Победа атомизма означала поэтому и победу механической теории, хотя главные обвинения в ее адрес и шли по другим направлениям.

Во-вторых, самые катастрофические последствия для проблемы необратимости имели возникновение *теории относительности* и выдвижение идеи *квантов*. Критический запал физиков был израсходован, невольно думалось, что уж в области-то необратимых явлений классической механике ничего не грозит. Сыграло свою роль и то, что с переключением лучших физиков на релятивистскую и квантовую проблематику интеллектуальный напор в области теории необратимых процессов не мог не ослабеть, поскольку общий интеллектуальный потенциал физиков был тогда весьма ограниченным из-за их малочисленности.

То же обстоятельство, что прорыв произошел в релятивистской и квантовой областях, а не в области необратимых процессов, для которой вопрос о применимости гамильтоновой динамики стоял гораздо раньше и существенно острее, может быть объяснен большой сложностью аппарата теории необратимых явлений. Подступы к нему, как показало развитие физики в XX в., пролегают через разработку теории динамического хаоса и совсем уже немислимой в начале XX в. теории фракталов. По этой причине как нельзя кстати и оказались предложенное Гиббсом решение проблемы необратимости и доводящая его до уровня среднестатистического физика статья Эренфестов. Псевдорешение проблемы необратимости должно было появиться, и оно появилось. Во многом благодаря именно Эренфестам решение Гиббса было положительно воспринято многими физиками, если не их большинством. Далее развитие статистической физики необратимых процессов, на время освобожденной этим решением от тяжких сомнений, покатилося в рамках «нормаль-

ных» конкретных дисциплин – кинетической теории, теории флуктуации и эргодической теории, вырулив в конце концов непредсказуемым образом на синергетику и теорию фракталов.

Статья Эренфестов в части проблемы необратимости – таков авторский историко-научный вердикт – оказалась вполне адекватной задачам физики своего времени, почему и вошла в анналы науки.

Статья Эренфестов: поиски обоснования ансамблевого подхода на пути доказательства его эквивалентности временному подходу (эргодическая гипотеза)

Именно обсуждаемой статье Эренфестов статистическая физика обязана выдвинутым эргодической проблематикой на первый план. Чтобы понять, как это получилось, скажем сначала несколько слов об эргодической гипотезе и ее статусе в статистической физике, каким он представляется автору этих строк с современных позиций²⁹.

Кардинально новым, отличающим статистическую физику от нестатистической («достатистической»), является представление о *стохастическом движении* механической системы, для описания которого Больцманом³⁰, Максвеллом³¹ и Гиббсом³² было выдвинуто понятие *статистического ансамбля*. Для описания одной статистической (макро)системы здесь рассматривают бесконечное множество (ансамбль) (микро)систем, характеризуемых одним набором степеней свободы и одним гамильтонианом, но находящихся в начальный момент времени в разных (микро)состояниях. Точки, представляющие микросистемы в (фазовом) пространстве всех степеней свободы (q, p) системы (в ее Γ -пространстве), заполняют его с некоторой (фазовой) плотностью $\rho(q, p, t)$, образуя, как говорят, фазовую жидкость.

До последней трети XX в. полагалось само собой разумеющимся, что фазовая жидкость непрерывна. В этом случае для нее можно написать уравнение непрерывности, подставляя в которое уравнения Гамильтона и получают уравнение Лиувилля, впервые полученное, как говорилось, Гиббсом в 1884 г.

Ансамблевый подход был для физиков чем-то абсолютно новым и воспринимался ими с большим трудом. Потому он и нуждался в «обосновании», т. е. в сведении к каким-то более привычным для физиков той поры представлениям. Первичным (не вызывающим сомнения) для них стал так называемый

²⁹ Хайтун. От эргодической гипотезы...

³⁰ Boltzmann, L. Einige allgemeine Sätze über Wärmegleichgewicht // Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. 1871. Bd. 63. Abteilung 2. S. 679–711 (рус. пер.: Больцман. Избранные труды... С. 100–125).

³¹ Maxwell, J. C. On Boltzmann's Theorem on Average Distribution of Energy in a System of Material Points // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 1879. Vol. 12. P. 547–570 (то же самое: Maxwell, J. C. Scientific Papers. New York, 1890. Vol. 2. P. 713–741; Maxwell, J. C. Scientific Papers. Paris, 1927. P. 713–741; рус. пер.: Максвелл Дж. К. По поводу теоремы Больцмана о нормальном распределении энергии в системе материальных точек // Максвелл Дж. К. Труды по кинетической теории. М., 2011. С. 321–351).

³² Gibbs. On the Fundamental Formula...; Gibbs. Elementary Principles...

временной подход, опирающийся на идущие от Больцмана представления, согласно которым для описания реальной статистической системы (механической системы со стохастическим движением) достаточно одной механической (микро)системы, отображающая точка которой в фазовом пространстве степеней свободы системы (след от ее движения называется *фазовой траекторией*) заполняет со временем весь фазовый объем системы, причем эта отображающая точка со временем многократно посещает каждый элемент фазового объема. *Относительная длительность нахождения отдельной (микро)системы в данном элементе фазового объема* трактуется как вероятность пребывания описываемой системы в соответствующем этому элементу состоянии.

Так как наблюдаемыми в статистической физике являются только *средние значения* динамических величин, то стали проверять законность усреднения по ансамблю, т. е. законность приравнивания ансамблевого среднего временному среднему. Соответственно обоснование ансамблевого подхода стали видеть в доказательстве *эргодической гипотезы*, согласно которой *среднее по ансамблю равно среднему по времени*. Предметом же эргодической теории стали законы преобразования во времени фазовой траектории системы и произвольного элемента ее фазового объема. Поскольку это преобразование фазового объема во времени называется *поток*ом в фазовом пространстве, эргодическая теория изучает топологию фазовых потоков, а ее математическим аппаратом является теория множеств.

Уточним терминологию. Эргодическая гипотеза сегодня известна в трех формулировках:

- 1) ансамблевые средние равны временным средним;
- 2) фазовая траектория многократно проходит через каждую точку фазового объема системы;
- 3) фазовая траектория многократно посещает окрестность каждой точки фазового объема системы.

Иногда название *эргодическая гипотеза* использовалось для обозначения какой-то пары из этих трех формулировок, скажем, первой и второй или первой и третьей. К сожалению, такая размытая терминология сохранилась в работах некоторых авторов до сих пор, что затрудняет восприятие их работ. Однако все чаще название *эргодическая гипотеза* закрепляется за первой формулировкой, а *квазиэргодическая гипотеза* – за третьей, от второй же постепенно отказались вовсе.

Заметим, что фазовой траектории отдельной микросистемы для заполнения фазового объема макросистемы требуется бесконечно много времени, тогда как ансамбль бесконечного числа микросистем мыслится заполняющим фазовый объем макросистемы «мгновенно». Очевидно, что изменяющаяся во времени необратимая система, переходящая из одного состояния в другое, такого времени не предоставляет. Это означает, что *в случае необратимой статистической системы временной подход в принципе не работает*, тогда как для ансамблевого подхода здесь затруднений такого рода не возникает.

Существенно также, что, говоря об эргодической гипотезе, фазовую траекторию неявно полагают имеющей вид *непрерывной «более или менее гладкой» одномерной линии*, поскольку тогда, в конце XIX – начале XX в., считалось

само собой разумеющимся, что решение дифференциальных уравнений движения является непрерывной «более или менее гладкой» функцией своих переменных. Развитие теории динамического хаоса и синергетики средствами вычислительного эксперимента в XX в. показало всю несостоятельность этого «очевидного» допущения. Оказалось, что в областях стохастического движения фазовая траектория ветвится или как-то иначе изменяет свою структуру «в каждой точке», так что ее уже нельзя считать *линией*, а в синергетических системах с *необратимым* динамическим хаосом фазовая траектория еще и разрывна в каждой точке, так что ее нельзя считать *одномерной* и *непрерывной*. Это означает, что в областях стохастического движения динамической системы понятие фазовой траектории, а вместе с ним и временной подход, теряют смысл.

Развитие теории динамического хаоса показало также, что уже в случае равновесной системы неправомерно говорить о заполнении одной фазовой траекторией *всего* фазового объема системы еще и по той причине, что этот объем в общем случае распадается на несколько (иногда много) областей стохастического и регулярного движения. Это остается в силе, как показало развитие синергетики, и в случае необратимой системы.

Чтобы иметь право положить эргодическую гипотезу в основание ансамблевого подхода, нужно быть уверенным, что класс эргодических систем охватывает все виды статистических систем. Со временем выяснилось, однако, что это далеко не так. Начиная примерно с 1930-х гг. посыпались все новые и новые примеры *неэргодических статистических систем*. Неэргодической системой оказался, к примеру, даже всем известный идеальный газ, поскольку описывающая его фазовая траектория не заполняет плотно энергетическую поверхность, будучи стеснена N изолирующими интегралами, какими являются здесь энергии каждой из N составляющих его частиц ³³.

Более того, оказалось, что *(квази)эргодическое движение может быть нестохастическим*:

Широко распространенное мнение о том, будто динамические системы в общем случае должны быть эргодическими, было впервые поставлено под сомнение в статье А. Н. Колмогорова [1954] ³⁴. Он показал, что для широких классов взаимодействующих динамических систем можно построить периодические орбиты, лежащие в некотором подпространстве [...] эргодической поверхности. Исследования других авторов также пошатнули нашу уверенность в универсальном характере эргодических систем ³⁵.

Все эти соображения и факты постепенно заставили физиков отказаться при обосновании статистической физики от опоры на временные средние:

³³ Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. М., 1978. Т. 1. С. 171.

³⁴ Колмогоров А. Н. О сохранении условно-периодических движений при малом возмущении функции Гамильтона // Доклады АН СССР. 1954. Т. 98. С. 527–530. В этой статье была сформулирована КАМ-теорема.

³⁵ Пригожин. От существующего к возникающему... С. 55.

Таким образом, мы полностью присоединяемся к той группе физиков (к ней принадлежат, в частности, Толмен и Ландау), которые считают, что эргодическая теорема [...] не имеет отношения к обоснованию статистической механики [...] согласно современной точке зрения, представление об ансамбле рассматривается как постулат, не требующий дополнительного обоснования ³⁶.

Другими словами, ансамблевый подход – и, на мой взгляд, совершенно справедливо – стали рассматривать как *первичный*, т. е. не нуждающийся в каком бы то ни было обосновании ³⁷. Таков итог развития статистической физики в XX в. Такова, во всяком случае, доминирующая точка зрения в современной физике.

Некоторые авторы, однако, считают эргодическую гипотезу справедливой в равновесном состоянии:

Действительно, только в состоянии равновесия динамические макроскопические величины не зависят от времени. Следовательно, определение Больцмана [временного среднего]... может служить неплохим определением статических (здесь: равновесных. – С. Х.) термодинамических величин, но, по всей вероятности, не может считаться пригодным для обоснования гидродинамики, электродинамики или любой другой отрасли макроскопической физики, для которой фундаментальное значение имеет именно процесс эволюции во времени ³⁸.

На мой взгляд, эта точка зрения некорректна. В равновесном случае, повторяю, фазовый объем системы также распадается, вообще говоря, на несколько областей регулярного и стохастического движения, а фазовая траектория в областях стохастического движения ветвится или как-то иначе меняет свою структуру в каждой точке, переставая быть линией, что лишает смысла понятие фазовой траектории, на котором базируется временной подход.

Возвращаясь к статье Эренфестов, следует констатировать, что именно она послужила спусковым крючком для поисков доказательства эргодической гипотезы, которые составили первую (традиционную) стадию, или ветвь, эргодической теории. Эренфесты, однако, пустили физиков по ложному следу, поскольку, как говорилось, ансамблевый подход первичен, не нуждаясь в опоре на временной.

При этом, выдвинув эргодическую гипотезу как фундаментальную проблему обоснования статистической физики, Эренфесты многократными ссылками на Больцмана и Максвелла невольно создали ложное впечатление, будто они, Эренфесты, только доносят до читателя идеи классиков. В действительности же Больцман и Максвелл, используя среди других предположение, названное Эренфестами эргодической гипотезой, не видели в нем проблемы, а Больцман так и вовсе, как он полагал, *доказал* его справедливость, статус же гипотезы ему сообщили сами Эренфесты.

³⁶ Балеску. Равновесная и неравновесная... Т. 2. С. 386.

³⁷ Такие понятия мы называем фундаментальными сущностями (*Хайтун С. Д.* Фундаментальная сущность эволюции // Вопросы философии. 2001. № 2. С. 152–166).

³⁸ Балеску. Равновесная и неравновесная... Т. 2. С. 386.

Чтобы наше «обвинение» не было голословным, процитируем самих Эренфестов:

Эргодические механические системы. Существуют механические системы, движения которых осуществляются по незамкнутым G -траекториям, причем таким образом, что отдельная G -траектория плотно покрывает при этом многомерную область G -пространства.

Ссылаясь на это свойство, Больцман³⁹ и Максвелл⁴⁰ выдвинули следующий постулат для определения данного класса механических систем.

Траектория отдельного непрерывного движения системы проходит через «каждую фазовую точку» (курсив в оригинале. – С. Х.), совместимую с общей энергией системы. Механическую систему, удовлетворяющую этому требованию, Больцман называет эргодической системой⁴¹ [...]

Когда Максвелл и Больцман впервые ввели эти особые (микроканонические. – С. Х.) распределения плотности, то для обоснования своего выбора они обратились именно к гипотезе о том, что модели газа являются эргодическими системами.

В дальнейшем этот выбор сохранился в литературе, в то время как об эргодической гипотезе обычно уже нет и речи⁴².

Заметим, прежде всего, что Эренфестов здесь можно понять так, будто Больцману с Максвеллом принадлежит не только представление об эргодической системе, но и сам этот термин. Между тем, как справедливо указывает С. Браш⁴³, это не так: термином *Ergoda* Больцман⁴⁴ обозначает современный микроканонический (равновесный) ансамбль.

Эренфесты в приведенном выше пассаже утверждают далее, что когда Больцман и Максвелл вводят (равновесное) микроканоническое (эргодическое) распределение, то они (Больцман и Максвелл) его обосновывают, обращаясь «именно к гипотезе о том, что модели газа являются эргодическими системами». Эренфесты не указывают при этом соответствующих высказываний этих авторов, ссылка на Больцмана приводится ими здесь лишь в связи с термином «эргодическое распределение». Если верить Эренфестам, Больцман и Максвелл утверждали, что *микроканоническое распределение справедливо, когда система является эргодической*. В работах Больцмана и Максвелла, однако, не найти столь жесткого утверждения, оно, я полагаю, на совести Эренфестов.

³⁹ Эренфесты ссылаются здесь на статью: *Boltzmann*. Einige allgemeine Sätze..., а также на конец статьи: *Boltzmann*, L. Studien über das Gleichgewicht der lebendige Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten // Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. 1868. Abteilung 2. Bd. 58. S. 517–560 (рус. пер.: *Больцман*. Избранные труды... С. 30–66).

⁴⁰ Эренфесты отсылают здесь к статье *Maxwell*. On Boltzmann's Theorem...

⁴¹ Эренфест, Эренфест. Принципиальные основы... С. 72.

⁴² Там же. С. 75.

⁴³ *Brush*, S. G. Foundations of Statistical Mechanics 1845–1915 // Archive for History of Exact Sciences. 1967. Vol. 4. P. 169.

⁴⁴ *Boltzmann*, L. Vorlesungen über Gastheorie. Leipzig, 1895–1898 (рус. пер.: *Больцман Л.* Лекции по теории газов. М., 1956. С. 348–353).

Больцман рассматривает эргодическую гипотезу в целом ряде своих статей, из которых нам наиболее интересна последняя, статья 1887 г.⁴⁵, в которой он *доказывает*, как ему кажется, эргодическую гипотезу, закрывая для себя эту проблему. Больцман объясняет здесь, что если для одних уравнений движения фазовая траектория механической системы описывает в фазовом пространстве только некоторую замкнутую кривую, то для других, характеризующихся «бесконечнозначными» интегралами движения, эта траектория заполняет уже некоторый фазовый объем, размерность которого определяется числом таких «бесконечнозначных» интегралов. Больцман рассматривает

движение материальной точки с прямоугольными координатами x, y в некоторой плоскости, на которую в направлении координатных осей действуют силы $X = -a^2x, Y = -b^2y$ [...]. Если периоды колебаний двух камертонов a и b являются соизмеримыми, то материальная точка описывает некоторую замкнутую кривую [...]. Если, напротив, a и b несоизмеримы, то материальная точка в течение некоторого очень большого промежутка времени пробегает всю плоскость, лежащую внутри некоторого прямоугольника, и раз x является заданным, то y просто заключено между двумя границами.

В этом случае будем говорить, что один из интегралов уравнений будет бесконечнозначным. Совершенно аналогичные случаи имеют место также и при центральном движении; если траектория замкнута, то ни один из интегралов уравнений движения не будет бесконечнозначным, напротив, последний случай имеет место, если траектория не является замкнутой⁴⁶.

Затем Больцман переходит к общему случаю системы, обладающей s степенями свободы и характеризующейся «бесконечнозначными» интегралами движения, без колебаний отождествляя их с реальными термодинамическими системами:

Мы сразу же рассмотрим самый общий случай, принимая, что k интегралов уравнений движения являются бесконечнозначными. Тогда [...] останется только не более $2s-k-1$ уравнений для интегралов, которые не являются бесконечнозначными, и *переменные с течением времени могут пробегать все возможные, совместимые с этими $2s-k-1$ уравнениями значения*. В этом случае мы можем представить себе систему, в которой $k=2s-2$, следовательно, *переменные пробегают все возможные значения, совместимые с уравнением живой силы* (курсив мой. – С. Х.). Примером этого будет [...] центральное движение. Еще более простыми оказываются все движения, когда $s=1$.

Придадим [...] системе подобного рода такие свойства, которые на опыте обнаруживаются у нагретых тел, а именно, что ее состояние было полностью определено, если наряду с внешними и внутренними силами будет известна также полная энергия, содержащаяся в ней. Вероятности различных состояний, а также все поведение системы подобного рода можно тогда рассчитать очень легко⁴⁷.

⁴⁵ Boltzmann, L. Über die mechanischen Analogien des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik // Journal für die reine und angewandte Mathematik. 1887. Bd. 100. S. 201–212 (рус. пер.: Больцман. Избранные труды... С. 280–290).

⁴⁶ Больцман. Избранные труды... С. 281–282.

⁴⁷ Boltzmann. Über die mechanischen Analogien... С. 283.

Характерно, что, разъяснив, каким образом уравнения движения (Гамильтона) могут обеспечить пересечение фазовой траекторией всех точек фазового объема системы (т. е. выполнение эргодической гипотезы во второй ее формулировке), и выдвинув замечательную идею «бесконечнозначных» интегралов движения, приведшую впоследствии к идее неинтегрируемых механических систем, Больцман не считает нужным углубляться далее в исследование условий, при которых реальные системы являются именно такими. По-видимому, любой ученый характеризуется неким «пределом насыщения», не позволяющим ему двигаться далее. На достигнутом Больцманом уровне насыщения для него здесь уже нет проблемы, и он переходит к доказательству (так ему кажется) равенства временного и ансамблевого средних:

Вместо одной-единственной системы вообразим бесконечно много систем с совершенно одинаковыми свойствами, в каждой из которых содержится также одинаковое количество энергии и которые обладают всеми возможными начальными состояниями. Все они должны испытывать одно и то же увеличение энергии, и для всех них внешние условия также должны изменяться одним и тем же образом. Этому множеству систем тогда должны быть одинаковым образом приданы все свойства систем, которые не зависят от случайных начальных условий. Если бы, например, работа, которую совершает одна из систем против какой-либо внешней силы, или ее средняя энергия, или что-либо подобное зависели бы существенно от начального состояния системы, то, конечно, средние значения этих величин для совокупности систем также не были бы равны их среднему значению для отдельной системы. Если же значения этих величин заметным образом не зависят от начального состояния, то их среднее значение должно быть равным значению этих величин для каждой из отдельных систем. Следовательно, вовсе нет необходимости, чтобы мы вычисляли значения этих величин для каждой отдельной системы при определенных начальных условиях, но достаточно вычислить их средние значения для всей совокупности систем. Это вычисление еще более облегчается благодаря тому, что мы можем образовывать совокупность по нашему свободному выбору; т. е. если N представляет собой общее число систем, а dN – число тех систем, для которых начальные условия лежат между определенными бесконечно близкими границами, то dN может содержать некоторую совершенно произвольную функцию переменных, определяющих начальное состояние. При надлежащем выборе этой функции мы можем обеспечить, чтобы уравнения для совокупности систем обладали такой же простотой, как и для одной системы, которая сама по себе проходит все возможные состояния, совместимые с уравнением живой силы. Так как мы только что доказали (*nachgewiesen haben*), что значения тех величин, которые не зависят от начальных условий, для каждой отдельной системы равны средним значениям этих величин для некоторой произвольно образованной совокупности систем (курсив мой. – С. Х.), то достаточно определить средние значения этих величин для такой совокупности, для которой вычисление будет по возможности простым ⁴⁸.

⁴⁸ Там же. С. 284.

Я привел эту длинную цитату потому, что роль этой статьи в истории эргодической гипотезы, на мой взгляд, недооценена. Браш, например, пишет, что

Максвелл и Больцман *никогда не пытались доказать* (курсив мой. – С. Х.), что эргодическая гипотеза справедлива; они использовали ее только как эвристическое оправдание для теоремы о равномерном распределении ⁴⁹.

Между тем Больцман в этой статье, как видим, именно что *доказывает*, как он утверждает, равенство временного среднего среднему по ансамблю, т. е. эргодическую гипотезу в первой и основной ее формулировке. Разумеется, никакого доказательства Больцман при этом не дает, эргодическая гипотеза в ее общем виде, как мы сегодня знаем и как о том говорилось ранее, не верна. Для нас, однако, здесь существенно другое: Больцман в этой статье проблему для себя окончательно закрыл и никак не может, следовательно, считаться отцом эргодической гипотезы *как проблемы обоснования статистической физики*, т. е. как проблемы, которую предстоит решать всем миром.

Что же касается Максвелла, то он в работе 1879 г. обсуждает статью Больцмана 1868 г., в которой тот дает свой вывод распределения Максвелла для системы помещенных во внешнее поле материальных точек, называя этот вывод теоремой:

Единственное предположение, которое необходимо для прямого доказательства [теоремы], состоит в том, что система, находящаяся в состоянии движения и предоставленная сама себе, *рано или поздно пройдет через все фазы* ⁵⁰, *совместимые с уравнением энергии*.

Стало быть, это означает, что существуют случаи, когда это условие не имеет места. Движение системы, не подверженное действию внешних сил, описывается шестью уравнениями и уравнением энергии, так что система не может пройти через те фазы, которые удовлетворяют уравнению энергии, но не совместимы с этими шестью уравнениями.

К тому же могут существовать особые силовые законы, для которых через конечное время всё движение в целом повторяется: например такой, при котором взаимодействие между двумя частицами пропорционально расстоянию между ними. В таких случаях некоторое определенное значение одной переменной соответствует определенному значению каждой из других переменных, так что фазы, образованные совокупностью значений переменных, которые не соответствуют друг другу, не допустимы, хотя они удовлетворяют семи общим уравнениям.

Тем не менее, если мы предположим, что материальные частицы или некоторые из них случайно сталкиваются с неподвижным препятствием, таким как стенки сосуда, содержащего частицы, то, за исключением некоторых специальных форм поверхности такого препятствия, каждое столкновение будет вносить возмущение в движение системы, так что она будет переходить с одной невозмущенной траектории на другую. Обе эти траектории должны удовлетворять уравнению энергии и должны пересекаться в фазе, для которой выполнены условия столкновения с

⁴⁹ Brush, S. G. Statistical Physics and the Atomic Theory of Matter from Boyle and Newton to Landau and Onsager. Princeton (N. J.), 1983. P. 67.

⁵⁰ То есть через каждую точку фазового объема системы.

неподвижным препятствием, но не подчиняются уравнениям для импульсов. В случае такой невероятной сложности [...] с заметной долей уверенности мы можем утверждать, что *для неподвижных препятствий, за исключением некоторых, имеющих специальную форму поверхности* (курсив мой. – С. Х.), система раньше или позже после достаточно большого числа столкновений пройдет через каждую фазу, удовлетворяющую уравнению энергии ⁵¹.

Как видим, Максвелл касается здесь эргодической гипотезы во второй ее формулировке, выдвигая предположение о том, что механическая система проходит со временем через каждую точку (фазу) энергетической поверхности ⁵². Вместо идеи «бесконечнозначных» интегралов движения, предложенной Больцманом через восемь лет, Максвелл выдвигает значительно менее продуктивную идею, согласно которой фазовая траектория заполняет фазовый объем благодаря взаимодействию частиц газа со стенками сосуда, *допуская, однако, что это имеет место не для всех систем*.

Эргодической же гипотезы в первой ее формулировке, говорящей о равенстве временного и ансамблевого средних, Максвелл вообще не касается. Приведем, тем не менее, то единственное место в его статье, в котором Максвелл сопоставляет подходы ансамблевый (который он называет своим) и временной, который он называет больцмановским. Описывая систему n координатами $q_1, \dots, q_n$ и n импульсами $p_1, \dots, p_n$, Максвелл фиксирует фазу, в которой находится система, набором значений координат и импульсов (q, p) . Мы теперь примем, пишет он далее,

более широкое определение, говоря, что система находится в фазе (a, b) всякий раз, когда значения координат таковы, что q_1 заключена между b_1 и $b_1 + db_1$, q_2 – между b_2 и $b_2 + db_2$; и также для p_2 – между a_2 и $a_2 + da_2$ и т. д. ⁵³

И далее идет интересующий нас абзац:

Больцман определяет вероятность находиться системе в фазе (a, b) как отношение совокупного времени, в течение которого она находится в этой фазе, к полному времени движения, причем предполагается, что полное время очень велико. Для меня же предпочтительнее считать, что существует великое множество систем, свойства которых совпадают, но каждая из них при движении обладает различными наборами значений n координат и $n - 1$ импульсов при одном и том же значении полной энергии для всех, и рассматривать число тех систем, которые в данный момент времени находятся в фазе (a, b) ⁵⁴.

⁵¹ Максвелл. По поводу теоремы Больцмана... С. 322–323.

⁵² Так как энергия является изолирующим интегралом движения, то фазовая траектория может заполнять всюду плотно в фазовом пространстве системы самое большее $(2s - 1)$ -мерную энергетическую поверхность.

⁵³ Максвелл. По поводу теоремы Больцмана... С. 328.

⁵⁴ Там же. С. 329.

Как видим, далее констатации существования двух разных статистических подходов Максвелл здесь не идет, эргодической гипотезы он не выдвигает. Так что совершенно определенно Максвелл, как и Больцман, не может считаться отцом этой гипотезы как *проблемы обоснования статистической физики*.

Мы приходим к выводу, что современная постановка вопросов, связанных с эргодической гипотезой, идет именно от обсуждаемой статьи Эренфестов, выдвижение которыми вопроса о справедливости эргодической (или квази-эргодической) гипотезы как фундаментальной проблемы обоснования статистической физики до сих пор ставится некоторыми историками науки им в заслугу:

...только в 1911 г. Эренфестами впервые была четко сформулирована эргодическая гипотеза и ее квазиэргодический вариант. В результате физики договорились на том, что для обоснования статистической механики классическую механику необходимо дополнить элементами вероятностных представлений и принять некоторые гипотезы. Дальше начиналась работа для математиков: поскольку утверждение сформулировано, его надо доказать и определить границы его справедливости⁵⁵.

Браш, по-видимому, первым решился на критику статьи Эренфестов, но лишь в историко-физической ее части:

В то время как эта статья была сама по себе важным вкладом в развитие эргодической теории в статистической механике, она оставляет желать много лучшего как историческое сообщение о работе Максвелла и Больцмана, и большая часть ошибок позднейших комментаторов, описывающих происхождение эргодической гипотезы, является, вероятно, результатом некритического восприятия некоторых небрежных утверждений Эренфестов⁵⁶.

Беда, однако, в том, что в статье Эренфестов не все ладно не только с историко-физической частью, но и с физической; они не смогли верно отразить главную тенденцию статистической физики тех лет, состоящую в переходе от временного подхода к ансамблевому как первичному.

Равновесная статистическая физика была заложена по преимуществу Больцманом и Гиббсом, первый из которых выдвинул практически все основные идеи (за исключением равновесного распределения Максвелла), а второй, добавив к ним уравнение Лиувилля, оформил все в виде стройной теории в рамках ансамблевого подхода. Первопроходцам всегда трудно, зачастую многие их конструкции имеют лишь эвристическое значение, не попадая в итоге в теорию, которая строится с их помощью. Такой эвристической конструкцией и был временной подход Больцмана. Будучи первопроходцем и исповедуя,

⁵⁵ Вдовиченко Н. В. Развитие фундаментальных принципов статистической физики в первой половине XX в. М, 1986. С. 35.

⁵⁶ Brush. Foundations of Statistical Mechanics... P. 169; Brush. The Kind of Motion... P. 364 (абзац, появившийся сначала в статье Браша, был затем воспроизведен им и в книге).

естественно, познавательную модель⁵⁷, коренящуюся в нестатистическом прошлом классической механики, Больцман необходимо должен был отдать дань этому подходу. Этим и объясняется то, что, придя первым к принципиально новой идее ансамблевого подхода, адекватной природе статистических систем (систем с динамическим хаосом), Больцман счел его вторичным по отношению к временному. Гиббсу, который шел вторым, этот гандикап позволил придти к новому пониманию статуса ансамблевого подхода как первичного и не нуждающегося вследствие этой своей первичности в опоре на временной подход.

Эренфесту, который был на 35 лет младше Больцмана, по идее было много легче воспринять новые идеи Гиббса, книгу которого он, судя по обсуждаемой статье, внимательно штудировал. Однако Эренфест, как мне представляется, не смог оторваться от познавательной модели Больцмана, своего учителя, и воспринять модель Гиббса. Оказавшись, делаю я вывод, не на высоте положения, *Эренфест не понял, что временной подход себя изжил и что ансамблевый подход в подпорках не нуждается. Следствием этого непонимания и явилось выдвижение им эргодической гипотезы на первый план как фундаментальной проблемы обоснования статистической физики.* Следствием этой главной ошибки Эренфестов, на мой взгляд, и стали все остальные ошибки в их статье, физические и историко-физические.

Так или иначе, дело было сделано: физики поверили Эренфестам, которые прикрылись Больцманом и Максвеллом, что в основании ансамблевого подхода, а, следовательно, и всей статистической физики, лежит эргодическая гипотеза. И принялись искать решение проблемы обоснования статистической физики там, где его не было в принципе. Тупиковым, на мой взгляд, оказалось все направление эргодической теории, нацеленное на решение проблемы обоснования статистической физики путем опоры ансамблевого подхода на временной.

Констатируем, что физика XX в. прошла путь от поддержки эргодической гипотезы как краеугольного камня в основании статистической физики, чему и дала начало обсуждаемая здесь статья Эренфестов, до отрицания такой ее роли. Сегодня утвердилась идущая от Гиббса познавательная модель, в которой ансамблевый подход рассматривается как первичный. Можно только удивляться тому, что переход от больцмановской познавательной модели (с опорой на временной подход) к гиббсовской затянулся на целый век.

Оценивая роль статьи Эренфестов в развитии статистической физики, было бы неправильно, однако, ограничиваться черными красками. Прежде всего было бы неверно думать, что эргодическая теория появилась случайно и что если бы Эренфесты не «придумали» проблему обоснования ансамблевого подхода на базе эргодической гипотезы, то эта теория и не возникла бы. Если бы дело было только в Эренфестах, то их постановка проблемы не встретила бы такого сочувствия среди физиков. Случайностью было то, что роль запала сыграла именно статья Эренфестов, не появившись она, проблему поставил бы кто-нибудь другой.

⁵⁷ Термин был предложен в 1980 г. А. П. Огурцовым и взят на вооружение Ю. В. Чайковским (*Чайковский Ю. В. Элементы эволюционной диатропики. М., 1990*).

В разработке традиционной ветви эргодической теории, направленной на доказательство эргодической гипотезы, участвовали большие интеллектуальные силы. И хотя это направление, согласно точке зрения автора этих строк, оказалось в целом тупиковым, поскольку решение проблемы обоснования статистической физики оказалось совсем в другом месте, работа непредсказуемым образом, как это часто и бывает в науке, не пропала даром, принесла свои плоды, хотя и не те, каких от нее ожидали.

Во-первых, эргодическая теория появилась как закономерный этап развития статистической физики, связанный с переходом от старой больцмановской познавательной модели к новой гиббсовской. Больцмановская познавательная модель вышла из недр достатистической механики, для которой понятие статистического ансамбля было чуждым, искусственным и потому нуждалось в подпорках. Познавательная модель Гиббса более адекватна природе статистических явлений, воспринимая понятие ансамбля как нечто естественное и не нуждающееся в обосновании. Переход от одной познавательной модели к другой потребовал ломки физического сознания, полигоном для которой и послужила эргодическая теория. Когда новая познавательная модель утвердилась, эргодическая теория в традиционном ее варианте исчерпала себя, фактически прекратив свое существование.

Во-вторых, традиционная ветвь эргодической теории продвинула физиков в понимании природы *стохастического движения*. Это объясняется самим содержанием эргодической теории, которая возникла вокруг проблемы обоснования статистической механики на базе нестатистической. Статистическая механика тем и отличается от нестатистической, что изучает стохастическое движение. Естественно поэтому, что в центре внимания эргодической теории с самого начала находились стохастическое движение и все, что с ним связано. Можно даже утверждать, что понятие эргодичности возникло как некорректная (размытая) рефлексия на стохастику. Постепенно стало ясно, однако, что эргодическая система может быть и нестатистической, а статистическая – неэргодической, и понимание этого созрело именно в недрах традиционной ветви эргодической теории. Отрицательный результат – тоже результат. Оказалось, что за стохастическое движение в большей мере отвечает введенное Гиббсом перемешивание, т. е. перепутывание фазовых траекторий микросистем с разными начальными условиями, в основе которого лежит неустойчивость фазовых траекторий. Именно перемешивание, о котором шла речь в предыдущем разделе настоящей статьи, оказалось в центре внимания второй ветви эргодической теории.

В-третьих, и это, быть может, самое существенное, традиционная ветвь эргодической теории с ее анализом, казалось бы, не имеющих большого физического смысла топологических тонкостей, связанных с различием эргодического и квазиэргодического движения, подготовила появление в последней трети XX в. синергетики, описывающей необратимые процессы посредством фрактальных структур с их необычной топологией. Обратив внимание физиков на эти топологические тонкости, Эренфест оказался провидцем, его совместная с женой статья облегчила и ускорила освоение физиками странных аттракторов и фракталов. Заведя физику в «тупик», Эренфесты способствовали ее «туннельному переходу» через него к идеям синергетики и теории фракталов.

Заключение

Изложенное подтверждает, как я полагаю, центральный тезис статьи о том, что в целях достижения максимально возможной объективизации историко-научного знания реконструкция событий прошлого науки должна быть по возможности авторской с четкой артикуляцией историками науки своих позиций, включая конкретно-научные, например физические.

Проведенная выше реконструкция статьи Пауля и Татьяны Эренфестов 1911 года и связанных с ней событий в физике в значительной степени определялась собственными взглядами автора этих строк на обсуждаемые в ней проблемы – проблему необратимости и связанную с эргодической гипотезой проблему соотношения в статистической физике временного и ансамблевого подходов. Поскольку по обоим этим проблемам физическим сообществом до сих пор не выработано полного согласия, указанное «самоопределение» автора было вынужденным, продиктовав ему и выводы в отношении статьи Эренфестов и ее места в истории физики.

Среди этих выводов наиболее важным представляется тот, что высокопрофессиональная статья, каковой, несомненно, была рассмотренная здесь статья Эренфестов, может оказаться глубоко ошибочной, каковой она является, на взгляд автора этих строк, с позиций физики наших дней. Глубоко ошибочная статья может оказаться, тем не менее, чрезвычайно важной и полезной для развития науки, как это и случилось со статьей Эренфестов.

Отсюда вытекает следствие, несколько странное для историко-научного текста, но имеющее значение, мне кажется, не только для истории науки, но и для науки вообще. При решении вопроса о публикации конкретного научного текста следует оценивать не ошибочность / истинность изложенных в нем положений (помимо прочего, парадигмы рецензентов и автора текста могут оказаться разными), но научный профессионализм, проявленный или не проявленный автором при изложении этих положений. Физика потерпела бы большой урон, если бы тогда, в 1911 г., статья Эренфестов была отклонена из-за ошибочности изложенных в ней взглядов.

Разумеется, будучи авторской, выполненная здесь реконструкция статьи Эренфестов вместе с выводами из нее в свою очередь может оказаться ошибочной. Как сказал Умберто Эко устами одного из своих персонажей, я не уверен в любой истине – даже в той, в которую верю.