

## НОВОЕ ОТКРЫТИЕ ВРЕМЕНИ

*И. Пригожин  
(Бельгия)*

### Введение

Я хотел бы посвятить это сообщение памяти моего друга Бориса Григорьевича Кузнецова. Его книга «Разум и бытие» недавно вышла в английском переводе [1]; еще раз я был поражен сходством подхода, который был разработан Кузнецовым, и тем, который я намереваюсь сейчас изложить. Основная проблема, на которой сосредотачивает внимание Кузнецов, состоит в анализе той роли, которую играют вероятность и необратимость в нашей концепции Вселенной. Следующие три отрывка могут служить примерами различных подходов к этой проблеме.

Так, у Лукреция мы читаем:

«Я бы желал, чтобы ты был осведомлен здесь точно так же,  
Что, уносясь в пустоте, в направлении книзу отвесном,  
Собственным весом тела изначальные в некое время,  
В месте неведомом нам начинают слегка отклоняться,  
Так что едва и назвать отклонением это возможно» [2].

У Эйнштейна мы находим следующую мысль:

«Слабость теории заключается, с одной стороны, в том, что она не проводит нас к более тесному объединению с волновой теорией, и, с другой стороны, в том, что время и направление элементарного процесса предоставляется «случаю»; впрочем, я полностью уверен в надежности выбранного метода» [3, с. 406].

Б.Г. Кузнецов полагает, что «...мировая линия без определенных эквивалентов эллиптических *clinamen*\*, без ультрамикроскопического содержания – это не реальное бытие, а вполне детерминированное ничто» [1, ч. 1, гл. 3].

Эти высказывания требуют некоторых пояснений. Прежде всего отметим аналогию между Эйнштейном и Лукрецием. Оба подчеркивают, что точное время протекания элементарных процессов определяется случаем. Оба утверждают, что без определенного элемента стохастичности мы получили бы то, что Кузнецов в своей книге называет «самое большое пустотой», а отнюдь не мир, каким мы его знаем. Иными словами, основная проблема заключается в конфликтной ситуации

Доклад на VII Международном конгрессе по логике, методологии и философии науки (Москва, 17–22 августа 1987 г.)

\* *Clinamen* (лат) – уклонение, отклонение. Имеются в виду отклонения атомов от закономерных траекторий, носящие по Эпикуру случайный характер и делающие возможным столкновение атомов – *Прим. ред.*

статическим описанием в рамках классической физики, основанной на детерминистических и обратимых во времени законах, и миром, каким мы его знаем, заведомо содержащим в качестве основных элементов вероятность и необратимость.

Ясно, что классическая точка зрения обладает дуалистической структурой: феноменологический уровень соответствует необратимым и стохастическим законам, тогда как на фундаментальном уровне, классическом или квантовом, мы имеем дело с обратимыми во времени детерминистическими законами. В случае квантовой механики я имею ввиду, конечно, описание в терминах гильбертова пространства. Можем ли мы преодолеть этот дуализм и прийти к более целостному взгляду на физику? Думаю, что теперь это возможно. Конечно, новые результаты, о которых пойдет речь в моем докладе, отвечают не на все вопросы, поставленные Кузнецовым, но они представляют обнадеживающий шаг в намеченном им направлении.

Проблема, с которой нам приходится сталкиваться, очень сложна и влечет за собой глубокие концептуальные изменения, которые продолжаются и поныне. Я начну с феноменологического – термодинамического уровня; затем я рассмотрю те изменения, которые нам необходимо принять, имея в виду язык классической и квантовой механики, и в заключение приведу некоторые соображения относительно недавней эволюции космологических идей. Ясно, что диапазон этих проблем необъятен, и поэтому я вынужден принести извинения за несколько поверхностный характер дальнейшего изложения (дальнейшие подробности см. в оригинальных работах [11 и 14]).

Как уже было сказано, мне отнюдь не случайно придется рассмотреть широкий диапазон физических явлений; я хотел бы передать свое ощущение: создание более единой физики, основанной на таких понятиях, как стохастичность и необратимость, ныне вполне в наших возможностях. Тем не менее многое из того, о чем пойдет речь ниже, еще придется дополнять или менять.

## 1. Феноменологическое описание

Пожалуй, начать уместно со второго начала термодинамики. Эволюцию энтропии в открытой системе можно разделить на обмен с окружающей средой (поток энтропии  $d_e S$ , который может быть положительным, отрицательным или равным нулю) и внутреннее производство энтропии  $d_i S$  (соответствующее необратимым процессам и всегда положительное или равное нулю) (рис. 1).

Подчеркнем важность необратимых процессов [4, 5]. Действительно, и в химии, и в биологии подавляющее большинство процессов необратимы. Кроме того, я хотел бы подчеркнуть, что, как теперь известно, необратимость связана не только с разрушением структур, с беспорядком: производство энтропии сопряжено и с порядком, и с беспорядком. Приведу лишь единственный пример. Рассмотрим хорошо известный физический эффект: термодиффузию. Возьмем замкнутую систему, состоящую из двух компонентов – водорода и азота. При однородном распределении температуры распределение водорода и азота также равномерно. Но стоит нарушить однородность теплового распределения, введя градиент температуры, как возникнет градиент концентрации. Мы видим, таким образом, что производство

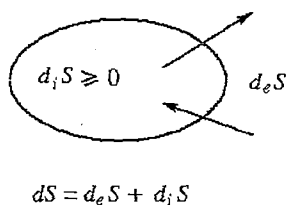


Рис. 1. Термодинамические соотношения для открытых систем включают в себя внутреннее производство энтропии ( $d_i S$ ) и обмен энтропии с окружающей средой ( $d_e S$ )

энтропии оказывает двойной эффект: оно связано с потоком тепла, порождающим беспорядок, но оно же связано и с антидиффузией, а антидиффузия означает порядок, поскольку приводит к частичному разделению водорода и азота. Этот двойной эффект можно наблюдать во многих ситуациях (рис. 2).

Здесь мы в действительности оказываемся перед новой парадигмой. Традиция сопоставляла порядок с равновесием, а беспорядок с нарушением

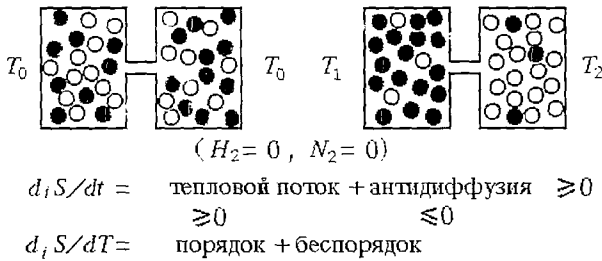


Рис. 2. Конструктивная роль необратимых процессов при термодиффузии

равновесия; примером первого служил кристалл, примером второго – турбулентность. Мы же теперь пришли к противоположной точке зрения, согласно которой возникновение порядка связывается с неравновесностью, а беспорядок может быть соотнесен с равновесными структурами, даже с кристаллами, если в описании нормальных мод мы включим тепловой шум. Возникновение таких неравновесных структур хорошо известно здесь, в Москве, поскольку советская школа сыграла важную роль в их исследовании во многих ситуациях, таких, как химические колебания или гидродинамические неустойчивости.

Рассмотрим неустойчивость Рэля–Бенара. Я выбрал этот пример потому, что именно он проложил путь к некоторым современным численным экспериментам. Я имею в виду работу М. Марешаля и Е. Кестемона [6, 7] по молекулярной динамике неравновесных систем. Обычно молекулярная динамика имеет дело лишь с равновесными системами, но в последние годы, благодаря неизмеримо возросшим вычислительным возможностям, связанным с появлением «суперкомпьютеров», началось численное моделирование неравновесных жидкостей.

Работа Марешаля и Кестемона посвящена исследованию неустойчивости Рэля–Бенара, о которой мы только что упоминали. Рассмотренная ими модельная система состоит из 5400 твердых дисков, заключенных в прямоугольник; его вертикальные стороны являются отражающими границами, а горизонтальные – тепловыми резервуарами. Внешняя сила (аналогичная гравитации) действует на частицы жидкости по вертикали сверху вниз; температура нижнего резервуара выше, чем температура верхнего. Поведение этой модели жидкости проинтегрировано по времени на компьютере. На рис. 3, б и 3, в показана одна и та же система после  $10^6$  столкновений. Отличаются только градиенты температуры: на рис. 3, в градиент больше, чем на рис. 3, б. Внешние условия на рис. 3, б выбраны ниже порога гидродинамической макроскопической неустойчивости. Однако на нем уже можно заметить когерентные структуры, хотя они подвержены сильным флуктуациям во времени (рис. 3).

Примечательно, что относительно малые системы демонстрируют поведение, которое может быть объяснено в терминах макроскопической гидродинамики. Однако результаты численного моделирования выходят за пределы чистой гидродинамики, так как показывают, каким образом флуктуации приводят к возникновению макроскопической неустойчивости. Недавно в еще не

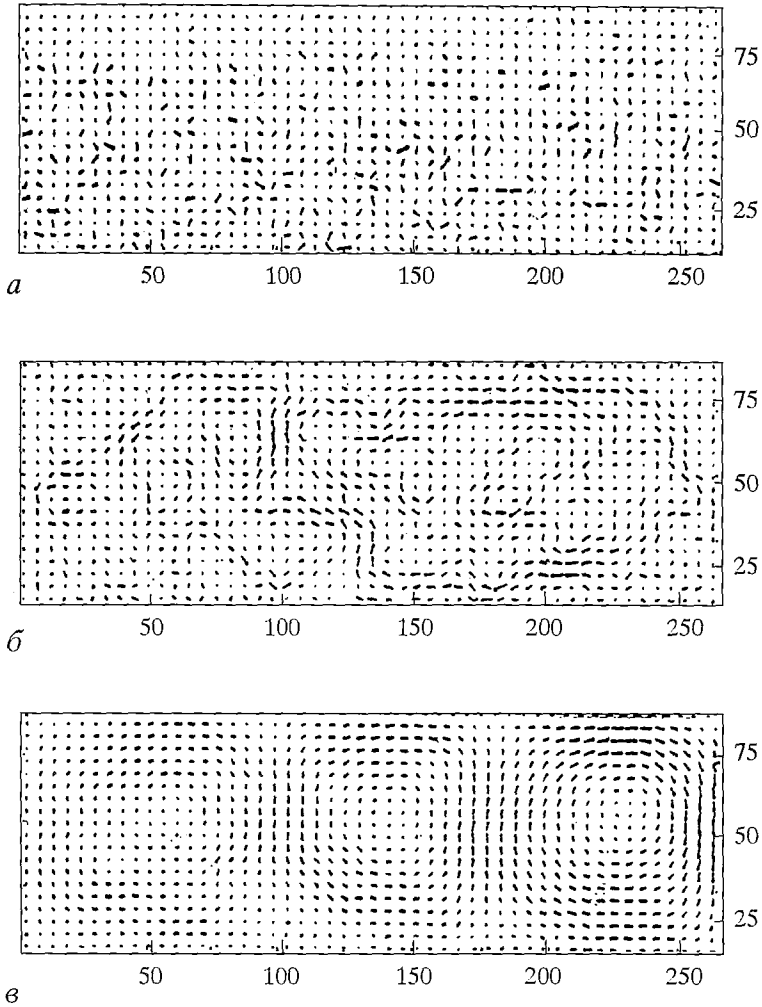


Рис. 3. Молекулярная динамика: конечная двумерная система из 5400 твердых дисков под действием градиента температуры и внешней силы (гравитации). На рисунках показаны характерные распределения скоростей: каждая стрелка соответствует средней скорости частиц, находящихся в одной ячейке (обычно в ячейке находится 5 частиц). На рис. 3, *а* представлено начальное (случайное) распределение средних скоростей. На рис. 3, *б* то же распределение показано после нескольких тысяч столкновений; видны вихри, соответствующие регулярным потокам частиц. На рис. 3, *в* показано то же распределение при несколько иных внешних ограничениях; хотя отчетливо видны вихри, никаких устойчивых упорядоченных структур в действительности здесь нет

опубликованной работе М. Марешаля и А. Амеллаля – было продемонстрировано, какую роль играют дальние корреляции в химических системах. Такие флуктуации приводят к поразительным эффектам; например, флуктуации области, малой по сравнению с длиной корреляции, подчиняются другим законам, чем флуктуации больших областей. Этот пример показывает, как неравномерность может создавать дальние корреляции. То, что неравномерность может играть конструктивную роль, в настоящее время установлено вне всяких сколько-нибудь разумных сомнений. Теперь я перейду к микроскопическому описанию необратимых процессов в рамках концептуальных основ классической и квантовой механики.

## 2. Концептуальные изменения на микроскопическом уровне

В этой области ситуация резко изменилась за последние три десятилетия. В книге, написанной мной совместно с Изабель Стенгерс [5], я подчеркивал, что необратимость возникает вследствие динамической неустойчивости. Ныне эта идея стала общепринятой. В качестве примера приведу цитату из недавней статьи Дж. Лайтхилла: «Я должен говорить от имени широкого глобального сообщества ученых, занимающихся механикой. Мы хотели бы коллективно принести свои извинения за то, что вводили в заблуждение образованную публику, распространяя идеи относительно детерминизма систем, удовлетворяющих законам движения Ньютона, ибо после 1960 г. было показано, что это не так» [8, с. 35]. Весьма необычно видеть, как научное сообщество приносит извинения за ошибку, длившуюся более трех столетий.

Предельными случаями динамической неустойчивости являются потоки Колмогорова; степень их неустойчивости мы можем измерять «показателями Ляпунова», характеризующими экспоненциальный рост расстояния между двумя траекториями; показатель Ляпунова определяет «временной горизонт» системы. Это означает, что динамика имеет теперь дело с системами, обладающими внутренней стохастичностью (рис. 4).

Теорема о возвращаемости  
Пуанкаре

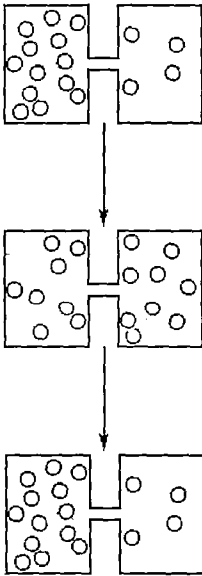


Рис. 5

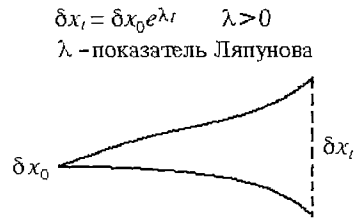


Рис. 4

Рис. 4 Положительные показатели Ляпунова служат мерой расходимости траекторий, удовлетворяющих почти тождественным начальным условиям

Рис. 5. Теорема Пуанкаре о возвращаемости утверждает, что необратимость только «кажущаяся»: любая интегрируемая система по истечении достаточно большого интервала времени возвращается в состояние, сколь угодно близкое к исходному

Я хотел бы также кратко упомянуть о том, что кинетическое описание, восходящее к Л. Больцману, очень тесно связано с динамической устойчивостью. Мы не можем входить здесь в детали, но я хотел бы отметить важную роль резонанса; именно резонанс, как мы знаем из теоремы, доказанной Пуанкаре в 1892 г., препятствует интегрируемости динамической системы. Именно из-за резонанса, проявляющегося в так называемой проблеме малых знаменателей, некоторые классические системы оказываются неинтегрируемыми. Всем известно, что именно в этом состоит исходный пункт теории Колмогорова – Арнольда – Мозера. Фундаментальным понятием кинетической теории является оператор

столкновений, и этот оператор непосредственно связан с резонансами. Этот вопрос мы недавно рассмотрели вместе с моим коллегой Т. Петроски [12, 13]. Таким образом, кинетическая теория очень близка к потокам Колмогорова, и в отношении ее мы можем сформулировать те же замечания о существовании «временного горизонта».

Попробуем выяснить теперь, почему классические утверждения об иллюзорном характере необратимого описания более не верны. Одним из главных аргументов была, конечно, теорема Пуанкаре о возвращаемости (рис. 5).

Согласно этой точке зрения, каждая динамическая система должна быть периодической, если достаточно долго наблюдать за ее поведением; в этой связи уместно напомнить одно из высказываний М. Смолуховского, приведенное у Г. Вейля: «Если бы мы продолжали наше наблюдение бесконечно долго, то все процессы стали бы обратимыми» [9]. При наблюдении в течение достаточно большого времени каждая система была бы квазипериодической. Как сказано у Чандрасекхара, «мы можем заключить вместе со Смолуховским, что процесс кажется необратимым (или обратимым) в зависимости от того, характеризуется ли начальное состояние большим (или малым) средним временем возвращения по сравнению с временем, в течение которого система находится под наблюдением» [10]. Иначе говоря, в природе нет ничего похожего на истинную необратимость. Но теперь мы понимаем, как избежать такого вывода. Так как «время возвращения» Пуанкаре, вообще говоря, необычайно велико по сравнению с «временным горизонтом» Ляпунова, теорема Пуанкаре о возвращаемости неприменима к сильно неустойчивым системам. Дело в том, что за пределами временного горизонта Ляпунова понятие траектории утрачивает смысл, и нам необходимо использовать другое описание.

Рассмотрим более подробно механизм столкновений в системе твердых дисков. В такой системе мы можем провести различие между «предстолкновительными» и «постстолкновительными» корреляциями. Несколько лет назад А. Бельманс и Ж. Орбан [11] опубликовали результаты численных расчетов на основе молекулярной динамики, обуславливающей эволюции  $H$ -функции Больцмана. Они начали с некоррелированной системы твердых дисков и показали – в соответствии с прежними расчетами, что  $H$ -функция монотонно убывает со временем (рис. 6).

Затем после заранее заданного числа столкновений Бельманс и Орбан обращали скорости. В соответствии с парадоксом Лешмидта  $H$ -функция сначала в течение какого-то времени возрастает, достигая примерно начальной величины, после чего снова начинает убывать. Как это понять? В ходе «прямой» эволюции столкновения приводят к рандомизации скоростей и создают постстолкновительные корреляции, которые разрушаются последующими столкновениями. В ходе «обратной» эволюции, после обращения скоростей, мы имеем предстолкновительные корреляции, приводящие к уменьшению разброса скоростей.

Однако такая ситуация носит лишь переходный характер. Через достаточно большое время мы снова возвращаемся к механизму, увеличивающему разброс скоростей. Каков же в таком случае статус парадокса Лешмидта? Если бы мы могли обращать скорости в произвольные моменты времени, то никакого

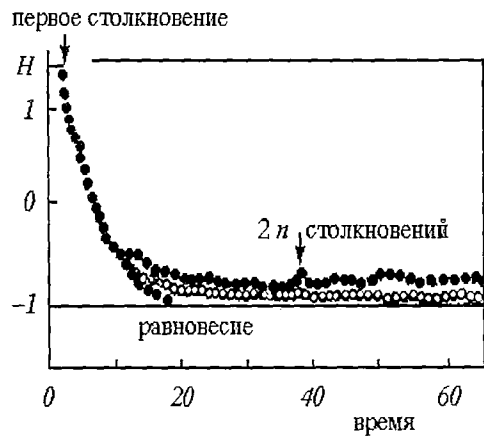


Рис. 6. Зависимость  $H$ -функции от времени для системы из 100 твердых дисков. Скорости заменяются на обратные после 50 столкновений (белые кружки) и после 100 столкновений (черные кружки)

предпочтительного направления времени не могло бы быть. Но именно это не позволяет нам делать существование временного горизонта Ляпунова. Мы можем обращать скорости только на временах, не превосходящих время Ляпунова. Результаты численного моделирования, полученные Беллемансом и Орбаном, показывают, что утверждения Чандрасекхара и Смолуховского, которые процитированы выше, неверны. Какова бы ни была продолжительность наблюдения, существует направление времени, ведущее к равновесию в нашем будущем.

Из новых численных экспериментов Кестемона и Марешаля [6, 7] следует, что стрела времени существует даже в состоянии равновесия. Они показали, что, хотя до столкновений молекулы некоррелированы, столкновения порождают корреляции. Столкновения создают корреляции, которые потом вымирают. Это не так удивительно. Действительно, механизм один и тот же как для равновесных, так и для неравновесных систем. В конце концов сталкивающиеся молекулы не знают, к какой системе они принадлежат – равновесной или неравновесной.

Итак, мы видим, что стрела времени существует даже в равновесной системе. Такой вывод, конечно, совершенно неожидан, так как из него следует, что микрообратимость в какой-то мере нарушается. В результате возникает выделенное направление времени, соответствующее последовательности [столкновения  $\rightarrow$  корреляции], а не последовательности [корреляции  $\rightarrow$  столкновения]. Это не так тривиально, как, например, для системы двух тел в ящике конечных размеров; там все было бы существенно проще.

Итак, мы имеем стрелу времени, которая в состоянии равновесия никак не проявляется макроскопически. «Нарушения» останутся на микроскопическом уровне именно потому, что система поддерживается в состоянии равновесия. Однако если мы снимем некоторые ограничения и позволим системе достичь неравновесного состояния, то стрела времени проявится и на макроскопическом уровне. Таким образом, мы приходим к выводу, который прямо противоположен выводу классической теории.

### 3. Новые перспективы квантовой теории

Теперь я хотел бы привести некоторые симптомы возникновения некоторых новых направлений в исследованиях по квантовой теории с точки зрения необратимых процессов [12]. В своем современном состоянии квантовая теория представляет довольно причудливую дуалистическую структуру. С одной стороны, волновая функция эволюционирует в гильбертовом пространстве вполне детерминистическим образом; эта эволюция обратима во времени:

$$id\Psi/dt = H_{\text{оп}} \Psi. \quad (1)$$

С другой стороны, процесс измерения вносит необратимость и стохастичность, что приводит к переходу от амплитуд вероятности в гильбертовом пространстве к собственно вероятности:

$$\Psi = c_1 u_1 + c_2 u_2 \quad (\text{измерение} \rightarrow |c_1|^2 \text{ и } |c_2|^2) \quad (2)$$

Квантовая механика приводит к парадоксальному выводу о том, что необратимость имеет смысл только в том случае, если мы производим наблюдение, – ситуация, напоминающая статус необратимости в классической механике до открытия сильно неустойчивых динамических систем. Дуалистическая интерпретация квантовой механики имеет смысл, когда процесс, описываемый уравнением Шредингера, обратим «сам по себе». Например, если мы рассмотрим идеализированную систему типа гармонического осциллятора (не взаимодействующую ни с каким полем), то ввести в такую систему необратимость

мы могли бы только с помощью измерения. Единственна ли такая возможность? Если ответ на наш вопрос был бы утвердительным, то это означало бы, что в природе не существует необратимых процессов, не зависящих от нашего измерения. Как избежать этого парадокса, четко сформулировал А. Ре: «Проблема измерения ... возникает из представления о том, что квантовая система обладает свойствами, только когда они измерены, хотя вне квантовой физики, по-видимому, нет ничего, что позволило бы произвести измерение» [22]. Необратимость «входит» через измерение. Но как быть с ситуациями, которые внутренне необратимы, таким как радиоактивность, квантовые скачки или смерть кошки Шредингера?

Интересно отметить, что в старой теории Бора – Зоммерфельда – Эйнштейна всегда было место для «внутренней необратимости». Действительно, в старой теории, с одной стороны, у нас были условия Бора–Зоммерфельда для энергетических уровней, задаваемых в характерных для теории интегрируемых систем переменных действия  $J$ :

$$J = \oint p dq \quad (3)$$

и, с другой стороны, переходы между уровнями, описываемыми Эйнштейном в терминах спонтанного и индуцированного излучения; Эйнштейн отчетливо понимал, что таким способом он вводит идею стохастичности и необратимости на уровне системы как целого – атома вместе с излучением. Эта точка зрения в его высказывании, приведенном в начале моего доклада. Можно ли ввести внутреннюю необратимость в квантовую теорию? Ясно, что для этого потребовались бы глубокие изменения [12–14]. В известном смысле это было предсказано еще Эддингтоном, когда он утверждал: «Вся интерпретация весьма смутная, но, по-видимому, она зависит от того, рассматриваете ли вы вероятность после того, как вам известно, что произошло, или вероятность с целью предсказания. Величина  $\Psi\Psi$  компл.сопр. получается при введении двух симметричных систем волн, бегущих в противоположных направлениях во времени» [15].

Описание в терминах гильбертова пространства, безусловно, тесно связано с проблемой обратимости во времени, и, если мы хотим ввести внутреннюю необратимость, то для этого необходимо в какой-то мере поступиться таким описанием. Эти вопросы недавно были рассмотрены в статьях, написанных мною совместно с моим коллегой Томио Петроски, и я могу привести здесь лишь некоторые общие результаты. Проще всего начать с соотношения неопределенностей в квантовой механике. Все знают обычные квантово-механические соотношения неопределенностей, выражающих то обстоятельство, что импульс и координату невозможно измерить одновременно со сколь угодно высокой точностью. Как вы знаете, это обусловлено тем, что импульс и координата связаны с некоммутирующими операторами. Обычное соотношение неопределенностей гласит:

$$\Delta p \Delta q > \hbar. \quad (4)$$

Интерпретация его стандартна: оно означает, что операторы, соответствующие импульсу  $p$  и координате  $q$ , не коммутируют. Рассмотрим теперь соотношение неопределенности:

$$\Delta E \Delta \tau \gtrsim \hbar. \quad (5)$$

Его интерпретация более тонка, так как нет оператора, который бы соответствовал времени. Тем не менее во многих ситуациях придать смысл этому соотношению в действительности не трудно. Например, если взять волновой пакет, то время его жизни связано с его спектральным представлением соотношением неопределенности (5). Мы можем далее рассмотреть нестабильное состояние, характеризваемое временем жизни  $\tau$ . Как известно в этом случае

$$\Delta E \geq \hbar/2\tau. \quad (6)$$



Однако это соотношение неопределенности имеет совершенно другой смысл. Действительно, время жизни имеет вполне определенное значение для данного квантового состояния и данного экспериментального устройства. Следовательно, это соотношение неопределенности устанавливает границы измерения одной квантовой переменной, в данном случае – энергии нестабильного квантового состояния. Мы можем записать это соотношение в виде

$$\bar{E}^2 - (\bar{E})^2 \geq (\hbar/2\tau)^2. \quad (7)$$

Оно выражает дисперсию значения энергии. Существование конечного времени жизни приводит к утрате контроля над точным значением энергии нестабильного квантового состояния, что проявляется в естественной ширине спектральной линии.

Мы считаем этот факт фундаментальным, так как он свидетельствует о необходимости новой формы квантовой теории. Требуются операторы не только некоммутативные, но и недистрибутивные. Действительно, если наблюдаемую энергию представить каким-то оператором  $\Lambda$ , действующим на гамильтониан  $H$ :  $\Lambda H$ , то (в соответствии с соотношениями неопределенности)

$$\Lambda H^2 \neq (\Lambda H)^2. \quad (8)$$

Следовательно, для того, чтобы учесть конечные времена жизни, нам необходимо обобщить квантовую механику. Времена жизни тесно связаны с резонансами (наглядный пример тому – квантовые скачки). Таким образом, нам необходима классификация квантовых систем, аналогичная той, которую для классических систем дает теорема Пуанкаре. В пределе больших квантовых систем мы можем придать смысл матрице плотности в квантовой теории в терминах подходящего аналитического продолжения, включающего направление времени [17–19]. Однако в этом пределе понятие волновой функции утрачивает смысл ( $\rho \neq \Psi\Psi^*$ ). Вследствие этого всякий раз, когда возникают диссипативные процессы, уравнение Шредингера, строго говоря, утрачивает смысл. Это относится к «внутренним необратимым процессам», включая все процессы измерения. Дуализм квантовой теории, о которой мы упоминали выше, уходит корнями в классификацию квантовомеханических, динамических систем. В настоящее время мы изучаем вопрос о том, к каким наблюдаемым приводит такая теория.

Основным параметром нашей теории служит отношение  $\rho$  между некоторым обратимым временем (типа величины, обратной частоте обращения электрона вокруг ядра) и необратимым временем (типа времени жизни электрона в возбужденном состоянии). Как показывают предварительные расчеты, отклонений от обычной квантовой электродинамики следует ожидать в том случае, если мы удерживаем члены порядка  $\rho^2$ . В квантовой электродинамике этот параметр очень мал; сейчас мы заняты поиском экспериментальных установок, которые позволили бы сделать предсказываемый эффект достаточно большим, чтобы его можно было измерить. В заключение я хотел бы отметить, что полностью согласен со следующим утверждением К. Поппера: «...Возможно, удастся ...дать недетерминистическую реинтерпретацию детерминистической программы Эйнштейна и в то же время объективистскую и реалистическую реинтерпретацию квантовой теории... Вполне возможно, что мир оказался бы таким недетерминистическим, каким он есть, если бы не было наблюдающего субъекта, который бы экспериментировал с ним и вмешивался в него» [16, с. 160].

#### 4. Энтропия в контексте космологии

Вряд ли найдется еще одна область науки, в которой эволюция идей была бы более «турбулентной», более неожиданной, чем современная космология. Как вы знаете, в 1917 г. Эйнштейн предложил первую космологическую модель, связанную с общей теорией относительности. Это было грандиозное достижение,

но его модель описывала лишь геометрическую, статичную Вселенную. Вскоре А. Фридман и Ж. Леметр установили, что решение, найденное Эйнштейном для его уравнения, неустойчиво, и что наша Вселенная могла возникнуть в результате «Большого Взрыва», а не быть статичной. Позднее было измерено красное смещение, которое подтвердило представление о расширяющейся Вселенной. И совсем недавно, в 1965 г., открытие реликтового излучения явилось своего рода вещественным свидетельством – «ископаемым», – подтверждающим, что наша Вселенная эволюционирует во времени.

Так, за сравнительно короткий промежуток времени мы совершили переход от статичной Вселенной к эволюционирующей Вселенной. Сегодня существует общепринятая теория космологии – «стандартная модель», описанная во многих книгах, которая, по-видимому, дает разумные ответы на большинство вопросов. Однако стандартная модель не описывает самые первые моменты в истории нашей Вселенной – так называемую «квантовую эру» (рис. 7).

Согласно стандартной модели, энтропия Вселенной остается постоянной, в то время как ее температура убывает при адиабатическом расширении Вселенной.

Для «сотворения» мира отведена особая точка – так называемый «Большой Взрыв». Но коль скоро мы намереваемся исследовать интересующие нас вопросы, нам необходимо задать себе вопрос: а что, собственно, означает Большой Взрыв? Откуда вообще берется эта начальная особенность? Как вообще понимать начальные условия, из которых эволюционировала наша Вселенная? Насколько можно судить, эти вопросы несколько выходят за рамки традиционной общей теории относительности. Сейчас очень популярна так называемая теория «расширяющейся Вселенной». Этой теории удалось ответить на некоторые вопросы, оставшиеся нерешенными в рамках стандартной модели. Однако она не приводит к лучшему пониманию Большого Взрыва, равно как не способствует и более глубокому пониманию второго начала термодинамики, а именно эти вопросы представляют для нас особый интерес.

Я хотел бы кратко изложить основные идеи сценария, предложенного недавно Е. Гунцигом, Ж. Гехенью, П. Нардоне и мной [18–21] и основанного на предшествующих работах многих других авторов, среди которых я выделил бы Р. Браута и Ф. Энглерта [17]. Разумеется, в настоящее время существует много сценариев, и список их увеличивается с каждым месяцем. Причина, по которой мной выбран тот конкретный сценарий, который я намерен предложить вашему вниманию, состоит в том, что он приводит к интересным предсказаниям, поскольку позволяет вычислить величину так называемой «удельной энтропии» – отношения числа фотонов к числу барионов. Действительно, исследование реликтового излучения показывает, что на один барион приходится  $10^9$  фотонов. Иначе говоря, число барионов чрезвычайно мало по сравнению с числом фотонов. Это термодинамический результат поистине поразителен, ибо показывает, что преобладающая часть энтропии Вселенной сосредоточена в фотонах. Это в свою очередь свидетельствует о том, что рождение Вселенной могло сопровождаться чудовищной «энтропийной вспышкой».

Такой вывод в корне противоречит традиционным космологическим следствиям из второго начала термодинамики, согласно которым Вселенная постепенно эволюционирует к состоянию с максимумом энтропии («тепловой смерти»), начиная с некоторого низкого уровня энтропии. Ныне тепловая смерть как бы оказывается позади нас, тесно связанная с рождением нашей Вселенной, в то время как различные явления, связанные с энтропией и продолжающиеся

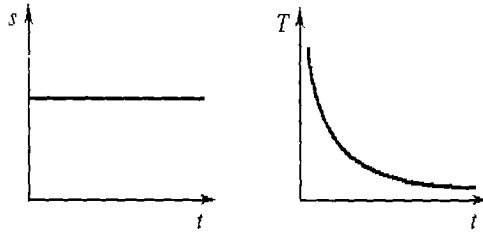


Рис. 7. Стандартная космологическая модель: температура со временем убывает, энтропия постоянна

поныне, будь то существование живых организмов или термоядерные реакции в недрах звезд, чрезвычайно слабы по сравнению с начальным производством энтропии во Вселенной.

Рассмотрим кратко те явления, которые так или иначе связаны с высказанными выше точками зрения. Начнем с так называемого «квантового вакуума»; такой вакуум представляет собой не нечто статичное, а полон флуктуаций, таких событий, как рождение и аннигиляция частиц. Замечательное предсказание Браута, Энглерта, Гунцига и Нардоне состоит в том, что если масса частиц, рожденных флуктуациями квантового вакуума превосходит некоторый порог – «критическую массу» порядка 50 масс Планка (масса Планка соответствует  $10^{-5}$  г, т.е. необычайно велика по сравнению с массой элементарных частиц), то такая масса может быть только черной дырой, так как соответствующая ей длина волны де Бройля примерно в 50 раз меньше ее радиуса Шварцшильда.

Модель Браута и других названных мной авторов является теоретико-полевой и включает как гравитацию, так и материю. Общеизвестно, что пока у нас нет надежной квантовой теории гравитации. Поэтому, чтобы избежать трудностей, вызванных отсутствием последовательной теории, мы избрали другой подход. Первое, что нам потребовалось, – это видоизменить уравнения Эйнштейна для поля, чтобы учесть возможность рождения материи на макроскопическом уровне (через тензор энергии – импульса).

Развитые нами соображения привели к обобщению термодинамики применительно к космологии. Традиционно помимо геометрического состояния Вселенной вводятся две физические переменные, описывающие космологическую жидкость, – плотность энергии  $\rho$  и давление  $p$ . Затем решают уравнения Эйнштейна в предположении, что существует уравнение состояния  $\rho = \rho(p)$ . Однако в нашем случае в описание естественно входит дополнительная переменная – плотность частиц  $m$ . Отсюда следует важный вывод о том, что рождение материи может происходить только как необратимый процесс, соответствующий переносу энергии из гравитационного поля; точнее говоря, переход от традиционной космологии (охватывающей только адиабатические преобразования замкнутых систем) к адиабатическим преобразованиям открытых систем приводит к изменению записи закона сохранения энергии. В нее теперь входит дополнительное давление  $p$ , связанное с рождением частиц. В соответствии с вторым началом термодинамики это давление всегда отрицательно и равно нулю.

Кроме того, показано, что входящая в традиционную космологию особенность связанная с Большим Взрывом, структурно неустойчива относительно необратимого рождения материи. В нашей космологии эволюция Вселенной начинается с вакуума Минковского, а не с особенности. Космологическая история делится на три стадии: период рождения, когда космологическая система эволюционирует от начальной флуктуации вакуума до пространства де Ситтера (кратко говоря, эта стадия соответствует экспоненциальному расширению); существование пространства де Ситтера (определяемое временами жизни образующих его элементов); фазовый переход, в процессе которого пространство де Ситтера превращается в адиабатически расширяющуюся Вселенную (эта стадия продолжается поныне). Первостепенную важность имеет то обстоятельство, что Вселенная де Ситтера служит своего рода аттрактором, свойство которого не зависит от начальной флуктуации.

Наша модель с самого начала учитывает второе начало термодинамики. Действительно, перенос энергии из искривленного пространства–времени к материи трактуется нами как необратимый процесс, приводящий к связанной с рождением материи вспышке энтропии. При таком подходе различие между пространством–временем и материей сводится только к производству энтропии; последнее же происходит только на первых двух стадиях космологической эволюции.

В концепции Ньютона пространство–время играет роль «вместилища», совершенно не зависящего от содержащейся в нем материи. В общей теории

относительности Эйнштейна материя и пространство-время взаимодействуют между собой через уравнения Эйнштейна для поля, связывающие геометрическое состояние Вселенной с распределением в ней материи. Такая точка зрения позволяет достичь поразительной унификации нашего описания природы. Но, как нам кажется, помимо программы построения единой теории, мы нуждаемся и в эволюционном механизме для существования стрелы времени, с которой мы сталкиваемся на всех уровнях физического описания. В изложенном мной подходе основной механизм необратимости следует из отношения между материей и пространством-временем. Последнее может порождать материю в ходе необратимого процесса, и обратный процесс невозможен.

Было бы интересно высказать несколько замечаний относительно микроскопических механизмов такой необратимости, которая соответствует своего рода разделению материи от гравитации. Как хорошо известно, квантовый вакуум полон флуктуаций: пары частиц могут рождаться из вакуума и аннигилировать. В таком процессе, как следует из соотношения неопределенности (5), энергия не сохраняется.

Я хотел бы высказать несколько замечаний по поводу черных дыр. Традиционным механизмом образования черных дыр является гравитационный коллапс. Черные дыры служат своего рода мембранами, которые «удерживают» материю с помощью самогравитации. Но, как показал Хокинг, черные дыры не так уж «черны»: они испаряются и имеют конечное время жизни. Испарение обусловлено взаимодействием черных дыр с квантовым вакуумом. Черные дыры притягивают в основном виртуальные частицы с отрицательной энергией и отталкивают на бесконечность частицы с положительной энергией (рис. 8).

Таким образом, мы получаем простой сценарий необратимого образования материи из пространства-времени с формированием на промежуточном этапе

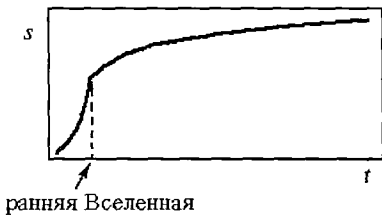


Рис. 8, а

Рис. 8, а. Эволюция энтропии для рассматриваемой модели

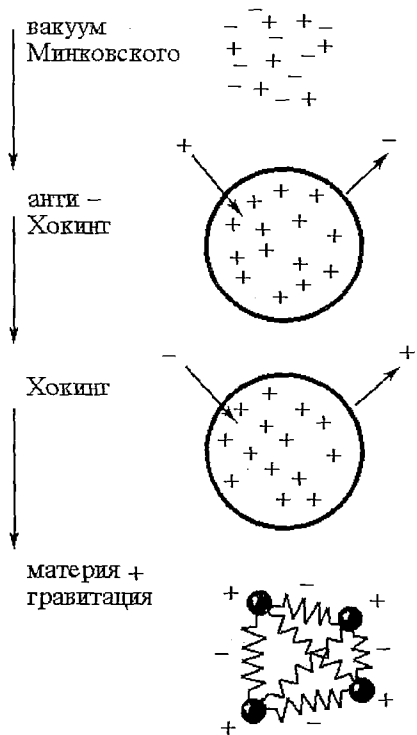


Рис. 8, б

Рис. 8, б. Переход от вакуума Минковского к черной дыре, вырождающейся в обычную материю

черных минидыр. В вакууме у нас, как обычно, существуют виртуальные частицы с положительной и отрицательной энергией. Если вследствие какой-нибудь флуктуации в одной и той же области окажется много частиц с положительной энергией, то ситуацию стабилизирует образование черной дыры, которая затем вырождается в обычную материю. Этот процесс, как нетрудно видеть, соответствует фазовому переходу между материей и гравитацией. Лукреций утверждал, что мир состоит из «атомов и пустоты»; мы же теперь могли бы сказать: «из атомов и полей». Этот дуализм является результатом необратимого процесса, в описание которого квантовая теория входит вместе с общей теорией относительности.

Я убежден, что модель, которую мы только что рассмотрели, далеко не окончательна. Но так или иначе, необратимость играет фундаментальную роль в описании природы, начиная с самых ранних стадий существования нашей Вселенной.

### Выводы

Позвольте подвести итоги сказанному. Я уверен, что мы все дальше отходим от классической картины физического мира в том самом направлении, на которое, как надеялся Б.Г. Кузнецов, мы должны были выйти, – в направлении отхода от идеи «определенного ничего», упоминавшейся в начале моего доклада. Повсюду мы наблюдаем спонтанную активность, необратимость, нелинейность, стохастичность, флуктуации, неустойчивости. Мы становимся теперь свидетелями своего рода конвергенции мира, с которым мы экспериментируем внутри себя, и миром, который мы видим вне нас. Это позволяет нам выйти за рамки классического дуализма, сформулированного в работах Р. Декарта и И. Канта, и достичь физики такого типа, для которой, по словам К. Поппера, «целью является картина мира, в которой есть место и биологическим феноменам, и человеческой свободе, и разуму» [16, с. 177].

В современном развитии идей нельзя не отметить любопытное совпадение. В конце нашего столетия мы приходим к необходимости переоценки человеческого фактора. Поразительно, что мы приходим также к необходимости переоценки некоторых основополагающих предпосылок физики. Чтобы справиться с новой ситуацией, необходимо новое мышление, новые наблюдения и взаимная терпимость.

### Библиографический список

1. Кузнецов Б.Г. Разум и бытие. М., 1972. Англ. пер.: *Kuznetsov B. Reason and Being*. Reidel, Dordrecht, 1987.
2. *Titus Lucretius Carus. De rerum natura. Libri sex*. Lipsiae, 1959. Рус. пер.: *Тит Лукреций Кар. О природе вещей*. М., 1983. Кн. 11, с. 216.
3. *Einstein A. Mitt. Phys. Ges. (Zurich)*, 1916, Nr. 18, 47–62; *Phys. Zeitschr.*, 1917, 18, 121. Рус. пер.: *Эйнштейн А. Собрание научных трудов*. Т. 3, № 44. М., 1966. С. 393.
4. *Prigogine I. From Being to Becoming*. San Francisco, 1980. Рус. пер.: *Пригожин И. От существующего к возникающему*. М., 1985.
5. *Prigogine I, Stengers I. Order out of Chaos*. L., 1983. Рус. пер.: *Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса*. М., 1986.
6. *Mareschal M., Kestemont E.J. Stat. Phys.* 1987. Vol. 48. P. 1187.
7. *Mareschal M., Kestemont E.// Nature*. 1987. Vol. 329, 6138. P. 427.

8. *Lighthill J.* The Recently Recognized Failure of Predictability in Newtonian Dynamics // *Predictability in Science and Society/* Mason J. et al., a special issue of the Proceedings of the Royal Society. 1986. Vol. 407. P. 35.

9. *Weyl H.* Philosophy of Mathematics and Natural Sciences. N.Y., 1949. Частичный рус. пер.: *Вейль Г.* О философии математики. М.–Л., 1934.

10. *Chandrasekhar S.* Stochastic problems in physics and astronomy // *Rev. Mod. Phys.* 1943. Vol 15. P. 3. Рус. пер.: *Чандрасекхар С.* Стохастические проблемы в физике и астрономии. М., 1947.

11. *Orban J., Bellemans A.* // *Phys. Lett.* 1967. Vol 24 A. P. 620.

12. *Prigogine I., Petrosky T.* An Alternative to Quantum Theory // *Physica*, 1988. Vol. 147A. P. 461.

13. *Prigogine I., Petrosky T.* Point care's Theorem and Unitary Transformations for Classical and Quantum Theory // *Physica*. 1988. Vol.147A. P. 439.

14. *Prigogine I., Petrosky T.* Intrinsic Irreversibility in Quantum Theory. Festschrift P. Mazur // *Physica*. 1988. Vol. 147A. P. 337.

15. *Eddington A.* Cifford Lectures. Cambridge, 1928. P. 216 sq.

16. *Popper K.* Quantum Theory and the Schism of Physics. Postscript to the Logic of Scientific Discovery. New Jersey, 1982.

17. *Brout R., Englert F., Gunzig E.* // *Ann. Phys.* 1978. Vol.115. P. 78.

18. *Gunzig E., Nardone P.* Fundamentals of Cosmic Physics. 1987. Vol. 2. P. 311.

19. *Géhéniau J., Prigogine I.* // *Found. Phys.* 1986. Vol. 16. P. 437.

20. *Prigogine I., Géhéniau J.* // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1986. Vol. 83. P. 6245.

21. *Gunzig E., Géhéniau J., Prigogine I.* // *Nature.* 1987. Vol. 330. P. 621.

22. *Rae A.* Quantum Physics: Illusion or Reality? // Cambridge, 1986. P. IX sq.

*Перевод с английского Н.В. Вдовиченко и И.И. Неретина*

*Под редакцией Ю.А. Данилова*

© Вопр. ист. естествозн. и техн. 1989. № 1. С.3.

## THE REDISCOVERY OF TIME

*I. Prigogine*

The report delivered at the VIII–th International congress of logic, methodology and philosophy of science in August 1987 is devoted to the modern conception of time, which was proposed by the collaborators of his school. The new approach to the problem, connected with the consideration of non–linear systems far from equilibrium, of so called dissipative structures, permits to overcome the barrier due to duality of the world description: deterministic and reversible in time laws at microlevel and statistical and obligatory non–reversible laws at macrolevel. The report bears review character.



Бельгийский химик Илья Пригожин родился в Москве 25 января 1917 г. в канун русской революции. У его родителей – инженера–химика Романа Пригожина и музыканта Юлии (Вишман) Пригожиной – был еще один сын. Благодаря стараниям матери Илья с детства играл на пианино. Ноты, как она позднее вспоминала, мальчик научился читать раньше, чем слова. В 1921 г. семья Пригожиных эмигрировала из России. Сначала они жили в Литве и Германии, а с 1929 г. поселились в Бельгии. Годы переездов, по словам Пригожиных, породили у него «острую восприимчивость к переменам»: « Начав изучать физику и химию, я был поражен тем, что исчез фактор времени». Пригожин интересовался историей и философией. Будущее же свое он связывал с профессией концертирующего пианиста.

Начальное и среднее образование Пригожин получил в школах

Берлина и Брюсселя, а затем изучал химию в Свободном университете в Брюсселе, где его особенно привлекала термодинамика – наука, связанная с тепловой и другими формами энергии. Став здесь же в 1943 г. бакалавром естественных наук, Пригожин написал диссертацию о значении времени и превращения в термодинамических системах, за которую два года спустя был удостоен докторской степени. В 1947 г. он был назначен профессором физической химии в Свободном университете, а в 1962 стал директором Солвеевского международного института физики и химии в Брюсселе.

В 1967 г. Пригожин был назначен директором Центра статистической механики и термодинамики Ильи Пригожина, который он основал при Техасском университете в Остине. С тех пор он работает одновременно и в Брюсселе и в Остине.

В 1977 г. Пригожину была присуждена Нобелевская премия по химии «за работы по термодинамике необратимых процессов, особенно за теорию диссипативных структур». «Исследования Пригожина в области термодинамики необратимых процессов коренным образом преобразовали и оживили эту науку». – сказал Стиг Классон в своей вступительной речи от имени Шведской королевской академии наук. Эта работа открыла для термодинамики «новые связи и создала теории, устраняющие разрывы между химическим, биологическим и социальным полями научных исследований... Исследования Пригожина отличаются также элегантностью и прозрачностью, поэтому ученого заслуженно называют «поэтом термодинамики»».

В 1961 г. Пригожин женился на Марине Прокопович. У супругов два сына. Пригожин известен в среде своих коллег как обходительный человек и незаурядный ученый, диапазон интересов которого чрезвычайно широк. Он увлечен литературой и археологией, по сей день играет на пианино, очень любит слушать музыку.

Помимо Нобелевской премии, Пригожин награжден золотой медалью Сванте Аррениуса Шведской королевской академии наук (1969), медалью Баурка Британского химического общества (1972), медалью Котениуса Германской академии естествоиспытателей «Леопольдина» (1975) и медалью Румфорда Лондонского королевского общества (1976). Ученый – член Бельгийской королевской академии наук, Королевского научного общества в Упсале и Германской академии естествоиспытателей «Леопольдина». Он является иностранным членом Американской академии наук и искусств, Польского и Американского химических обществ и других организаций. Пригожину присвоены почетные степени университетов Ньюкасл, Пуатье, Чикаго, Бордо, Упсалы, Льежа, Джорджтауна, Кракова и Рио-де-Жанейро.

© Лауреаты Нобелевской премии: Энциклопедия /Пер. с англ. М.: Прогресс, 1992