

## Иерархический подход — обобщение витализма и редукционизма

А. С. Каклюгин, Г. Э. Норман

**АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ КАКЛЮГИН** — кандидат физико-математических наук, доцент факультета молекулярной и биологической физики Московского физико-технического института (МФТИ). Область научных интересов: статистическая, химическая и молекулярная физика, конденсированные среды, химическая связь, системы заряженных частиц.

**ГЕНРИ ЭДГАРОВИЧ НОРМАН** — доктор физико-математических наук, профессор факультета молекулярной и биологической физики МФТИ, Соросовский профессор, председатель правления Московского физического общества. Область научных интересов: статистическая, химическая и молекулярная физика, конденсированные среды, системы заряженных частиц.

141700 Долгопрудный Московской обл., МФТИ, тел./факс (095)408-56-77, E-mail henry\_n@orc.ru

Самой плодотворной мыслью, сильнее всего стимулирующей прогресс в биологии, является, по-видимому, предположение о том, что все, что делают животные, это делают атомы, что в живой природе все результат каких-то физических и химических процессов, а сверх этого ничего нет.

*Ричард Фейнман [1, с. 182\*]*

Использованы принципы построения иерархии наук Фейнмана, Поппера, Медавара и Лоренца. Отмечены слабости предложенных ими иерархий. Подробно рассмотрен переход от физики атома или молекулы к классической статистической физике, когда возникает новое качество — локальная экспоненциальная неустойчивость движения частиц. Квантовая неопределенность в таких системах ничтожна, но конечна. Благодаря последнему, локальная неустойчивость приводит к стохастизации и необратимости траекторий частиц. Для перехода от неживой материи к живой по Попперу возникает новое свойство: способность решать проблемы. Определение Поппера дополняется постулатом, что редукция волновой функции при измерении есть специфическое качество живой материи. Обсуждаются следствия и общий характер иерархии, которая может иметь топологию более сложную, чем лестница или ветвящееся дерево.

### 1. Витализм и редукционизм

Поэтому в действительности для самого существования науки совершенно необходимо вот что — светлые умы, не требующие от природы, чтобы она удовлетворяла каким-то заранее придуманным условиям, как того требует наш философ.

*Ричард Фейнман [1, с. 162]*

Редукционизм — научная доктрина, согласно которой все свойства системы определенного уровня могут быть объяснены, исходя из свойств систем более низ-

кого уровня. Согласно этим представлениям, в организме не протекает никаких процессов, которые нельзя было бы объяснить путем изучения молекул и их взаимодействий. В противоположность этому, представления витализма связывают сущность и явления жизни с особым нематериальным началом. Для его обозначения использовались разные термины. В научной литературе принято говорить о жизненной силе.

Попытки разрешить противоречия витализма и редукционизма продолжаются. Шредингер [2] пишет, что «деятельность живого вещества нельзя свести к обычным законам физики». Категорическими противниками редукционизма в биологии выступают Медавары [3], Лоренц [4]. Несводимость законов биологии исключительно только к законам физики и химии неоднократно подчеркивал Поппер [5–7], употреблявший термин «жизненная сила» и обращавший также внимание на несводимость законов химии к законам физики. См. также [8–10].

Волькенштейн [11], напротив, утверждает, что в химических превращениях нет никаких явлений, кроме физических, и химия «сводится» к квантовой механике, статистической механике и физической кинетике. И далее: познание живой природы не приводит ни к каким противоречиям с основами физики — термодинамикой, статистикой, кинетикой, квантовой механикой и т.д. В этом смысле биофизика как особая отдельная наука не существует [11]. Редукционисты

\* Здесь и далее номер страницы дается по русскому переводу [1].

явно или неявно полагают, что несводимость законов биологии к физике эквивалентна витализму [11], т.е. признанию особой жизненной силы.

Ключевым является вопрос, требуется ли постулировать наличие жизненной силы и ее непознаваемость. Подобная капитуляция была неприемлема для науки нового времени. Однако редукционизм интуитивно представлялся для многих ученых противоречащим тому, что они наблюдали в природе и обществе. Это склоняло к витализму выдающихся ученых XIX века Либиха, Мюллера, Пастера, Virхова и др. Дополним список нашими великими соотечественниками XX века Вернадским и Бехтеревым.

Путь научного решения проблемы был намечен выдающимися мыслителями XX века: физиком Фейнманом (1918—1988) [1], биологами Медаваром (1915—1987) [3] и Лоренцем (1903—1989) [4] и философом Поппером (1902—1994) [5]. Эти ученые (и неявно Шредингер) ввели представление об иерархическом подходе (лестнице, таблице), устраняющем противоречия между витализмом и редукционизмом. Этот подход свободен от слабостей редукционизма и витализма, но воспринимает все их положительное содержание.

Для исследователя с естественнонаучными взглядами редукционизм является методологией научного исследования — исследовательской программой [1—7]. В витализме неприемлемым является введение жизненной силы как непознаваемой сущности. Однако жизненная сила, отражающая проявление определенных явлений — известных уже сейчас — в виде законов, в данный момент пока не найденных, может и должна занять свое место в ряду связей между различными уровнями описания.

## 2. Иерархический подход

Мы можем анализировать явления нашего мира, выделяя в нем разные уровни, устанавливая некоторую иерархию понятий и представлений.

*Ричард Фейнман [1, с. 133]*

Вся огромная армия исследователей, работающих на всех ступенях нашей лестницы, от одного края до другого, постепенно совершенствует наше понимание мира, и мы постепенно постигаем все колоссальное переплетение иерархий.

*Ричард Фейнман [1, с. 136]*

Фейнман не ставил своей целью точно определить разные уровни, но попытался лишь пояснить на примерах, что он имеет в виду, говоря об иерархии понятий и представлений. На одном конце иерархической лестницы Фейнман расположил основные законы физики. В качестве примеров следующего уровня он предложил термин «теплота» и понятие «кристалл соли». Еще один шаг по лестнице — свойства веществ вроде «коэффициента преломления» или «поверхностного натяжения». Продолжение восхождения по лестнице приводит к волнам, а затем уже к понятию «шторм». К тому же классу Фейнман относит и другие собирательные понятия: «солнечное пятно» или «звезда». Дальнейший подъем по иерархической лестнице сложности открывает такие вещи, как «сокращение мускулов» или «нервные импульсы», а затем и такое понятие, как «лягушка». Все дальше вверх по лестни-

це... и вот уже понятия «человек», «история», «политическая целесообразность». А еще выше наступает черед таким вещам, как «зло», «красота», «надежда»...

Фейнман дал описание иерархической лестницы, обращаясь к очень широкой аудитории, ибо его лекции в Корнельском университете затем в записи передавались по радио и телевидению. Поэтому описание лестницы дано в эмоциональном и образном стиле. Для нас же важно, что даже при такой манере изложения Фейнман не скрывает претензий физики на объяснение всего спектра явлений природы и общества в их внутреннем структурном единстве.

Лоренц [4] формулирует свой вывод еще более четко: человеческая культура и человеческий дух могут (и должны) исследоваться методами естествознания с присущими ему постановками вопросов. Лоренц отмечает, что Макс Планк был одним из первых, кто решился пробить дорогу от фундаментальнейшей из естественных наук — физики к фундаментальнейшей из всех философских дисциплин — теории познания. Среди физиков, разделяющих гносеологические выводы Планка, Лоренц называет Бриджмена.

Лоренц подчеркивает, что предложенная постановка вопроса покажется многим гуманитарным ученым едва ли не кошунством, вершиной догматической ограниченности или, по меньшей мере, предприятием, выходящим за пределы компетенции естествознания. Однако, как отмечает Лоренц, теперь есть и «настоящие» философы, принимающие точку зрения естествоиспытателей: Карл Поппер, Дональд Кэмпбелл и Вальтер Роберт Корти.

Медавары [3] записывают иерархию, как они говорят, эмпирических наук в виде:

↑ экология/социология  
биология организмов  
химия  
физика

При этом дается расшифровка иерархии в биологии: сообщество/организм/орган/клетка.

Поппер в своей части книги [5] дает такую схематическую иерархию:

- (12) экосистемы
- (11) царства животных и растений
- (10) животные и многоклеточные растения
- (9) ткани и органы
- (8) популяции одноклеточных организмов
- (7) клетки и одноклеточные организмы
- (6) органеллы (+ вирусы?)
- (5) жидкости и твердые тела
- (4) молекулы
- (3) атомы
- (2) элементарные частицы
- (1) субэлементарные частицы
- (0) неизвестные суб-субэлементарные частицы

Поппер подчеркивает, что это лишь набросок биологической части иерархической таблицы: она должна

иметь по меньшей мере вид иерархического дерева с различными ветвлениями. Из приведенного ясно, что общепринятой иерархической лестницы еще нет. Однако это никак не влияет на суть четкой конструктивной идеи нового подхода к таким иерархиям, сформулированного Медаварами и Поппером, а также, по-видимому, в неявном виде и Фейнманом. Этот подход принципиально отличен как от витализма, так и от редукционизма.

Виталисты разрывают иерархию на отдельные фрагменты и отказывают миру во внутреннем структурном единстве. Идея редукционизма, наоборот, заключается в том, что все свойства, явления, понятия определенного уровня или ступени могут быть объяснены из свойств более низкого уровня той же системы. Например, в живом организме нет ничего, что не может быть объяснено путем изучения отдельных молекул.

Идея же Медаваров и Поппера заключается в том, что любые утверждения, истинные и имеющие смысл для какого-либо уровня или науки, являются истинными и имеющими смысл для уровня или науки, занимающих любую более высокую ступень в иерархии. Обратное же несправедливо. Каждый уровень или наука включает не только информацию предыдущих, стоящих в списке ниже, но и свои собственные специфические понятия, которых нет на более низких уровнях. В этом ряду свое право на существование и познаваемость получает и «жизненная сила».

При подъеме по иерархической лестнице информационное содержание и эмпирическое богатство наук прогрессивно увеличивается. Каждая наука содержит все положения наук, расположенных ниже. При этом любой объект, находящийся на более высоком уровне, содержит идеи и понятия, свойственные только ему. Медавары и Поппер определяют это качество специальным термином — качеством «возникновения». Лоренц [4] не удовлетворен термином «возникновение» (эмергенция) и вводит термин «фульгурация», т.е. акт сотворения, или вспышка молнии.

Понятие «возникновение» важно не только для объяснения иерархической лестницы, но и для теории эволюции [6, 16—18]. Поппер полагает, что эволюция мира носит конструктивный, «возникающий» характер: в процессе эволюции появляются принципиально новые сущности и явления с неожиданными и действительно непредсказуемыми свойствами.

Нам представляется, что введение качества «возникновения» является исключительно важным вкладом Поппера, Медаваров и Лоренца, позволяющим освободиться от заблуждений как витализма, так и редукционизма. Вместе с тем нельзя не отметить логическую слабость применения ими понятия «возникновения». Например, Поппер категорически отрицает больцмановскую попытку совместить необратимость, заключенную во втором начале термодинамики и уравнении Больцмана, с обратимостью уравнений Ньютона. Однако дальше полунтуитивных аргументов («будущее никоим образом не содержится в прошлом или настоящем, хотя они и накладывают жесткие ограничения на будущее» [6], стр. 130) дело не идет. Медавары [3] заявляют, что нетрудно доказать ложность утверждений редукционизма и приводят следующие аргументы:

— в программе лекций по биологии ничего не говорится о двухпартийном правительстве или о конституции США,

— в программах по физике и химии ничего не говорится ни о наследственности, ни об инфекциях, ни о половом поведении и страхе,

— бессмысленно утверждать, будто политико-социологические понятия вроде избирательной реформы или дефицита внешней торговли могут быть объяснены через понятия биологии, и совсем уж нелепо утверждать, что они могут быть объяснены через понятия физики или химии.

Никаких иных аргументов Медавары не приводят, а эти аргументы при всей их интуитивной очевидности за доказательства считать нельзя. Никаких конкретных примеров качеств, возникающих на той или иной ступени, не приводится (исключение составляет качество «живой материи», предложенное Поппером и обсуждаемое в разд. 4). За кадром остается и ответ на вопрос, нужно ли постулировать эти новые качества. Если да, то чем концепция Поппера и Медаваров отличается от витализма? Если же нет, то что же тогда эти качества из себя представляют?

В следующем разделе мы попытаемся ответить на эти вопросы на примере перехода с уровня отдельной молекулы или атома на уровень статистической физики.

### 3. От атомов и молекул — к коллективу классических частиц

По крайней мере в прошлом всегда оказывалось, что для того, чтобы выйти из аналогичного затруднения, приходилось пожертвовать каким-то глубоко укоренившимся представлением. Весь вопрос как раз и сводится к тому, что сохранить, а что отбросить.

*Ричард Фейнман [1, с. 162]*

#### 3.1. Суть проблемы

Движение атомов и молекул в классической механике подчиняется уравнениям Ньютона, обратимым во времени. А законы статистической физики необратимы в соответствии с законом возрастания энтропии. Суть проблемы заключается в непрекращающихся безуспешных попытках доказать второе начало термодинамики, кинетическое уравнение Больцмана и др., опираясь исключительно на обратимые уравнения Ньютона. Вопрос возник более ста лет назад, начиная с возражений, высказанных Больцману со стороны Цермело и Лошмидта, см., например [6, 19].

Аргументы Больцмана в дискуссии с Цермело и Лошмидтом полностью разделяет Фейнман, сформулировавший их в таком виде: «События нашего мира необратимы в том смысле, что их развитие в одну сторону весьма вероятно, а в другую — хотя и возможно, хотя и не противоречит законам физики, но случается один раз в миллион лет» [1, с. 119]. Точку зрения Больцмана и Фейнмана разделяют Боголюбов, Чириков, Синай, Либовиц, Хувер [19—21]. Привлекаются соображения о колоссальном количестве атомов и молекул, из которых состоят макроскопические тела, о практической невозможности полного механического описания таких тел, т.е. фактической неполноте наших знаний, о нелинейности динамических систем [22] и т.п.

Крылов [23] и Поппер [6] считали точку зрения Больцмана и его единомышленников примером глубоко укоренившегося представления, каковым по совету Фейнмана и стоит пожертвовать. Больцмановское представление в силу теоремы возврата Пуанкаре допускает существование мира с убывающей энтропией, а потому должно быть отвергнуто [6]. Больцману возражали Ландау [24], Пригожин [25, 26], Кадомцев [27]. Дискуссия не утихает до сих пор [28], о чем свидетельствует и проведение круглого стола «Microscopic origins of macroscopic irreversibility» в программе 20-ой Международной конференции по статистической физике (Париж, 1998). Две противоположные точки зрения в присутствии двух тысяч ученых отстаивали Либовиц и Пригожин. Сухое и сокращенное изложение их эмоциональных речей приведено в [20, 25]. Нам их аргументация [6, 23–28] не представляется достаточно убедительной.

Ниже представлена точка зрения авторов, основанная как на теоретических соображениях [12–15], так и на результатах молекулярно-динамического моделирования [29–32].

### 3.2. Метод молекулярной динамики

Идея метода очень проста: всевозможные классические системы и среды моделируются совокупностью  $N$  движущихся атомов и/или молекул, взаимодействующих друг с другом. Численным интегрированием соответствующей системы уравнений Ньютона

$$m_i d^2 \mathbf{r}_i(t) / dt^2 = \mathbf{F}_i[\mathbf{r}(t)] \quad (1)$$

или Гамильтона

$$m_i d\mathbf{v}_i(t) / dt = \mathbf{F}_i[\mathbf{r}(t)] \quad (2a)$$

$$d\mathbf{r}_i(t) / dt = \mathbf{v}_i(t) \quad (2б)$$

для каждой частицы определяются траектории всех частиц. Здесь  $m_i$ ,  $\mathbf{v}_i$ ,  $\mathbf{r}_i$  и  $\mathbf{F}_i$  — масса, скорость, координата  $i$ -ой частицы и сила, действующая на эту частицу,  $i = 1, 2, \dots, N$ . Величины  $\mathbf{v}_i$ ,  $\mathbf{r}_i$  и  $\mathbf{F}_i$  — векторные. Векторы  $\mathbf{v}_i$  и  $\mathbf{r}_i$  явно зависят только от времени  $t$ , а  $\mathbf{F}_i$  — только от координат частиц. Под  $\mathbf{r}(t)$  понимается совокупность координат всех частиц  $\mathbf{r}(t) = \{\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_N(t)\}$ . Аналогичный смысл будет вкладываться и в обозначение  $\mathbf{v}(t)$ . Значение  $N$  в зависимости от цели расчетов изменяется в современных работах от нескольких частиц до десятков миллионов.

Сила, действующая на частицу,

$$\mathbf{F}_i = -(\partial / \partial \mathbf{r}_i) U(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N) \quad (3)$$

где  $U$  — потенциальная энергия. Например, для парного потенциала  $\Phi(r)$  взаимодействия частиц друг с другом

$$U(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N) = \sum_{i>j} \Phi(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \quad (4)$$

Функции  $U$  считаются заданными в методе молекулярной динамики (ММД). Их определение лежит вне рамок ММД. Частицы могут быть нейтральными, заряженными, поляризуемыми, дипольными, взаимодействие — парным, многочастичным, изотропным, анизотропным и др. Природа взаимодействия атомов или молекул друг с другом определяется квантовой

механикой. Система же уравнений (1) или (2) является классической. Внешние поля также могут быть включены в  $U$ . Полная энергия системы  $E$  есть сумма кинетической  $K$  и потенциальной  $U$  энергий:

$$E = K + U \quad (5)$$

$$K = \sum_{i>j}^N m v_i^2 / 2 \quad (6)$$

Решение системы уравнений (1) или (2) дает траектории частиц  $\{\mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t)\}$ . Далее, используя известные фундаментальные соотношения, т.е. из первых принципов усреднением по траекториям находится любая информация о системе, например, энергия, давление, коэффициенты переноса, корреляционные и автокорреляционная функции и т.д.

Огромная литература по ММД и его применению, накопившаяся за 40 лет, свидетельствует о безукоризненном выполнении в ММД-расчетах всех законов статистической физики и физической кинетики, см., например, работы [21, 33, 34] и ссылки в них. Все системы демонстрируют необратимое поведение, в равновесии выполняется распределение Максвелла, перенос подчиняется соотношениям Эйнштейна—Гельфанда и формулам Грина—Кубо. Например, одно и то же значение коэффициента диффузии  $D$  следует из выражений

$$\langle [\mathbf{r}_i(t + \tau) - \mathbf{r}_i(t)]^2 \rangle = 6D\tau + \text{const} \quad (7)$$

$$\text{и } D = (1/3) \int_0^{T_c} \langle \mathbf{v}_i(t) \mathbf{v}_i(t + \tau) \rangle d\tau \quad (8)$$

где  $T_c$  — время релаксации.

Имеется количественное согласие и с экспериментальными данными при соответствующем выборе функции  $U$ .

Как видим, ММД как будто бы дает обширные компьютерно-экспериментальные данные для разрешения фундаментального противоречия между макроскопической необратимостью процессов в системах многих частиц и микроскопической обратимостью исходных уравнений движения этих частиц. Тем не менее, несмотря на то, что результаты ММД, как указывалось выше, сами по себе являются однозначными и непротиворечивыми, выводы из них для оснований статистической физики и физической кинетики разные авторы делают прямо противоположные.

А.М. Евсеев в пленарном докладе на конференции в Горьком (1978), Левек и Верле [35], Лебовиц в [20] и в докладе в Париже, классик ММД Гувер [21] утверждают, что ММД непосредственно доказал правоту Больцмана. В то же время те же Левек и Верле [35] с горечью пишут, что результаты ММД используются и для опровержения точки зрения Больцмана.

Дело в том, что численное решение уравнений Ньютона всегда является приближенным. Даже авторы [31] разошлись во мнениях и написали альтернативные формулировки:

ММД дает правильные результаты *благодаря* ошибкам численного интегрирования,

ММД дает правильные результаты *вопреки* ошибкам численного интегрирования.

Чтобы разобраться в смысле этих формулировок, надо подробнее остановиться на ошибках численного интегрирования уравнений Ньютона. Теории ММД посвящены работы [29—32].

### 3.3. Экспоненциальная неустойчивость системы уравнений Ньютона

Система уравнений (1) или (2) экспоненциально неустойчива для коллектива многих (больше двух) частиц, по крайней мере в жидкой и газовой фазах [19—23, 25—28, 36]. Поясним это. Допустим, мы знаем точное решение  $\{r(t), v(t)\}$  системы (1) для заданной функции  $U$  и частиц одной и той же массы  $m$ . Вдоль этой траектории выбираем некоторое число  $I$  отрезков  $\{r_{ik}(t), v_{ik}(t)\}$  для статистически независимых начальных условий,  $k = 1, \dots, I, i = 1, \dots, N$ . Затем находим точное решение  $\{r'_{ik}(t), v'_{ik}(t)\}$  для тех же отрезков, но при других начальных условиях, мало отличающихся от первых, например, начальные координаты нескольких частиц сдвинуты на расстояния порядка  $10^{-10}$  их диаметра для каждого отрезка. По прошествии некоторого времени  $t_l$  усредненные отличия координат и скоростей траекторий второго типа от отрезков первой траектории в совпадающие моменты времени

$$\begin{aligned} \langle \Delta v^2(t) \rangle &= (1/NI) \sum_{i,k}^{N,I} [v_{i,k}(t) - v'_{i,k}(t)]^2 \\ \langle \Delta r^2(t) \rangle &= (1/NI) \sum_{i,k}^{N,I} [r_{i,k}(t) - r'_{i,k}(t)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

будут экспоненциально нарастать для  $t_l < t < t_m$ :

$$\langle \Delta v^2(t) \rangle = A \exp(Kt), \quad \langle \Delta r^2(t) \rangle = B \exp(Kt) \quad (10)$$

Величина  $K$  является средним (по пространству) значением максимального показателя Ляпунова [19, 21, 36]. Ее также называют  $K$ -энтропией, или энтропией Крылова—Колмогорова. Значения  $A$  и  $B$  определяются начальными смещениями. Для

$$t > t_m \approx K^{-1} \ln [(6kT/m) / \langle \Delta v^2(t_l) \rangle] \quad (11)$$

где  $T$  — температура

наступает насыщение: разбегание переходит на диффузионный режим [29]

$$\begin{aligned} \langle \Delta v^2(t) \rangle &= 2 \langle v^2 \rangle = 6kT/m, \\ \langle \Delta r^2(t) \rangle &= 6D(t - t_m) + \langle \Delta r^2(t_m) \rangle \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь  $3kT/m$  — квадрат тепловой скорости;  $D$  — коэффициент диффузии, тот же, что и в (7), (8). По прошествии времени  $t_m$  система частиц забывает свои начальные условия.

Выражения (10)—(12) были подтверждены расчетами ММД как для нейтральных [29—32, 21], так и заряженных [37, 38] частиц. Выбиралась  $I=50 \div 150$ ,  $N=10 \div 200$ . При численном интегрировании микроскопические ошибки вносятся на каждом шаге. Экспоненциальное разбегание траекторий проверялось

тремя способами: сравнивались (а) траектории для близких начальных условий; (б) траектории, рассчитанные с различной точностью для тождественных начальных условий, (в) прямая траектория и обратные траектории для различных моментов  $t/2$  обращения времени. В последнем способе конечные точки обращенных траекторий для моментов времени  $(-t/2)$  сопоставлялись с начальными точками прямых траекторий. Способы (б) и (в) дают возможность однозначно определить значение  $t_m$ , характеризующее время динамической памяти для данной схемы численного интегрирования и выбранного шага интегрирования [39].

Значение  $K$  и характер зависимостей (10)—(12) не зависели от способа расчета. Величина  $t_l$  также оказалась не зависящей от способа расчёта, но зависела от выбора начальных условий [39]. Таким образом, величины  $K$  и  $t_l$  являются характеристиками исследуемой системы частиц, а не схемы численного интегрирования. Величина  $K$  имеет смысл скорости роста энтропии [21, 36].

### 3.4. Флуктуации полной энергии $E$

Еще одним следствием приближенности численного интегрирования является то, что постоянство энергии  $E$  (5) имеет место лишь в среднем. Необходимым контролем правильности алгоритма и программы ММД является проверка соблюдения вдоль траектории постоянства  $E$  только в среднем. Таким образом, нельзя говорить, что ММД моделирует канонический ансамбль.

Значение  $E$  от шага к шагу флуктуирует около среднего значения, т.е. траектория, рассчитываемая в ММД, лежит не на поверхности  $E = \text{const}$ , как должно было бы быть для решений уравнений Ньютона (1) или Гамильтона (2). Эта траектория располагается в некотором слое толщины  $\Delta E > 0$  около поверхности  $E = \text{const}$ . Значение  $\Delta E$  определяется точностью и схемой численного интегрирования [29, 32].

Роулэндс [40] также проанализировал погрешности численного интегрирования в ММД, нашел величину флуктуаций полной энергии вдоль траектории и определил вид эффективного гамильтониана, которому удовлетворяют траектории частиц, рассчитываемые ММД. Проведенный анализ позволил предложить алгоритмы, повышающие точность численного интегрирования уравнений Гамильтона [40—42].

Переход от расчетов с одним значением  $\Delta E$  к интегрированию с другим значением  $\Delta E$  никак не влиял на результаты ММД [29—32].

### 3.5. Статистический смысл метода молекулярной динамики

Из сказанного следует, что уравнения движения, которым удовлетворяют траектории ММД, не совпадают с уравнениями (1) или (2). Уравнения ММД были предложены [29, 31, 32] в виде

$$m_i d^2 r_i(t) / dt^2 = F_i[r(t)] + z_i(t) \quad (13)$$

или

$$m_i dv_i(t) / dt = F_i[r(t)] + \eta_i(t) \quad (14a)$$

$$dr_i(t) / dt = v_i(t) + \xi_i(t) \quad (14b)$$

Величины  $z$ ,  $\eta$  и  $\xi$  определяются точностью и схемой численного интегрирования:

$$z = C_z x^{(k+2)} h^k + R, \eta = C_\eta v^{(n+1)} h^n + R, \xi = C_\xi x^{(m+1)} h^m + R \quad (15)$$

здесь  $C_z$ ,  $C_\eta$ ,  $C_\xi$  — коэффициенты, зависящие от конкретного метода;  $h$  — шаг интегрирования;  $k$ ,  $n$ ,  $m$  — порядки аппроксимации схемы;  $R$  — ошибки округления.

Непосредственный расчет [29—31, 37, 38] показал, что экспоненциальная расходимость траекторий не существенна на временах порядка  $\tau_c$  для автокоррелятора скорости, т.е. на этих временах уравнения (13) и (14) практически не отличаются от уравнений (1) и (2). Забывание начальных условий начинается с больших времен.

Таким образом, ММД — это метод, сохраняющий динамику, близкую к ньютоновской, на временах молекулярной релаксации и проводящий статистическое усреднение по начальным условиям [29—32]. Точки на фазовой траектории системы, отстоящие друг от друга на времена, большие  $t_m$ , образуют совокупность точек, случайно блуждающих в слое толщиной  $\Delta E$  вокруг гиперповерхности постоянной энергии  $E$ , на которой должна была бы лежать точная ньютоновская траектория. Набор этих точек подобен набору, получаемому методом Монте-Карло. Отличие сводится лишь к величине  $\Delta E$ , от которой, как было отмечено выше, ничего не зависело в проведенных до сих пор расчетах.

Теперь можно вернуться к вопросам «*вопреки*» или «*благодаря*».

Единственной величиной, определяющей функцию распределения системы, является ее энергия, точнее говоря, изоэнергетическая гиперповерхность в фазовом пространстве  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E$  [24]. Надежное вычисление статистических средних методом МД обусловлено отсутствием сильных искажений формы гиперслоя  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E \pm \Delta E/2$  по сравнению с гиперповерхностью  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E$  [29, 31] при использовании этого метода, т.е. *вопреки* ошибкам численного интегрирования.

В то же время правильный результат при статистическом усреднении по гиперповерхности  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E$  возможен лишь в том случае, если фазовая траектория системы покрывает всю эту гиперповерхность. Возможность этого для ньютоновских траекторий до сих пор не доказана. Молекулярно-динамическая фазовая траектория системы движется внутри гиперслоя  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E \pm \Delta E/2$ . Стохастичность этого блуждания для больших времен облегчает попадание такой траектории во все части гиперповерхности  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E$ . Соответствие результатов ММД законам физики говорит о том, что это действительно имеет место. Поэтому можно сказать, что достоверное вычисление статистических средних при использовании ММД происходит *благодаря* ошибкам численного интегрирования. В этом сценарии ММД также необходимо исключение сильных искажений формы гиперповерхности  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E$ , т.е. выводы этого и предыдущего абзаца никак не противоречат друг другу, поскольку свидетельствуют лишь о двойной роли погрешностей в ММД. Таким образом, достоверное вычисление статистических средних при использовании ММД происходит как *благодаря*, так и

*вопреки* ошибкам численного интегрирования уравнений Ньютона (1) или Гамильтона (2).

### 3.6. Физический аналог погрешностей численного интегрирования

Возникает вопрос, какое отношение могут иметь ошибки численного интегрирования к реальным системам, изучаемым статистической физикой и физической кинетикой. Для того, чтобы развеять эти сомнения, напомним результаты работ [12—15]. В них было введено понятие квазиклассических траекторий и получены уравнения движения в квазиклассическом приближении, т.е. при переходе к классическому пределу были сохранены первые поправки по постоянной Планка  $\hbar$ . Полученные уравнения отличаются от (2) появлением случайных источников  $\beta\phi(t)$  и  $\alpha\chi(t)$ , мощность которых определяется тем, что квадратичная форма их амплитуд  $\beta$  и  $\alpha$  пропорциональна постоянной Планка и второй производной гамильтониана системы по той переменной, чья производная по времени определяется в данном уравнении (в первом уравнении это вторая производная по координатам, во втором — обратная масса). Вводя  $\delta$ -коррелированные случайные функции единичной мощности  $\langle \chi_i(t)\chi_i(t') \rangle = \delta_{ii}\delta(t-t')$ ,  $\langle \phi_i(t)\phi_i(t') \rangle = \delta_{ii}\delta(t-t')$ , запишем уравнения Гамильтона (2) с учетом этих поправок в инвариантном виде:

$$dp_i/dt = -{}_q\nabla_i H + \hbar^{1/2}\alpha_{ij}\chi_j(t) \quad (16a)$$

$$dq_i/dt = {}_p\nabla_i H + \hbar^{1/2}\beta_{ij}\phi_j(t) \quad (16b)$$

Здесь индексы  $i$  и  $j$  пробегает значения до  $3N$  ( $N$  — число частиц системы), нумерующие (обобщенные) координаты, по повторяющимся индексам подразумевается суммирование. В целях единообразия мы записали  $\partial/\partial q_i = {}_q\nabla_i$  и  $\partial/\partial p_i = {}_p\nabla_i$ . В такой записи выражения для амплитуд могут быть представлены в виде

$$\beta_{is}\beta_{sj} = {}_p\nabla_i {}_p\nabla_j H \quad (17)$$

$$\alpha_{ik}\alpha_{kl}\alpha_{ll}\alpha_{ij} = {}_q\nabla_i {}_q\nabla_s H {}_q\nabla_s {}_q\nabla_j H \quad (18)$$

В случае изотропных масс  $\beta$  пропорциональна единичной матрице. Случайные функции  $\phi(t)$  описывают распывание волнового пакета,  $\chi(t)$  — индетерминированность (дифракцию), обусловленную взаимодействием частиц друг с другом.

Поясним уравнения (16)–(18). При всем кажущемся незначительном отклонении от гамильтонова вида это отклонение является принципиальным. Оно описывает не только случайное смещение по пространственным координатам (16a), но и поправку в (16b); производная координаты по времени уже не пропорциональна соответствующему импульсу  ${}_p\nabla_i U = p/m$ . Именно наличие двух поправок обеспечивает выполнение соотношения неопределенностей вдоль всей траектории. Сама траектория при незначительном локальном изменении имеет существенные глобальные изменения: она выходит за рамки касательного расслоения конфигурационного пространства.

Рассмотрим принципиальную разницу классического и квантового движений. Дело в том, что классическое движение описывается фазовой траекторией в фазовом пространстве размерности  $6N$ . Квантовое состояние характеризуется волновой функцией  $\Psi$ , т.е. точкой в гильбертовом пространстве, квантовое движение — эволюцией волновой функции в этом пространстве. Установить соответствие между траекторией в фазовом пространстве и квантовой эволюцией в гильбертовом пространстве ни при каком конечном значении  $\hbar$  не удастся. Это связано с тем, что в классическом случае имеет место система причинно связанных событий, а в квантовом случае система событий (даже случайных) введена быть не может (наиболее радикальные исследователи считают, что в квантовой механике события отсутствуют вообще [26]). Система событий в квантовой механике возникает в результате измерений, причем соответствие событий с эволюцией волновой функции квантовой системы вероятностное, неоднозначное и имеет точность, ограниченную соотношением неопределенностей. Процедура измерения является мостом между квантовым и классическим описанием динамики.

Взаимоотношения между квантовой и классической механикой описаны в литературе для двух случаев. В первом (А) — система описывается по форме квантовым образом, но условия движения почти классические (такое описание называют квазиклассическим). В этом случае сохраняется форма квантового описания состояний и перейти к классической форме, т.е. к системе причинно связанных событий, не представляется возможным. Квазиклассическое уравнение квантовой эволюции (Шредингера) не сводится к классическим уравнениям движения и содержит определенные поправки. В случае (Б), если исходить из уравнения квантовой эволюции при  $\hbar=0$ , для некоторым образом определенных средних величин (центра тяжести волновой функции и т.п.) устанавливается справедливость уравнений классической механики (обычно в форме уравнения Гамильтона—Якоби). Считая, что система событий определится именно этими величинами, можно быть уверенными, что их зависимость от времени будет следовать классической механике. Однако жестко связывая эти средние величины с траекторией, определяемой уравнениями классической механики, мы закрываем путь для получения квантовых поправок. «Наведение моста» между квантовым и классическим описаниями, предлагаемое в [12—15], позволяет описать динамическую систему уравнениями, классическими по форме, но сохраняющими главные исчезающие квантовые поправки.

В общем виде соотнести квантовую эволюцию с классической траекторией невозможно. Для квантовой эволюции, описываемой волновой функцией  $\Psi$ , справедлива формула, аналогичная формуле для условной вероятности. Подчеркнем, что эта формула оказывается справедливой не для вероятности, а для самой волновой функции  $\Psi$ . Стандартно вводимая процедура «измерения» как проектирование точки гильбертова пространства на фазовое пространство имеет ограниченную точность, не говоря уже о несоответствии структур этих пространств. События, фиксируемые в результате последовательных измерений, реализуют последовательность событий, вероятности которых удовлетворяют формуле для условных вероятностей,

но для систем, далеких от классических, траектория как последовательность таких событий может вообще не существовать.

В [12—15] предложено использовать систему событий, возникающих при последовательных измерениях состояний, определяемых эволюцией волновой функции квантовой системы с использованием вероятностной интерпретации  $|\Psi|^2$ . Оказывается, что в квазиклассическом случае такая система событий может рассматриваться как марковский случайный процесс и ему можно сопоставить стохастическую траекторию в пространстве размерности  $6N$ . При  $\hbar \rightarrow 0$  пучок реализаций таких траекторий стягивается к ньютоновской траектории в фазовом пространстве. Таким образом, в [12—15] динамика квантовой системы в условиях, близких к квазиклассическим, моделируется траекторией классической системы со стохастическими «помехами» в соответствии с (16). Пучок вероятностных траекторий, задаваемых этими статистическими поправками, будет приводить к тому же самому распределению, что и результат квантовой эволюции этой системы после измерения. Такое классическое описание движения со стохастическими поправками оказывается корректным — совокупность этих траекторий задает марковский случайный процесс, для вероятностей последовательных событий реализуется формула для условной вероятности, а распределения оказываются слабо зависимыми от того, когда происходят последовательные измерения. Дополнительным условием (по отношению к упомянутым выше) является то, что время между измерениями должно быть порядка  $\sim (m / |\partial^2 U / \partial q_i \partial q_k|)^{1/2}$  (или меньше).

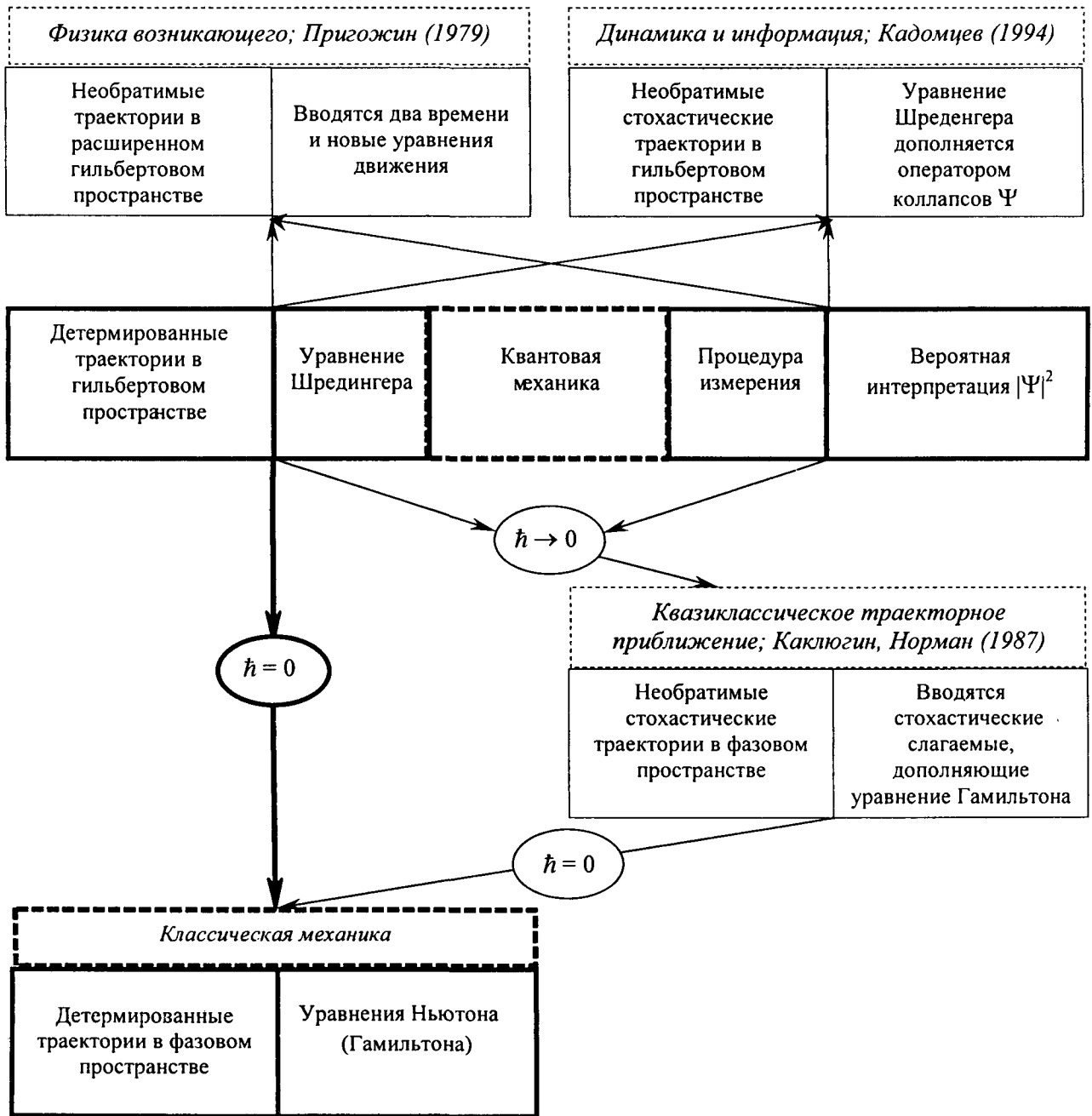
Поправки порядка  $\hbar^{1/2}$  для квазиклассических величин в конечных системах получены в [43], где исходили из того, что в квазиклассическом пределе уравнения движения для квантовых средних сводятся к обычным дифференциальным уравнениям первого порядка. На роль слабых неупругих процессов обращают внимание Герценштейн и Кравцов [44], рассмотревшие возмущения траектории под действием теплового электромагнитного поля [45] и спонтанного излучения низкочастотных фотонов [46—48].

Уравнения (16)—(18) опубликованы в 1987 г. [12]. Кадомцев [27] в своих работах 1994—1997 гг. также пытается учесть необратимость измерений в динамических уравнениях. Однако в отличие от [12] он вводит операцию измерения не в классические уравнения Ньютона, как это сделано в (16)—(18), а в уравнение Шредингера. Вместо уравнения Шредингера предлагается следующее уравнение:

$$i\hbar \partial \Psi / \partial t = H\Psi + M\Psi \quad (19)$$

где  $M$  — оператор коллапсов (редукции) волновой функции в результате измерений. Оператор  $M$  введен Кадомцевым, этот оператор обеспечивает необратимость уравнения (19) в отличие от уравнения Шредингера. Однако уравнение (19) представляется нам ошибочным.

Пригожин [25, 26] ищет решение проблемы необратимости в переходе рассмотрения динамики из гильбертова пространства в некое обобщенное пространство. Взаимоотношение трех подходов иллюстрируется на схеме.



Схема, иллюстрирующая стандартный переход от квантовой механики к классической (жирная рамка) и подходы Пригожина, Кадомцева и [12–15]

### 3.7. Микроскопическое происхождение макроскопической необратимости

Вернемся к уравнениям (14). Они очень похожи на (16). Разница заключается лишь в количественных различиях между  $\eta$  и  $\xi$  в (14) и  $\varphi_i^j(t)$  и  $\chi_i^j(t)$  в (16). Однако в проведенных расчетах отмечалось, что переход от вычислений с одними значениями  $\eta$  и  $\xi$  к интегрированию с другими значениями  $\eta$  и  $\xi$  никак не влиял на результаты ММД. Ошибки численной схемы играют роль ничтожной (но всегда конечной!) квантовой

неопределенности, имеющей место в любой системе, считающейся классической. Эта неопределенность рвет динамически детерминированные ньютоновские траектории, обеспечивает перемешивание внутри гиперслоя  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E \pm \Delta E/2$ , сохраняя при этом ньютоновскую динамику на временах молекулярной релаксации и не допуская существенных искажений формы гиперповерхности  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E$ .

Как ошибки численного интегрирования, так и квантовая неопределенность, обусловленная функциями  $\varphi_i^j(t)$  и  $\chi_i^j(t)$  и другими факторами, являются спусковыми курками для экспоненциальной неустой-



чивости движения в системе многих частиц, считающихся классическими. Таким образом, как в природе, так и в ММД траектории частиц в любых системах, традиционно считающихся классическими, сами по себе изначально являются необратимыми [12–15]. Поэтому и все результаты, полученные с помощью ММД, соответствуют необратимым законам статистической физики, физической кинетики и экспериментальным данным.

Точнее следует сказать, что траектории частиц в системах, традиционно считающихся классическими, имеют конечное время сохранения обратимости, или время сохранения динамической памяти [49]. В исследованных системах это время оказалось больше времен молекулярной релаксации. Однако, например, факт, установленный вначале ММД, что асимптотика автокорреляционной функции скорости имеет степенной  $\varphi(\tau) \sim \tau^{-d/2}$  ( $d = 1, 2$  или  $3$  — размерность системы), а не экспоненциальный  $\varphi(\tau) \sim \exp(-\tau/\tau_c)$  вид, соответствует временам, превышающим время сохранения обратимости [29]. Время памяти в когерентных нелинейно-оптических эффектах [50] требует отдельного рассмотрения.

Изложенные представления позволяют решить вопрос, какое количество частиц требуется для применения законов статистической физики. Многие утверждают, что это количество колоссально (только макросистемы!), см. например, [24]. Практика ММД показывает, что эти законы начинают работать с трех частиц, т.е. и для микросистем. Это соответствует теории, предложенной в [29–32]. Для того, чтобы статистическая физика работала, не обязательно рассматривать системы с огромным числом степеней свободы — главное, чтобы принималось во внимание большое число копий статистического ансамбля. Именно это имеет место в ММД. Заметим, что для малого числа частиц исчезают скачки, свойственные термодинамическому пределу, например, при фазовых переходах первого рода.

Часто утверждают также, что вероятностный характер результатов классической статистики лежит не в самой природе рассматриваемых ею объектов, а связан лишь с тем, что эти результаты получаются на основании гораздо меньшего количества данных, чем это нужно было бы для полного механического описания [24]. Из рассмотрения, приведенного выше, следует, что вероятностный характер результатов классической статистики всё-таки лежит в самой природе рассматриваемых ею объектов. Квазиклассические траектории не имеют детерминированного характера. И этот результат несколько не зависит от того, насколько полно или неполно описывается система. Вероятностный характер столь же справедлив для результатов классической статистики, как и вероятностная интерпретация  $|\Psi|^2$  для результатов квантовой физики [12–15] (попытки предложить гипотезы скрытых параметров не рассматриваются).

Для Ландау [24, 51] и Бриллюэна [52] не было никаких сомнений в том, что именно необратимость процесса измерения вносит физическую неэквивалентность обоих направлений времени, т.е. приводит к появлению стрелы времени и различию между будущим и прошедшим.

Проведенное рассмотрение позволяет выделить две ступени и проследить, каким образом может быть

сделан один шаг по иерархической лестнице. Итак, первая ступень

$$\text{Атом, молекула, два атома, две молекулы,} \\ \text{атом и молекула (физика атома или молекулы)} \quad (20)$$

Следующая, более высокая ступень

$$\text{Три и более атомов и молекул} \\ \text{(статистическая физика)} \quad (21)$$

Второе начало термодинамики, кинетическое уравнение Больцмана и каноническое распределение Гиббса и др. возникают на ступени (21). В рамках классической статистической механики каноническое распределение Гиббса следует из наличия термостата (большой системы, подсистемой которой является рассматриваемая система при мультипликативности функции распределения такого разделения), свойства перемешивания и наличия аддитивного (относительно выделения подсистемы) интеграла движения, определяющего функцию распределения. Второе начало термодинамики и кинетическое уравнение Больцмана могут быть выведены из экспоненциальной неустойчивости траекторий движения системы при условии «огрубления» описания состояния системы (предписывается, что состояния внутри определенного фазового объема считаются одним состоянием).

Все это наблюдается при решении квазиклассических стохастических уравнений (16)–(18). Действительно, совокупность фазовых траекторий, описывающих их решения, обладает свойствами перемешивания и экспоненциальной расходимости траекторий. Движение системы, описываемое траекторией в гиперслое  $H(\mathbf{r}, m\mathbf{v}) = E \pm \Delta E/2$  соответствует наличию слабо взаимодействующего (и обладающего мультипликативной по отношению к системе функцией распределения) термостата. Огрубление определяется фиксацией квантового состояния в ячейке фазового объема  $(2\pi\hbar)^n$  ( $n$  — число измерений).

При этом требуются два фундаментальных закона физики: уравнение Шредингера и вероятностная интерпретация квадрата модуля волновой функции  $|\Psi|^2$ . Эти законы действуют на ступенях, низших по отношению к (21). Вклад квантовой неопределенности в свойства систем, традиционно считающихся классическими, ничтожен, но конечен. Именно благодаря последнему

$$\text{локальная экспоненциальная неустойчивость} \\ \text{движения частиц} \quad (22)$$

в этих системах приводит к стохастизации и необратимости траекторий частиц. Качество (22) возникает на ступени (21). Это не новый постулат природы, а именно качество, новое свойство по сравнению со ступенью (20). Оно имеет четкий физический смысл, не связано с введением нового постулата, не имеет мистической природы и, несмотря на свою специфичность, опирается на факторы более низкой ступени.

С сожалением отметим, что качество (22) не упоминается даже в таких первоклассных руководствах, как [24, 53].

#### 4. От неживой материи — к живой

Я собираюсь рассказать вам, как ведет себя природа. И если вы просто согласитесь, что, возможно, она ведет себя именно таким образом, то вы увидите, что это очаровательная и восхитительная особа. Если сможете, не мучайте себя вопросом: «Но как же так может быть?», ибо в противном случае вы зайдете в тупик, из которого еще никто не выбирался. Никто не знает, как же так может быть.

Ричард Фейнман [1, с. 140]

Подход, примененный в разд. 3.7, Поппер называет использованием редукционизма как исследовательской программы. Попытаемся с таких же позиций подойти и к описанию более принципиального шага по иерархической лестнице — перехода от неживой материи к живой. Основная задача — ввести новое качество (эквивалент жизненной силы) и не впасть при этом в мистицизм, оставаясь, следуя Фейнману, в рамках понятий физической картины мира.

##### 4.1. Идея Поппера

Не существует биологических процессов, которые нельзя было бы рассматривать как коррелированные в деталях с физическими процессами, т.е. обсуждать в физико-химических терминах. Но жизненная сила, конечно же, существует. Суть отличия живого от неживой материи заключается в наличии у первого свойства решать проблемы (problem solving). Живые объекты состоят из физических тел (точнее, структур), которые способны сами решать свои проблемы [6]. Однако никакая физико-химическая теория не может объяснить возникновение новой проблемы и никакой физико-химический процесс сам по себе не может решить эту проблему. Проблемы организмов не сводятся ни к физическим объектам, ни к физическим законам, ни к физическим фактам. Они являются специфическими биологическими реальностями, т.е. их существование может быть причиной биологических эффектов.

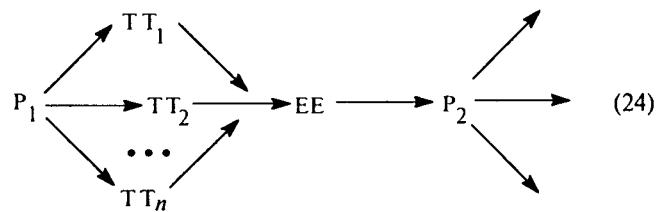
Но этого мало. Предположим, что некоторые физические тела «решили» проблему своего размножения, т.е. могут воспроизводить себе подобных. Тем не менее, они не могут считаться «живыми» (в полном смысле), если они не могут приспособляться: чтобы добиться последнего, им нужно размножение плюс подлинная изменчивость.

Чтобы конкретизировать свои взгляды, Поппер предложил последовательность:

$$P_1 \rightarrow TT \rightarrow EE \rightarrow P_2 \rightarrow \dots \quad (23)$$

Эту схему Поппер вначале предложил в теории познания: научная дискуссия начинается с проблемы ( $P_1$ ), для которой предлагается некое пробное решение — *пробная теория* (tentative theory, TT); эта теория затем критикуется с целью *исключить ошибки* (error elimination, EE); и, как в случае диалектики, процесс себя возобновляет: теория и ее критическая переработка, наряду с решением, приводят к новой проблеме ( $P_2$ ) и т.д. Поппер применил схему (23) к организму (неважно, человек это или амеба): биологиче-

ские структуры создают теории и решают проблемы. Схема (23) может быть усовершенствована



Пробы и ошибки ученого позволяют ему отобрать правильные гипотезы и отбросить ошибочные. С амебой или первобытным человеком дело обстоит по-другому: ошибочные гипотезы или ожидания устраняются естественным отбором, т.е. путем гибели тех организмов, которые воплотили их или верили в них. «Прогресс эволюции позволил гипотезам гибнуть вместо нас», — заключает Поппер.

В обсуждавшемся выше смысле жизненная сила является продуктом жизни, отбора, а не чем-то вроде сущности жизни. Более того, она реализует предпочтения, которые ведут путь (определяют развитие). Однако это путь по Дарвину, а не по Ламарку. Первые теории, т.е. первые пробные решения проблем, и первые проблемы должны были каким-то образом возникнуть вместе. Биоорганические структуры и проблемы возникают вместе; или, иными словами, происхождение жизни и происхождение проблемы совпадают.

##### 4.2. Трудности квантовомеханического описания

Парадоксы квантовой механики связаны в основном с процедурой измерения.

*Коллапс волновой функции* [27, 54—56]. Рассмотрим простейшую ситуацию. Будем считать, что квантовая система может находиться в двух состояниях:  $|1\rangle$  и  $|2\rangle$ , соответствующих определенным результатам измерения 1 и 2. Решение уравнения Шредингера есть волновая функция  $\Psi$ , являющаяся суперпозицией этих состояний  $\Psi = C_1 |1\rangle + C_2 |2\rangle$ . Постулат редукции волновой функции состоит в том, что тот или иной результат измерения (1 или 2) возникает случайно с вероятностями  $p_1 = |C_1|^2$  или  $p_2 = |C_2|^2$ . В результате измерения система переходит в одно из чистых состояний  $|1\rangle$  или  $|2\rangle$ , причем такой переход происходит мгновенно и не может быть описан уравнением Шредингера. Этот переход носит название редукции, или коллапса состояния системы. Мы будем пользоваться термином «коллапс», чтобы не возникало неуместных ассоциаций с понятием редукционизма.

*Парадокс Эйнштейна—Подольского—Розена* [27, 56—59] связан с тем, что в определенных случаях состояния различных частиц могут рассматриваться как состояния, входящие в один и тот же «чистый» квантовый ансамбль. При этом возникают корреляции, в силу которых результат измерения одной частицы в одной точке пространства меняет информацию о системе и позволяет предсказывать результат измерения другой частицы в другой точке пространства в этот же момент времени. Это происходит без участия какого-либо материального носителя, который должен был

бы двигаться со сверхсветовой скоростью, чтобы обеспечить влияние одного измерения на другое.

В парадоксе «кошки» Шредингера [27, 58, 60] волновая функция живого существа  $\Psi = C_1\Psi_1 + C_2\Psi_2$  может рассматриваться как суперпозиция волновой функции  $\Psi_1$  «живой» кошки и волновой функции  $\Psi_2$  «мертвой» кошки. Драматичность последовательных измерений (результаты: то живая, то мертвая, то опять живая), рассмотрение которых обсуждается в парадоксе кошки, очевидна.

Сущность парадокса психофизического параллелизма состоит в том, что результат измерения не зависит от того, где ставить границу между наблюдаемой системой и измеряющим прибором. Фактически это граница между квантовой системой и выделенным классическим прибором. Действительно, где-то происходит редукция волновой функции. Но где? Наблюдательный прибор «со стрелкой», как и все, должен подчиняться квантовой механике. Коллапс происходит во время процессов в глазу наблюдателя? Глаз тоже можно описать квантовым образом. В зрительном нерве? В мозгу? Где-то прибор-наблюдатель должен стать классическим.

*Соотношение неопределенностей и принцип дополнительности.* В частном случае измерения координаты и импульса соотношение неопределенностей ограничивает точность результатов измерения. Принцип дополнительности запрещает одновременное наблюдение волновых и корпускулярных свойств частиц. Остается неясным, являются ли эти два принципа независимыми [61]. Соотношение неопределенностей является следствием волнового характера движения и не имеет прямого отношения к процессу измерения как коллапсу волновой функции, например, степень разрешения Фурье-составляющих любой функции определяется длиной отрезка, на котором она задана. Принцип дополнительности в узком смысле соответствует наличию волновых свойств у объектов, описываемых каноническими уравнениями Гамильтона с некоммутирующими переменными, и с учетом процедуры измерения имеет запретительный смысл — он не дает возможности одновременно точно измерять величины, описываемые канонически сопряженными переменными. В более широком смысле его применяют к переменным, относительно которых можно только догадываться, что они могут оказаться канонически сопряженными в каких-либо уравнениях Гамильтона.

#### 4.3. Коллапс волновой функции как специфическое качество живого

Медавары, не пытаясь дать определение понятию «жизнь», первую главу своей книги посвятили обстоятельному описанию различных черт, характерных, по их мнению, для биологических объектов. Набор этих черт, по-видимому, не является устоявшимся [62–64]. Так, в [64] выделены только две характеристики в качестве определения жизни: способность обрабатывать информацию и жизнь как результат естественной эволюции.

Определение жизни по Попперу является весьма лаконичным. Взгляды Поппера и Медаваров на характерные черты биологических объектов коррелируют друг с другом. Это, впрочем, неудивительно, если вспомнить, что Медавары посвятили свою книгу [3] Попперу, а Поппер в своей части [5] многократно ссылается на Медавара.

Определение Поппера представляется нам очень важным вкладом в решение проблемы. Вместе с тем прогресс развития искусственного интеллекта позволяет допустить, что этому определению удовлетворяют будущие роботы. Эта тема активно эксплуатируется в научной фантастике. Мы предлагаем дополнить определение Поппера постулатом:

*Коллапс волновой функции есть качество, присущее живой материи* (25)

В этом случае любая стрелка в (23) и в (24) или любых обобщениях и детализациях этих схем означает получение информации посредством коллапса волновой функции.

В квантовой вселенной, где нет классического движения, нет эволюции и нет смерти — потому, что нет жизни. А вот живая материя обладает классическими свойствами — она-то и входит в состав измерителя.

Постулат (25) позволяет по-новому взглянуть на «классичность» прибора и двойственную роль классической механики как предельного случая и в тоже время основания квантовой механики [51]. Эта двойственная роль сама по себе является еще одним парадоксом квантовой механики, ибо, с одной стороны, классическая механика, будучи предельным случаем квантовой механики, должна была бы содержаться внутри квантовой механики. Такая ситуация являлась стандартной для взаимоотношений теории и ее предельного случая. Вспомним, например, релятивистскую и классическую механики. С другой стороны, классическая механика стоит вне квантовой механики. Измерительный прибор является классическим, остается вне квантовой системы и принципиально должен быть исключен из того круга явлений, которые описываются квантовой механикой. Парадокс психофизического параллелизма вытекает из неопределенности ответа на вопрос о том, где поставить границу круга явлений, включенных в квантовое описание.

Категорическое требование поставить такую границу и выделить предельный случай теории за рамки области применимости самой теории выглядит по меньшей мере парадоксально или, попросту говоря, абсурдно.

Определение (25) позволяет снять эту абсурдную парадоксальность. Все дело в том, что в утверждении о двойственной роли классической механики неявно объединены обсуждения двух независимых постулатов квантовой механики: уравнения Шредингера и интерпретации вероятности определенного события как  $|\Psi|^2$ . Помимо этого соотнесение с классической механикой в каждом из этих постулатов не укладывается в рамки стандартных взаимоотношений теории и предельного случая.

Из уравнения Шредингера можно получить уравнение Эренфестов, приводящее к уравнению Ньютона, которое описывает классическую траекторию. Однако если рассмотреть «окрестность» предельного перехода, т.е. исследовать взаимоотношение уравнения Шредингера и уравнения Гамильтона—Якоби, то при наличии глубокого сходства математических образов мы обнаружим и значительные отличия, например, отсутствие удовлетворительной (непрерывной) интерпретации квантового аналога траектории. В определенном смысле здесь можно сказать, что ньютоновская механика представляет собой предел квантовой механики, но в ней не содержится (преодолению

этого противоречия с помощью случайных траекторий посвящен разд. 3.6). Несколько рискованно применяя математические аналогии, можно сказать, что «множество» квантовых теорий (например, по значению  $\hbar$ ) неполно, и, таким образом, предел квантовой механики при  $\hbar \rightarrow 0$  (ньютоновская механика) не содержится в этом множестве.

Во втором случае дело не только в интерпретации вероятности, но и в неявном включении в классические понятия «события» как реализации определенной возможности (с соответствующей вероятностью). Без измерения понятие «события» отсутствует в квантовой механике. При этом рассмотрение набора событий и интерпретация волновой функции не имеют никакого отношения к пределу  $\hbar \rightarrow 0$ . Термин «классическая система» используется здесь по недоразумению, вполне понятному с исторической и психологической точек зрения. На самом деле здесь речь идет о системе, способной производить измерение, т.е. о системе, включающей живую сущность (материю), или, иными словами, о системе, наделенной жизненной силой.

В свете этой формулировки вернемся к парадоксам, перечисленным в разд. 4.2. Психофизический параллелизм перестает быть парадоксальным — измерителем является мозг. «Парадокс кошки» оказывается результатом неправильной постановки задачи, ибо суперпозиции квантовой и классической систем быть не может: живая кошка, будучи измерительным прибором, не может быть включена в область применимости описания на языке волновых функций.

Возникает вопрос о материальном носителе жизненной силы. Величина, воспринимаемая как вероятность события, пропорциональна  $|\Psi|^2$ . Выдвинем гипотезу, что такое может иметь место в случае, если имеется *нелинейное (квадратичное)* взаимодействие какой-либо бинарной структуры, каждая из частей которой *линейно* взаимодействует с каким-либо глобальным космическим возмущением. Такое возмущение действительно должно быть глобальным — для того, чтобы редукция пространственно протяженных волновых функций приводила бы к одной и той же системе событий. В этом случае ситуация Эйнштейна—Подольского—Розена уже перестает быть парадоксальной — нужно лишь всегда помнить, что измерение производится над всей волновой функцией, а не над ее частью.

При наличии определенной «сопряженности» составляющих бинарной структуры можно предположить, что эти составляющие будут по-разному воспринимать возмущение, тогда квадратичное взаимодействие будет иметь место именно в форме  $|\Psi|^2$ . На роль такой бинарной структуры может претендовать двойная спираль ДНК. Подчеркнем, что такой выбор определяет жесткое разделение мира на живой и неживой, снимаются сомнения, являются ли РНК-вирусы живыми или неживыми. Они не живут и не умирают.

Несмотря на умозрительность предлагаемой конструкции, она может претендовать если не на подтверждение, то хотя бы на определенные положительные ассоциации с фактами, имеющими место в мире живого: вирус как вещество, встраивающееся в чужую жизнь; бессмертность половых клеток, обладающих половинным набором наследственного материала; процессы оплодотворения и последующего деления клеток. Разница между живым и неживым просматривается даже в принципах действия лекарств, действующих против вирусов и бактерий. Лекарства, действующие на вирусы, как правило, представляют собой вещества, осуществляющие химическое воздействие, в

то время как среди препаратов, действующих против бактерий, есть такие (например, сульфамиды), которые прекращают процессы развития клеток, блокируя синтез определенных веществ, необходимых для развития и деления клеток.

Важный вопрос, анализируемый в литературе, это границы возможной миниатюризации микропроцессоров. В перспективе развития высоких технологий принципиально просматривается уменьшение до размеров, когда квантовая неопределенность начнет влиять на состояние ячеек и, таким образом, работа компьютера станет невозможной. Если для рукотворной продукции человека (hardware) достижение подобных предельных размеров — вопрос неблизкого будущего, то для естественных компьютеров живого организма (lifeware) этот вопрос может оказаться актуальным уже сейчас. В рамках рассматриваемых представлений решение вопросов работы hardware и lifeware отнесется к различным наукам — классической и квантовой механикам, соответственно.

*Измерение (событие) как дополнительность квантового движения (квантовой эволюции).* Может возникнуть мысль, что именно квантовое движение (как механика амплитуд) без всяких измерений является свойством «обычной» материи — именно такое движение происходит в отсутствие наблюдения (за вселенной). Более того, только измерение позволяет зафиксировать состояние, событие [26], т.е. ситуацию, в которой нет никакого изменения системы. Чтобы зафиксировать изменение состояния системы, необходимо повторить измерение. Таким образом, фиксация состояния исключает эволюцию, а в промежутке между измерениями мы теряем информацию о движении системы. Это позволяет считать, что измерение состояния системы дополнительно (по Бору) движению системы. Последовательные измерения одной и той же величины за короткие промежутки времени не коммутируют друг с другом, и чем они ближе по времени, тем ниже их точность. В этом смысле уравнение (19) представляется нам ошибочным — операторы  $i\hbar\partial/\partial t$  и  $M$  не коммутируют.

## 5. Иерархия наук

Мне, конечно, кажется, что для нас важнее всего понять внутреннее структурное единство мира; что все науки, да и не только науки, любые интеллектуальные усилия направлены на понимание взаимосвязей между явлениями, стоящими на разных ступенях нашей иерархической лестницы, на то, чтобы найти связь между красотой и историей, историей и человеческой психологией, психологией и механизмами мозга, мозгом и нервными импульсами, нервными импульсами и химией и так далее, как вверх, так и вниз. Сегодня мы еще не можем (и что толку притворяться, будто это не так) провести непрерывную линию от одного конца до другого, ибо мы лишь вчера увидели существование такой иерархии.

Ричард Фейнман [1, с. 135]

### 5.1. Общий взгляд

Два шага, рассмотренных в разд. 3 и 4, отнюдь не являются последовательными на иерархической лестнице. Восхождение от ступени «коллектив классических частиц» идет по ряду промежуточных ступеней.

Укажем, например, ступени, характеризующиеся такими качествами, как

*самоорганизация в сильно неравновесных  
нелинейных системах* (26)

это качество породило науку «синергетику» [65—71];

*обратная связь* (27)

соответствующая ступень называется «кибернетикой»;

*информация, негэнтропия* (28)

эти качества возникают на ступени «теория информации» [52]. Эти понятия или качества имеют те же характерные черты, что и качество (22), рассмотренное в разд. 3.7. Качества (22), (26)—(28) обязательны для стоящей выше биологической ступени.

Физика и образ мышления, свойственный физикам, продолжают свою экспансию вверх по иерархической лестнице наук. Наряду с химической физикой и биофизикой в последние годы становятся привычными такие термины, как эконофизика (экономическая физика) и финансовая физика, см., например [70—74]. Их можно рассматривать как проявление смелых «десантных операций» далеко вверх (глубоко в тыл) иерархической лестницы. Новые качества, характеризующие эти ступени, равно как и последовательность ступеней, еще неясны.

Отметим, что термины эконофизика и финансовая физика не вполне соответствуют содержанию — по крайней мере в той форме, какая имеет место в терминах химическая физика и биофизика. В последних используются законы физики для выявления или обоснования законов химии или биологии. В других науках, например в экономике и финансах, на описание количественных явлений распространяется принятое в физике использование математических образов и уравнений. Кстати, количественное описание с использованием (пусть и примитивных) математических образов имело место в экономике уже во времена Адама Смита.

Вспомним также попытки Бора распространить принцип дополнительности на все области человеческой деятельности. Можно сказать, что конец XX века ознаменован значительными успехами в строительстве иерархической лестницы. Строительство идет фрагментарно в разных частях лестницы [75].

Остается неясным, не следует ли от понятия лестницы перейти, как полагал Поппер, к структуре типа ветвящегося дерева. Введение качества (25) может потребовать еще более сложной иерархической топологии.

## 5.2. Свобода воли

Прошлое и настоящее совсем по-разному воспринимаются психологически: для прошлого у нас понятие памяти, а для будущего — понятие кажущейся свободы воли.

*Ричард Фейнман [1, с. 114]*

Разделы о свободе воли, творчестве являются заключительными в работах [1—4, 26, 27]. Обоснование допустимости свободы воли с позиций естественных наук было главной целью философии Поппера. Он писал, что ньютоновская революция привела к отказу

от здравого смысла, и назвал физический детерминизм кошмаром, так как под детерминизмом понималась причинная обусловленность всех явлений природы и отсюда следовало, что весь мир, со всем, что в нем есть, — это гигантский автомат, а мы с вами лишь крошечные колесики или в лучшем случае частичные автоматы в нем.

Просто случайность, даже квантовая, была для Поппера не лучше детерминизма, так как исключала влияние человека на результат своей деятельности. Выход он искал в гибком управлении, на которое способны схемы (23) или (24) при наличии случайных процессов передачи информации.

Схемы (23) или (24) характеризуют по Попперу любой биологический объект. Свободу воли принято приписывать только человеку. Остается неясным, какое качество возникает на уровне человека, позволяющее ему приобрести свободу воли и сознание.

\*\*\*

Благодарим А. Д. Виноградова, П. М. Зоркого, Ю. А. Кравцова, Г. В. Лисичкина, В. М. Сергеева и В. Эбелинга за интерес к работе и полезные замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фейнман Р. Характер физических законов. М.: Мир, 1968, 232 с.
2. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики. М.: Госинлит, 1947, 146 с.
3. Медавар П., Медавар Д. Наука о живом. М.: Мир, 1983, 207 с.
4. Лоренц К. Обратная сторона зеркала. М.: Республика, 1998, 493 с.
5. Popper K.R., Eccles J.C. The Self and Its Brain. N. Y.: Springer, 1977, p. 16—29.
6. Popper K. Unended Quest. An Intellectual Autobiography. Glasgow: Fontana/Collins, 1978, 256 p.
7. Поппер К. Логика и рост научного знания. Избранные работы. Под ред. В.Н. Садовского. М.: Прогресс, 1983; Popper K.R. Objective Knowledge. An Evolutionary Approach. Chapter 3, 6. Oxford: Clarendon Press, 1972.
8. Ebeling W., Freund J., Schweitzer F. Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Stuttgart-Leipzig: Teubner-Verlag, 1999, 265 p.
9. Зоркий П.М. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева), 1996, т. 40, № 3, с. 5—25.
10. Зоркий П.М. Соросовский образовательный журнал, 1996, №9, с. 47—56.
11. Волькенштейн М.В. Успехи физ. наук, 1973, т. 109, № 3, с. 499—516.
12. Каклюгин А.С., Норман Г.Э. В сб.: Термодинамика необратимых процессов. Под ред. А.И. Лопушанской. М.: Наука, 1987. с. 5—11.
13. Kaklyugin A.S., Norman G.E. J. Moscow Phys. Soc., 1995, v. 5, № 2, p. 167—180.
14. Kaklyugin A.S. Ibid., 1993, v. 3, № 4, p. 321—325.
15. Kaklyugin A.S., Norman G.E. Ibid., 1998, v. 8, № 4, p. 283—290.
16. Feistel R., Ebeling W. Evolution of Complex Systems. Dordrecht: Kluwer, 1989, 248 p.
17. Ebeling W., Engel A., Feistel R. Physik der Evolutionsprozesse. Berlin: Akademie-Verlag, 1990, 371 p.
18. Зотин А.И., Зотин А.А. Направление, скорость и механизмы прогрессивной эволюции. М.: Наука, 1999, 320 с.
19. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. М.: Наука, 1984, 271 с.
20. Lebowitz J. L. Physica A, 1999, v. 263, Nos. 1—4, p. 516—527.

21. Hoover W.G. Time Reversibility, Computer Simulation, and Chaos. Singapore: World Scientific, 1999, 262 p.
22. Ebeling W. Physica D, 1997, v. 109, № 1, p. 42—52.
23. Крылов Н.С. Работы по обоснованию статистической физики. М.: Изд-во АН СССР, 1950, 208 с.
24. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, ч. 1. М.: Наука, Физматлит, 1995, 605 с.
25. Prigogine I. Physica A, 1999, v. 263, Nos. 1—4, p. 528—539.
26. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. М.: Прогресс, 1999, 266 с.
27. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. М.: Редакция журнала «Успехи физ. наук», 1999, 400 с.
28. Сачков Ю.В. Вероятностная революция в науке. М.: Научный мир, 1999, 144 с.
29. Валуев А.А., Норман Г.Э., Подлипчук В.Ю. В сб.: Математическое моделирование. Физико-химические свойства веществ. Под ред. А.А.Самарского, Н.Н.Калиткина. М.: Наука, 1989, с. 5—40.
30. Валуев А.А., Норман Г.Э., Подлипчук В.Ю. Матем. моделирование, 1990, т. 2, № 5, с.3—7.
31. Norman G.E., Podlipchuk V.Yu., Valuev A.A. J. Moscow Phys. Soc., 1992, v. 2, № 1, p. 7—21.
32. Norman G.E., Podlipchuk V.Yu., Valuev A.A. Molecular Simulation, 1993, v. 9, № 6, p. 417—424.
33. Валуев А.А., Каклюгин А.С., Норман Г.Э. Успехи химии, 1995, т. 64, № 7, с. 643—671.
34. Полухин В.А., Ухов В.Ф., Дзузатов М.М. Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких металлов. М.: Наука, 1981, 323 с.
35. Levesque D., Verlet L. J. Stat. Phys., 1993, v. 72, p. 519—537.
36. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. М.: «Янус», 1995, 624 с.
37. Morozov I.V., Norman G.E., Valuev A.A. J. Tech. Phys., 1999, v. 40, № 1, p. 61—64.
38. Morozov I.V., Norman G.E., Valuev A.A. Contrib. Plasma Phys., 1999, v. 39, № 4, p. 307—310.
39. Норман Г.Э., Стегайлов В.В. готовится к печати
40. Rowlands G. J. Computational Physics, 1991, v. 97, No 1, p. 235—239
41. Lopez-Marcos M.A., Sanz-Serna J.M., Skeel R.D. In: Numerical Analysis 1995. Eds. D.F. Griffiths, G.A. Watson, Harlow (Essex): Longman, 1996, p. 107—122.
42. Lopez-Marcos M.A., Sanz-Serna J.M., Skeel R.D. In: Numerical Analysis. Eds. D.F. Griffiths, G. A. Watson. Singapore: World Scientific, 1996, p. 163—175.
43. Bagrov V.G., Belov V.V., Kondratyeva M.F. e. a. J. Moscow Phys. Soc., 1993, v. 3, № 4, p. 309—320.
44. Герценштейн М.Е., Кравцов Ю.А. Ж. эксперим. теоретич. физики, 2000, т. 118, № 4(10).
45. Кравцов Ю.А. Там же, 1989, т. 96, с. 1661.
46. Герценштейн М.Е., Болошин И.А., Суворов М.П. Изв. высш. учеб. заведения. Физика, 1996, № 2, с. 119.
47. Герценштейн М.Е. НТР 1997, № 5, с. 16.
48. Герценштейн М.Е., Кравцов Ю.А. Там же, 1998, № 6, с. 9.
49. Kaklyugin A.S., Norman G.E. J. Tech. Phys., 1999, v. 40, № 1, p. 69—72.
50. Манькин Э.А. Соросовский образовательный журнал, 1998, № 8 (33), с. 88—94.
51. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, ГРФМЛ, 1989, 767 с.
52. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. М.: Мир, 1966.
53. Займан Дж. Модели беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем. М.: Мир, 1982, 591 с.
54. Воронцов Ю.И. Теория и методы макроскопических измерений. М.: Наука ГРФМЛ, 1989 278 с.
55. Менский М.Б. Успехи физ. наук, 1998, т. 168, с. 1017.
56. Клышко Д.Н. Там же, 1998, т. 168, с. 975.
57. Белинский А.В. Там же, 1997, т. 167, с. 323.
58. Килин С.Я. Там же, 1999, т. 169, с. 507.
59. Манькин Э.А. Соросовский образовательный журнал, 2000 (в печати).
60. Леггет А.Дж. Успехи физ. наук, 1986, т. 148, с. 671.
61. Ципенюк Ю.М. Природа, 1999, № 5, с. 90.
62. Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика. М.: Наука, 1984, 304 с.
63. Медников Б.М. В сб.: Онтогенез. Эволюция. Биосфера. Под ред. А.В. Яблокова. М.: Наука, 1989, с. 15—30.
64. Ebeling W., Feistel R. Chaos und Kosmos, Prinzipien der Evolution. Heidelberg: Spektrum, 1994, 251 p.
65. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985, 424 с.
66. Николис Г., Пригожин И.Р. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979, 512 с.
67. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990, 269 с.
68. Бакай А.С., Сигов Ю.С., Курдюмов С.П. и др. Новое в синергетике. Загадки мира неравновесных структур. Под ред. И. М. Макарова. М.: Наука, 1996, 261 с.
69. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Астахова В.В. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Саратов: изд-во Саратовского ун-та, 1999, 367 с.
70. Bruckner E., Ebeling W., Jimenez-Montano M.A., Schamhorst A. J. Evol. Econ., 1996, v. 6, № 1, p.1—30.
71. Molgedey L., Ebeling W. Eur. Phys. J., 2000, (to appear)
72. Сорос Дж. Алхимия финансов. М.: Инфра-М, 1997, 416 с.
73. Сергеев В.М. Пределы рациональности: термодинамический подход к проблеме экономического равновесия. М.: Фазис, 1999. 146 с.
74. D.S.Chernavskii, O.D. Chernavskaya, A.V.Shcherbakov e.a. J. Moscow Phys. Soc., 1999, v. 9, № 2, p. 89—108.
75. Пределы предсказуемости. Под ред. Ю.А. Кравцова. М.: ЦентрКом, 1997, 248 с.