

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ТЕРЕХОВИЧ ВЛАДИСЛАВ ЭРИКОВИЧ

**ФИЛОСОФСКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 09.00.08 – философия науки и техники

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата философских наук

Научный руководитель:
доктор химических наук,
профессор Дмитриев И.С.

Санкт-Петербург

2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Экстремальные принципы в развитии естествознания. Исторический обзор	18
1.1 Экстремальные принципы в механике	18
1.2 Экстремальные принципы в термодинамике	31
1.3 Экстремальные принципы в электродинамике, теории относительности, теории поля	41
1.4 Экстремальные принципы в квантовой механике	47
1.5 Экстремальные принципы в космологии	54
1.6 Экстремальные принципы в теории информации	57
1.7 Экстремальные принципы в химии и биологии	64
1.8 Обобщение исторического обзора	71
2 Методологические и философские проблемы ПНД	83
2.1 Проблема разнообразия формулировок ПНД	83
2.2 Проблема места ПНД в системе физических законов	89
2.3 Проблема целенаправленности и вероятности в ПНД	101
2.3.1 Целевые причины и их соотношение с действующими причинами в ПНД	102
2.3.2 Однозначная и неоднозначная причинность в ПНД	112
3 Вероятностная интерпретация ПНД	121
3.1 Связи между частными формами ПНД и другими принципами физики	122
3.1.1 Варианты описания движения тела и их философские основания .	123
3.1.2 ПНД и квантовая механика	126
3.2 Концепция «суммирования сосуществующих возможностей» – переход из возможности в действительность	135

3.2.1	Философская идея возможного и действительного модусов существования	136
3.2.2	Возможность и действительность в квантовой механике	140
3.2.3	Основные понятия механизма интерференции траекторий квантовых объектов	144
3.2.4	Механизм «суммирования возможностей»	148
3.3	Объединение частных форм ПНД на основе их вероятностной интерпретации	154
3.3.1	«Суммирование возможностей» для классических объектов	156
3.3.2	Вероятностная формулировка экстремальных принципов	163
3.4	Вероятностная интерпретация ПНД и проблемы причинности	165
3.4.1	Действующие и целевые причины в вероятностной интерпретации ПНД	166
3.4.2	Вероятностная и однозначная причинность в вероятностной интерпретации ПНД	173
3.5	Критический анализ вероятностной интерпретации ПНД	183
3.5.1	Основные возражения против вероятностной интерпретации ПНД	185
3.5.2	Трудности и нерешенные проблемы предлагаемого решения	194
	Заключение	197
	Список литературы	203

Введение

Актуальность исследования. В физике используются несколько теорий, описывающих движение систем. Каждая теория опирается на свои понятия, аксиомы, модели и принципы, а еще на свои философские основания, принимаемые по умолчанию. В.С. Степин выделяет две взаимосвязанные подсистемы философских оснований науки [160, с. 160–180]. Первая – онтологическая, представленная сеткой категорий, служащих матрицей понимания и познания исследуемых объектов (понимания вещи, процесса, состояния, причинности, необходимости, случайности, пространства, времени и т.п.). Вторая – эпистемологическая, выраженная категориальными схемами, которую характеризуют познавательные процедуры и их результат (понимание истины, метода, знания, объяснения, доказательства, теории, факта и т.п.). Подтверждением этого могут служить слова М. Борна о том, что физика нуждается в философии уже потому, что слово «реальность» не имеет однозначного смысла [16, с. 269].

Когда одна из существующих парадигм (Т. Кун) или исследовательских программ (И. Лакатос), в которые входят теории с их философскими основаниями, не справляется с проблемами, несмотря на все модификации и вспомогательные гипотезы, возникает необходимость в альтернативах. Чтобы стать успешной, новая теория не отрицает, а обобщает предшественников, представляя их своими предельными случаями, но для этого она вынуждена критически пересмотреть привычные понятия, аксиомы и модели, а иногда и трансформировать свои философские основания. Такая трансформация философских оснований, по выражению В.С. Степина, осуществляется путем выборки и последующей адаптации идей, выработанных в философском анализе, к потребностям определенной области научного познания [160, с. 160–180].

Одна из актуальных задач современного естествознания состоит в поиске способа объединения моделей описания движения в различных областях – в

космологии, в механике, в химии, в термодинамике, в биологии, в квантовой механике и т. д. В качестве объединяющего принципа на разных этапах развития науки предлагались: принцип равновесия, закон всемирного тяготения, принцип сохранения энергии, второе начало термодинамики, синергетический принцип развития систем и другие. Единая модель для описания любого движения пока не создана, но уже понятны некоторые свойства, которыми она должна обладать. Она должна использовать язык вероятностей, без которого невозможно описать движение термодинамических, биологических и квантовых систем. Она должна включать в себя как частные случаи модели релятивистской теории поля, геометрии многомерных пространств и самоорганизации сложных неравновесных систем. Она должна использовать простой и универсальный математический аппарат. Она должна объяснять механизм причинно-следственных связей и описывать процесс возникновения реальности для любых типов движения.

В качестве обобщающей модели описания движения использовался и принцип наименьшего действия – один из экстремальных или, как их часто называют, вариационных принципов. Как известно, это один самых широко используемых физических принципов. Все основные законы классической физики можно вывести из одной-единственной математической конструкции, именуемой действием [141, с. 11]. А. Эйнштейн считал, что всю общую теорию относительности можно разработать на основе только этого вариационного принципа [198, с. 524]. Этот принцип с успехом работает в оптике, электродинамике и в квантовой теории поля. По мнению Р. Фейнмана, даже фундаментальная взаимосвязь между законами симметрии и сохранения (Э. Нетер) покоится на принципе минимума действия [168, с. 93]. Для М. Планка этот принцип более универсальный, чем принцип сохранения энергии-импульса, он господствует над всеми обратимыми явлениями физики [120, с. 95], являясь «высшим физическим законом» [123, с. 85]. А. Эддингтон называл двумя великими обобщениями науки принцип наименьшего действия и второй закон термодинамики [193, с. 149]. В современной энциклопедии физики говорится, что этот принцип находится в ядре большей части современной физики [246].

Сегодня экстремальные принципы, близкие к ПНД, играют заметную роль в биологии, теории информации и задачах оптимального управления – в областях знания, не связанных ни с механическим движением, ни с геометрией, ни с понятием «действие». Но при такой распространенности принцип наименьшего действия не вписывается в философские основания доминирующих научных парадигм. Его не удастся вывести из других общих принципов. Для описания траекторий и состояний в этом принципе используются понятия, привычные больше для философских, а не научных рассуждений: «целевые», «возможные», «действительные». Не случайно Р. Фейнман особо подчеркивал, что по своей сути принцип наименьшего действия – принцип философский [170, с. 18]. В свою очередь, К. Ланцош предлагал в научных трактатах не избегать философских дискуссий о роли вариационных принципов механики [91, с. 21].

Под принципом наименьшего действия (сокращенно ПНД) в контексте данного исследования понимается не только соответствующий принцип классической механики, но и множество экстремальных принципов, прямо или косвенно с ним связанных. Эта связь опирается на взаимную выводимость уравнений, на несколько аналогий (геометрическую, математическую, оптико-механическую и др.), а также на общую размерность функционалов, соответствующих «действию» (время \times энергия). С целью упрощения обобщений для всех таких принципов в диссертации используется именно это название, ставшее широко распространенным благодаря работам Л.Д. Ландау и Р. Фейнмана. Под частными формами ПНД диссертант подразумевает экстремальные принципы движения систем, изучаемых в конкретных областях естествознания. Как будет показано в диссертации, существуют и другие экстремальные принципы, близкие по форме к ПНД и играющие важную роль в биологии, в теории информации, в задачах оптимального управления, то есть в областях знания, не связанных ни с механическим движением, ни с геометрией, ни с понятием «действие».

ПНД и все экстремальные принципы можно свести к общей форме: действительное движение или состояние системы отличается от всех возможных при данных граничных условиях тем, что некий функционал, характеризующий

систему в целом, стационарен и принимает экстремальное значение. Другими словами, система ведёт себя так, чтобы одна из ее характеристик принимала минимальное или максимальное значение из всех возможных. Поскольку для нахождения стационарного или экстремального значения функционала применяется математическая операция варьирования, эти принципы часто называют вариационными. В ПНД таким функционалом является «действие», которое может выражаться интегралами по времени, по траектории в пространстве-времени и по объему любой размерности. Величина действия не всегда минимальна, иногда она максимальна, но всегда стационарна, поэтому, часто говорят о принципе стационарного действия. Стационарность действия означает, что бесконечно малые возмущения некоторой функции не вызывают его изменения в первом порядке малости.

Ключевую роль для философского анализа ПНД, по мнению диссертанта, играет метод «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана. В основе последнего лежит предположение, что квантовые частицы одновременно движутся по всем возможным путям, а путь, наблюдаемый как реальный, отличается максимальной вероятностью, и является результатом суммирования всех возможных путей. В макроскопическом пределе этот путь соответствует траектории, предсказанной классическим ПНД.

Основные проблемы исследования. Многие поколения ученых используют частные формы ПНД, не заботясь о причинах их эффективности. Непостижимая эффективность вариационных принципов, по словам В.П. Визгина, стала своеобразным символом веры физиков теоретиков [35]. В настоящее время, по мнению Л.Н. Цехмистро, не существует никаких теоретических разъяснений поразительной успешности и плодотворности применения ПНД [185]. Ю.С. Владимиров говорит о сложном отношении к ПНД, о чем свидетельствует его отсутствие в школьных программах и в курсах общей физики для вузов [37, с. 123]. Для одних этот – аксиома, не требующая углубленного изучения, для других – проверенный временем математический способ записи законов движения. Неопределенность в отношении одного из фундаментальных принципов науки связана с тем, что ученые не считают его философский анализ своей сферой

деятельности, а философы видят в нем лишь формальный метод научных вычислений. Существует явный пробел в понимании смысла ПНД, что выражается в слабой разработанности проблем с точки зрения философии науки. Вот лишь некоторые из вопросов, касающиеся ПНД и представляющие важность для философского анализа. В чем причина разнообразия форм ПНД для разных видов движения? Связаны ли они друг с другом, можно ли их привести к универсальному виду? Каково положение ПНД в системе законов природы, из каких известных законов он следует, какие следуют из него? Каков философский и методологический статус ПНД: формальный принцип, искусственная логическая и языковая конструкция; феноменологический принцип, не имеющий всеобщего характера; онтологический принцип существования объектов Вселенной? В чем физический и философский статус возможных траекторий (перемещений, состояний), которыми оперирует ПНД, и насколько они реальны? Каким образом в ПНД соотносятся действующие и конечные (целевые) причины? Почему ПНД одинаково эффективен при описании вероятностных и детерминистических процессов в разных разделах науки? Почему «действие» стремится к экстремальным значениям? Почему в одних случаях «действие» минимально, а в других – максимально? В чем физический и философский смысл понятия «действие»? Как классическое действие связано с квантовым действием, используемым в методе «интегралов по траекториям»?

Степень научной разработанности проблемы. Уникальную эвристическую роль ПНД в описании поведения физических систем отмечали М. Планк, Л. Де Бройль, Э. Шредингер, Д. Бом, М. Борн, К. Ланцош. Ряд философских обобщений, связанных с ПНД, сделали Р. Фейнман, В. Йорграу и С. Мандельштам. Многие разделы курса «Теоретической физики» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица начинаются с изложения ПНД. В отечественной литературе по истории и философии физики ключевое место занимают исследования вариационных принципов Л.С. Полака, В.П. Визгина, Г.Я. Мякишева, В.А. Ассеева, О.С. Разумовского. Несмотря на важность этих работ, их научная база ограничена результатами, полученными к моменту написания. В работах В.А.

Ассеева и О.С. Разумовского существенным ограничением явились жесткие рамки советской традиции диалектического материализма.

Несмотря на большое число нерешенных философских и методологических проблем, связанных с применением экстремальных или вариационных принципов, в современной отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют систематические исследования их философского содержания. В последние годы лишь несколько отечественных авторов касаются философских проблем ПНД. В.П. Визгин сравнивает непостижимость эффективности математики и вариационных принципов [35]. А.И. Липкин выражает общепринятую точку зрения, что ПНД – это математическая форма в рамках вариационного исчисления, а действие, в отличие от энергии, – это не физическая величина, а математический объект. Как вариационный метод в механике, так и «интегралы по траекториям» в квантовой механике, он рассматривает лишь как иное эквивалентное математическое представление [94]. Л.Н. Цехмистро в качестве онтологического основания принципа стационарности действия рассматривается свойство конечной физической неделимости мира [186]. Г.А. Голицин и А.П. Левич делают вывод о том, что принцип наименьшего принуждения и его статистический аналог – принцип максимума различающей информации могут служить базой для отыскания новых экстремальных принципов, в том числе с участием понятия энтропии [48]. Е.В. Луценко высказывает гипотезу, что вариационные принципы механики являются проявлением информационного вариационного принципа [97]. Из зарубежных авторов следует выделить статьи Дж. Катцава [236], М. Штольтцнера [267] и Р. Кунса [237].

Остальные многочисленные исследования обычно ограничиваются или практическим применением ПНД, или его методологической ролью в отдельно взятой области. За последние 15 лет издано огромное число отечественных и зарубежных работ, посвященных использованию экстремальных или вариационных принципов в разных разделах физики и химии. Продолжаются исследования связи ПНД с классической механикой Ньютона. Возник интерес к использованию ПНД в космологии, в том числе в теории струн. Несколько

исследований посвящено связи ПНД с квантовой теорией поля. Ряд работ связано с применением вариационных принципов в термодинамике, гидродинамике и химии. К ним близки исследования вариационных принципов в теории информации и теории сложных саморазвивающихся систем. Экстремальные принципы распространяются на биологические системы и оптимальное управление. Однако, несмотря на то, что категории «возможность», «действительность» и «вероятность» играют ключевую роль в экстремальных принципах, в последние десятилетия отечественные философы науки не рассматривают экстремальные принципы в качестве возможного кандидата на онтологическую или методологическую основу решения проблем соотношения причинности и вероятности. Это видно на примере двух последних сборников по философским проблемам причинности [133; 159]. Одна из возможных причин – нежелание вторгаться на «поле» ученых, другая – настороженное отношение к так называемой «диаматовской натурфилософии», выразителями которой считаются В.А. Ассеев и О.С. Разумовский.

Объектом диссертационного исследования является философский анализ экстремальных принципов естествознания. **Предмет исследования** – философские и методологические проблемы принципа наименьшего действия (ПНД) в философском, научном и историческом контекстах. **Цель исследования** состоит в философском обобщении экстремальных принципов физики на основе вероятностной интерпретации ПНД. **Для достижения указанной цели реализуется несколько задач.**

1. Исследовать историческое развитие ПНД и других экстремальных принципов в основных естественных науках. Сформулировать и классифицировать нерешенные философские и методологические проблемы, возникающие при использовании этих принципов.

2. Раскрыть связь ПНД с философскими категориями «возможного» и «действительного».

3. Исследовать место ПНД в системе физических законов, описывающих движение. Изучить связи между частными формами ПНД разных разделов физики.

4. Изучить возможное онтологическое содержание физического механизма превращения траекторий квантовых объектов в классические траектории и релятивистские мировые линии.

5. Исследовать варианты решения проблемы соотношения в ПНД действующих и конечных (целевых) причин, а также вероятностной и однозначной причинности.

Научная новизна. В результате анализа исторического развития и современного состояния нескольких областей естествознания показана ключевая роль ПНД и других экстремальных принципов в возникновении основных научных теорий XIX и XX веков. Показано, что создатели всех экстремальных принципов использовали одни и те же эвристические методы, включающие аналогию механических, оптических и волновых явлений. В развитие работ Л.С. Полака, описано возникновение экстремальных принципов для необратимых процессов (неравновесная термодинамика, теория информации, биология), описана связь ПНД с интерпретациями квантовой механики.

Формулировки двадцати экстремальных принципов приведены к общей схеме. Для каждого указаны граничные условия, описаны критерии отличия действительных движений (состояний) системы от возможных. Сформулирован физический смысл отдельных принципов, перечислены их связи друг с другом. Показано, что все эти принципы обладают общими свойствами, и могут быть сведены к общей математической форме.

Сформулирован и систематизирован наиболее полный на сегодня перечень восемнадцати методологических и философских проблем экстремальных принципов. Проблемы объединены в три группы: о разнообразии формулировок, о месте ПНД в системе физических законов, о причинности в ПНД. Исследовано развитие взглядов ученых и философов на проблемы каждой группы.

Развитие экстремальных принципов сопоставлено с философскими представлениями о возможном и действительном модусах существования, о внутренней активности систем, реализующих свои возможности.

Вместо представлений об исследовании частицами всех траекторий (Р. Фейнман), о стремлении систем достичь экстремума некоей целевой функции

(В.А. Ассеев), об общей экстремальной закономерности, объективно присущей материи (О.С. Разумовский), диссертант предлагает рассматривать концепцию, где действительное движение является следствием имманентного свойства физических систем реализовывать максимальное число своих возможных движений.

Изложены новые аргументы в пользу гипотезы об однозначной причинности классических систем как частного случая вероятностной причинности квантовых систем. Вместо распространенных попыток заменить телеологическое содержание ПНД другими формами причинности, предлагается рассматривать действующие и целевые причины как равноправные и относительные, раскрывающие один из аспектов причинно-следственной связи.

Вместо определения экстремумов как результата равновесия и устойчивости взаимодействия диалектических противоположностей (В.А. Ассеев), автор диссертации предлагает сводить все экстремумы к максимуму вероятности.

Теоретическая и практическая значимость. За счет модификации сетки категорий реальности и причинности результаты исследования позволяют по-новому взглянуть на онтологические основания физических теорий, что может способствовать эвристике нового научного поиска и решению философских проблем естествознания. Создается основа для методологического и философского обоснования универсальной эффективности экстремальных принципов.

Для решения проблемы телеологии, вместо отдельного изучения множества причин, действующих или конечных, внешних или внутренних, может рассматриваться единая онтологически значимая внутренняя причина каждой системы, независимо от ее типа, размера и сложности.

Вероятностную интерпретацию ПНД можно использовать для обобщения экстремальных принципов необратимых процессов в сложных саморазвивающихся системах, как физических, так и биологических.

Методологические и теоретические основы исследования. Для выявления методологической роли ПНД автор диссертации анализирует историю

возникновения и использования экстремальных принципов в основных разделах науки. Необходимость целостного философского изучения ПНД определила многоаспектный, в том числе герменевтический анализ объекта исследования. Теоретической основой исследования послужил ряд научных и философских концепций:

- представление о том, что трансформация философских оснований науки является особым слоем исследовательской деятельности на стыке между философией и конкретной наукой, и осуществляется совместно философами и учеными-специалистами в рамках философии и методологии науки (В.С. Степин [160, с. 160–187]);

- классические работы по экстремальным принципам механики, электродинамики, теории относительности и квантовой механики (Э. Уиттекер, Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, К. Ланцош, Р. Фейнман, В. Йорграу и С. Мандельштам), термодинамики (И. Пригожин, И. Дьярмати);

- представление физиков (М. Планк, А. Эддингтон, Р. Фейнман), историков и философов физики (Л.С. Полак, В.П. Визгин, Г.Я. Мякишев, В.А. Ассеев) о фундаментальной роли ПНД в системе физических законов, его связи с вероятностной причинностью, законами симметрии и сохранения;

- философская традиция рассматривать «возможное» и «действительное» как два модуса существования (Аристотель, Ф. Аквинский, Н. Кузанский, Г. Лейбниц, Г. Гегель, Н. Гартман), а также современные исследования в этой области (Т.Н. Горнштейн, В.П. Бранский, С.С. Хоружий);

- понимание вероятности как меры перехода «возможности» в «действительность». (В.А. Фок, Л.С. Полак, К. Поппер, В.П. Бранский, А.Ю. Севальников);

- представления о вероятностном подходе как о фундаментальном способе описании любых процессов природы (И. Пригожин, В.С. Степин).

- «трансцендентальный аргумент» И. Канта, согласно которому в основе телеологических суждений лежит не целесообразное устройство объектов, а познавательный механизм субъекта; с другой стороны, представление о том, что природа не отдает предпочтения конечным или действующим причинам, а для

описания эти причины взаимно дополняют друг друга (Г. Лейбниц, И. Кант, Л. Эйлер, Г. Вейль);

– представления об онтологическом характере внутренней активности любых объектов (Лукреций, Г. Лейбниц, Г. Гегель, А. Шопенгауэр, А. Бергсон, В.С. Соловьев, К.Э. Циолковский), а также о вероятности как следствии самодвижения материи (М. Планк, В.А. Фок, Д. Бом, М. Бунге, Ф. Дайсон, Г.Я. Мякишев).

– философские заключения некоторых физиков о том, что связь квантовой механики, теории волн и классической механики осуществляется посредством: ПНД и оптико-механической аналогии принципов Гюйгенса и Гамильтона (Л. Де Бройль, Э. Шредингер), аналогии кванта действия и классического действия (М. Планк, П. Дирак, Р. Фейнман), а также через интерференцию волновых функций (Д. Бом, В.А. Фок);

– взгляд на квантовые процессы как на переход из возможного состояния в действительное (В. Гейзенберг, Д. Бом, В.А. Фок, К. Поппер); основные интерпретации квантовой механики: копенгагенская (Н. Бор, В. Гейзенберг), холистская (Д. Бом), многомировая (Х. Эверетт), декогеренции (В. Зурек, М.Б. Менский, Дж. Гринштейн и А. Зайонц, М. Каку), работы о природе квантовой реальности (Р. Пенроуз, А.Ю. Севальников);

– метод «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана, играющий центральную роль в современной квантовой теории поля, а также гипотезы об этом методе, как о способе обобщения законов движения (Р. Фейнман, Г.Я. Мякишев, Э. Тэйлор, Дж. Огборн);

Из методологических принципов научного познания диссертант в первую очередь использовал принципы соответствия, согласованности и симметрии. Опираясь на идеи В.А. Штоффа о моделях как средствах интерпретации и объяснения, и для создания объяснительной модели ПНД, диссертант использовал методы аналогии и синтеза. Для наглядного представления связей между известными физическими принципами использован графический и табличный методы.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. С экстремальными принципами основных разделов естествознания связан ряд методологических и философских проблем, решение которых возможно путем синтеза исторического опыта их научного использования, осмысления последних достижений квантовой физики, философского анализа таких категорий, как реальность, возможность, пространство, причинность, вероятность, случайность.

2. ПНД и другие экстремальные принципы можно рассматривать не только как методологические принципы, но и как физическую модель описания философской идеи перехода возможного существования в наблюдаемую действительность. Для этого возможные или виртуальные перемещения, состояния и траектории, которыми оперируют эти принципы, предлагается рассматривать не как формальный прием и математическую абстракцию, но и как имеющие определенную степень существования на квантовом уровне.

3. В соответствии с интерпретацией ПНД как принципа максимальной вероятности, все возможные движения физической системы сосуществуют вне категорий пространства и времени. Иначе говоря, физическая система находится сразу во всех движениях, возможных при данных граничных условиях. В результате сложения всех возможных движений, одно из них становится результирующим, а его вероятность – максимальной. Максимум вероятности для различных типов систем в пределе проявляется через минимумы или максимумы одной из характеристик (действие, оптическая длина, разность кинетической и потенциальной энергии, принуждение, собственное время, кривизна и т.д.), что выражается в частных формах ПНД. Результирующее движение системы наблюдается как действительное в четырехмерном пространстве-времени. Таким образом, величину действия можно рассматривать как меру реализации конкретного возможного движения системы.

4. ПНД в вероятностной интерпретации можно рассматривать как модель, предельными случаями которой являются экстремальные принципы нескольких разделов физики.

5. С точки зрения физики, возможные движения систем находятся в квантовой суперпозиции, и происходят сразу во всех размерностях n -мерного пространства различной топологии. Суперпозиция возможных квантовых траекторий путем совместного механизма декогеренции и интерференции преобразуется в макроскопическом масштабе в действительную классическую траекторию или релятивистскую мировую линию. Остальные возможные движения не исчезают, а продолжают существовать в суперпозиции, оставаясь нереализованными вплоть до изменения граничных условий.

6. То, что мы наблюдаем как целенаправленное движение конкретной физической системы, предлагается рассматривать как результат суммирования всех возможных движений всех взаимодействующих в данных условиях систем. Ни одна система не «знает» заранее своего действительного конечного состояния. И действующей, и целевой причиной любой системы является не конкретное состояние, и даже не равновесие, а максимальная реализация всех имеющихся в данных условиях возможностей системы по сохранению и изменению ее движения. При такой интерпретации в качестве альтернативной основы физических явлений рассматривается не устойчивость или экстремальность, а мера вероятности осуществления одного из возможных движений (состояний).

Апробация диссертации. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях: международная конференция «Онтологические исследования в современной России» (Санкт-Петербург. СПбГУ, ноябрь 2010); международная конференция «Онтологические исследования в современном мире: теория, аксиология, практика» (Санкт-Петербург. СПбГУ, ноябрь 2011).

По материалам диссертации опубликовано 6 статей общим объемом 4,5 а. л., из них 4 в научных журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертация состоит из введения, трех глав, разделенных на параграфы, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 224 страницы, включая 3 таблицы и 4 рисунка. Список литературы содержит 282 наименований, в том числе 80 на иностранных языках.

В первой главе проведен исторический обзор возникновения и использования экстремальных принципов в нескольких разделах естествознания,

выявлены их философские и методологические основания. Во второй главе приводится классификация и анализ методологических и философских проблем, связанных с ПНД, описывается история их решения и современное состояние. В третьей главе частные формы ПНД обобщаются, и на основе концепции «суммирования сосуществующих альтернативных возможностей» обосновывается их вероятностная формулировка. Описывается способ совмещения в ПНД причинного и целевого объяснения движения объектов. Рассматриваются возражения против вероятностной интерпретации ПНД и вопросы, оставшиеся нерешенными.

Автор диссертации выражает свою глубокую благодарность за конструктивную критику во время подготовки диссертации: д.ф.-м.н. А.С. Лукьяненко, д.ф.н. А.И. Липкину, д.ф.н. А.Ю. Севальникову, д.ф.н. В.А. Ассееву, к.ф.-м.н. В.И. Сбитневу, асп. А.А. Прозорову, а также д.х.н. И.С. Дмитриеву за постоянную поддержку.

1 Экстремальные принципы в развитии естествознания.

Исторический обзор

Принцип наименьшего действия – это один из множества вариационных принципов физики и экстремальных принципов других разделов естествознания. Поэтому для исследования философских и методологических проблем, связанных с этим принципом, необходимо проследить процесс возникновения всех подобных принципов в конкретном научном контексте. В этой главе будут кратко описаны исторические обстоятельства открытия экстремальных принципов в механике, термодинамике, электродинамике, теории относительности, теории поля, квантовой механике, космологии, теории информации, химии и биологии. Формулировки основных экстремальных принципов приведены к общей схеме, сделаны выводы об их общих свойствах и месте в развитии естествознания.

1.1 Экстремальные принципы в механике

Леонард Эйлер (1707–1783) в «Диссертации о принципе наименьшего действия» упоминал о древнейших философах и последователях Аристотеля, установивших, что природа ничего не делает напрасно и во всех своих проявлениях избирает кратчайший или легчайший путь [196, с. 99]. Герон Александрийский в I веке до н.э. для частного случая отражения света сформулировал принцип кратчайшего пути. Николай Кузанский (1401–1464) доказывал, что все ограниченные предметы находятся между минимумом и максимумом. Бог – это абсолютный максимум совершенства, а природа есть максимум ограниченный. Максимум и минимум есть превосходные степени и потому совпадают [82]. По мнению Джордано Бруно (1548–1600) существует три

вида минимумов: в философии это монада, в физике – атом, в математике – точка. Все конечные вещи происходят из минимума. Но в едином минимум совпадает с максимумом: «Все вещи находятся во Вселенной и Вселенная – во всех вещах» [25].

Научная история ПНД началась с Пьера Ферма, сформулировавшего в 1662 году принцип кратчайшего времени для распространения света: свет распространяется между двумя точками A и B по пути, требующему наименьшего времени. Для однородной среды этот путь – прямая.

$$T = \min, \quad T = \int_A^B \frac{1}{V} ds,$$

где T – время распространения света; V – скорость распространения света; ds – элемент пути света.

В отличие от Герона Александрийского, Ферма был уверен, что простота природы проявляется не столько в кратчайших путях, сколько в кратчайшем времени прохождения этих путей, а принцип физики состоит в том, что природа совершает свои действия по наиболее простым путям [30, с. 742]. Простое следствие принципа Ферма – закон отражения, утверждающий, что угол падения луча света равняется углу его отражения. Принцип Ферма позволяет сделать расчеты и для действия линзы – различные толщины стекла линзы должны быть распределены так, чтобы путь каждого луча занимал одно и то же время из точки на источнике к соответствующей точке на изображении. Этот же принцип позволяет рассчитать кривизну зеркала в телескопе. Зеркало должно быть согнуто так, чтобы путь каждого луча занимал одно и то же время для достижения фокуса.

Готфрид Лейбниц (1646–1716), создавая дифференциальное и интегральное исчисление, опирался на философское понимание единства минимумов (монад) и максимума (Бога), сходное с идеями Джордано Бруно. Исходя из совершенства Бога, Лейбниц заключает: «Наиболее экономичным образом распорядился он местом, пространством, временем; при помощи наипростейших средств он произвел наибольшие действия» [92, с. 404]. Из тех же соображений Лейбниц

определяет величину, которая может быть минимальной или максимальной в процессе движения [127, с. 22]. Это произведение массы, скорости и длины пути $mv s$ или, что то же самое, произведение массы, квадрата скорости и времени $mv^2 t$, или произведение «живой силы» (кинетической энергии) на время. Величину эту он назвал – «действие».

Решение практических задач механики по нахождению пути, занимающему наименьшее время (И. Ньютон, И. Бернулли, Л. Эйлер, Ж.Лагранж), привело к возникновению вариационного исчисления. Сам термин в 1766 году предложил Эйлер. Задачей этого исчисления является нахождение функции, удовлетворяющей условию стационарности некоторого заданного функционала, то есть такой функции, бесконечно малые возмущения которой не вызывают изменения функционала, по крайней мере в первом порядке малости. В большинстве случаев стационарное значение функционала совпадает с его локальным экстремумом (чаще всего минимумом, но иногда и максимумом) от линий и поверхностей, и выраженным некоторыми интегралами.

Под вариацией какого-либо параметра Y понимают отклонение величины этого параметра от его стационарного или равновесного значения. Экстремумы отыскиваются путем математической операции варьирования (обозначается символом – δ), что означает выделение некоторого действительного движения или состояния как единственного путем перебора спектра всех мыслимых, возможных, но не реализующихся движений или состояний. Это движение или состояние трактуется как экстремальное по отношению ко всему многообразию возможных [135]. Запись вариации $\delta Y = 0$ означает, что разность между действительным значением Y и любым возможным Y в первом порядке приближения (малости) равна нулю. Это условие выполняется в случае, когда величина Y принимает минимальное, максимальное или стационарное значение. Например, для шарика, катящегося по дну небольшой прямой канавки на плоскости, любое малое отклонение в сторону от дна канавки практически не изменяет его высоты h и потенциальной энергии. На всем протяжении пути шарика его высота в канавке будет минимальной, а вариация около этого значения равна нулю: $h = \min, \delta h = 0$.

По форме все вариационные принципы принято разделять на дифференциальные и интегральные. Первые рассматривают состояние системы в отдельные моменты времени и устанавливают, чем действительное движение системы отличается от кинематически возможных движений в каждый момент времени. Вторые рассматривают весь путь системы целиком между конкретными точками в пространстве или во времени и устанавливают, чем действительное движение системы отличается от кинематически возможных движений, совершаемых системой за конечный промежуток времени.

Вариационные методы не только давали отличное совпадение с опытом, но и укладывались в научную парадигму того времени. Как и Ферма, создатели вариационного исчисления исходили из философского постулата Аристотеля о простоте природы. Например, И. Ньютон писал: «философы утверждают, что природа ничего не делает напрасно, а было бы напрасным совершать многим то, что может быть сделано меньшим» [115, с. 502].

В 1744 году Пьер Мопертюи (1698–1759) использовал понятие действия, предложенное Лейбницем, и сформулировал принцип наименьшего действия (ПНД), применимый, по его мнению, для всех случаев движения в природе: «Общий Принцип. Когда в природе происходят некоторые изменения, количество Действия, необходимое для этого изменения, является наименьшим возможным. Количество Действия есть произведение Массы Тел на их скорость и на расстояние, которые они пробегают» [107, с. 53]. Принцип Ферма для Мопертюи – лишь частный случай нового принципа: «Свет при пересечении различных сред не идет ни более коротким путем, ни путем более короткого времени... Он не следует ни по какому из них; он выбирает путь, имеющий более реальное преимущество... для которого количество действия будет наименьшим» [30, с. 26]. Так появился *первый фундаментальный экстремальный принцип* современной физики, гласящий, что для действительной траектории произведение массы, скорости и пути имеет минимальное значение: $mvs = \min$.

Леонард Эйлер в том же 1744 году первым записал этот принцип в строгой математической форме, из которой получается обычное уравнение механики. Он показал, что из всех возможных траекторий от точки A в точку B , описываемых

телом под действием центральных сил, некий интеграл всегда равен максимуму или минимуму. Или на языке вариационного исчисления – при любом малом изменении траектории вариация действия равна нулю. Данный принцип используется для нахождения реального времени пути системы в обобщенных координатах без учета того, как система перемещается по этой траектории:

$$S_0 = \min, \delta S_0 = 0, S_0 = \int_A^B m v ds,$$

где S_0 – действие; v – скорость; m – масса; ds – элемент траектории. В современных выражениях действие записывается как:

$$S_0 = \int_A^B p dq,$$

где p – импульс; q – обобщенная координата. Специального названия этому выражению Эйлер не дал, хотя согласился с Мопертюи в понимании всеобщего характера нового принципа: «В самом деле, я убежден, что повсюду природа действует согласно некоему принципу максимума и минимума..., мне кажется также, что именно в этом следует искать подлинные основы метафизики» [195, с. 746]. Новый принцип был эквивалентен принципу статики, согласно которому система стремится к состоянию с минимумом усилий или на современном языке – с минимумом потенциальной энергии.

Жозеф Лагранж (1736–1813) расширил принцип, сформулированный Эйлером для одной точки, на произвольную систему точек, произвольно взаимодействующих, при условии консервативности системы и голономности ее связей. Минимум в этом случае – локальный. Этот принцип принято называть *принципом Мопертюи-Лагранжа*:

$$\sum m_i \int v_i ds_i = \min, \delta \sum m_i \int v_i ds_i = 0.$$

Кроме того, Лагранж формулирует дифференциальный вариационный принцип виртуальных скоростей, известный еще как принцип возможных перемещений или принцип виртуальной работы. Согласно этому принципу, действительное состояние равновесия любой механической системы с идеальными связями отличается от всех других возможных для нее состояний тем, что сумма элементарных работ всех действующих на неё активных сил F , в т.ч. реакций связей, при любом возможном перемещении системы δs равна нулю:

$$\sum F_i \delta s_i = 0.$$

Оказалось, что из одного этого принципа можно вывести все теоремы статической механики.

Используя идею Д'Аламбера о введении сил инерции, Лагранж получает новый обобщенный принцип, применимый и к статике, и к динамике. Силы инерции J Д'Аламбер определяет через массу m и ускорение w :

$$J_i = -m_i w_i.$$

Согласно дифференциальному принципу Д'Аламбера-Лагранжа действительное движение механической системы отличается от всех кинематически возможных тем, что только для него сумма элементарных работ всех активных сил, в т.ч. реакций связей и сил инерции J на любом возможном перемещении системы s , в каждый момент времени равна нулю:

$$\sum (F_i + J_i) \delta s_i = 0.$$

Из нового принципа путем преобразований Лагранж получил как следствие все теоремы динамики и принцип наименьшего действия. Впоследствии Гаусс модифицировал принцип Д'Аламбера-Лагранжа, найдя для него соответствующий минимум. В 1755 году Лагранж завершает работу Эйлера, связывая принцип наименьшего действия с дифференциальным уравнением

механики (оно так и называется – уравнение Эйлера-Лагранжа): необходимым и достаточным условием стационарности интеграла $\int F(y, y', x) dx$ является выполнение дифференциального уравнения [См.: 91, с. 83]:

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y'} = 0.$$

Для интеграла $\int F(q, \dot{q}, t) dt$, где q – координата, \dot{q} с точкой – производная координаты по времени и t – время, уравнение Эйлера-Лагранжа выглядит так:

$$\frac{\partial F}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial \dot{q}} = 0.$$

В фундаментальном исследовании «Вариационные принципы механики» Корнелий Ланцош называет принцип Д'Аламбера «единственным постулатом аналитической механики», из которого следует не только условие равновесия, но и условие устойчивости системы – так называемая *теорема Лагранжа-Дирихле*. Если обозначить через U – некий потенциал, тогда состояние равновесия механической системы характеризуется стационарностью потенциальной энергии, то есть условием $\delta U = 0$. Для необратимых перемещений, если равновесие устойчиво, потенциальная энергия должна иметь относительный минимум $U = \min$, что соответствует условию $\delta U \geq 0$, в то время как в общем случае для равновесия обратимых перемещений требуется не минимальность, а лишь стационарность U [91, с. 100–110].

Ж. Лагранж отказался от любого метафизического, то есть телеологического и телеологического толкования ПНД, считая его лишь простым и общим выводом из законов механики [85, с. 320]. Одновременно Лагранж указал на некорректность названия самого принципа, поскольку действие может принимать не только минимальное, но и максимальное значение, однако согласился следовать традиции.

Англичанин Уильям Гамильтон (1805–1865), являясь идейным последователем своего соотечественника философа Джорджа Беркли, придавал ключевую роль в познании принципам аналогии, простоты и гармонии. Ведь именно эти принципы позволяют науке раз за разом переходить от этапа индуктивного к этапу дедуктивному [126, с. 242]. В 1827 году, обобщив эмпирический материал и идеи предшественников в геометрической оптике, Гамильтон пришел к выводу, что все ее закономерности можно вывести из одного простого и универсального принципа. Опираясь на *принцип Ферма* и оптико-механическую аналогию, и используя формулы Эйлера и Лагранжа, Гамильтон находит для луча света характеристическую функцию l так, чтобы условие ее вариации давало реальную траекторию луча между точками A и B :

$$l = \min, \delta l = 0, l = \int_A^B v ds \text{ или } T = \min, \delta T = 0, T = \int_A^B dt,$$

где v – преломляющая сила среды; T – время прохождения света. Такая форма математической записи обобщала принцип Ферма и ПНД. Она согласовывалась как с волновыми (Гюйгенс), так и с корпускулярными (Ньютон) представлениями о природе света. В первом случае v можно рассматривать как преломляющую силу среды (показатель преломления), тогда l – это оптическая длина пути света пропорциональная времени. Во втором случае v можно рассматривать как скорость частицы света (принцип наименьшего действия). Гамильтон показал, что некоторое количество (времени или действия), затрачиваемое светом вдоль его фактического пути от одной точки к другой, всегда оказывается наименьшим из всех возможных. Отсюда Гамильтон сделал вывод, что ни та, ни другая теория не дает истинного представления о сущности света [6, с. 36].

Будучи уверенным в полной аналогии оптических и механических явлений, Гамильтон уже в 1834 году применил новую форму принципа наименьшего действия к динамике, за что через четыре года был избран членом-корреспондентом Российской академии наук. Вместо интеграла по пути от количества движения Гамильтон вводит интеграл по времени от функции, обычно

называемой «функцией Лагранжа» или «лагранжианом», такой чтобы условие вариации этого интеграла давало бы реальное движение системы:

$$S = \min, \delta S = 0, S = \int_{t_1}^{t_2} L dt,$$

где S – действие; L – функция Лагранжа; t_1 и t_2 – начальный и конечный момент времени.

Для консервативной системы (в которой выполняется закон сохранения энергии) функция Лагранжа выражается как разность: $L = T - U$, где T – кинетическая энергия; U – потенциальная энергия. Гельмгольц называл эту функцию «кинетическим потенциалом», а Зоммерфельд – «свободной энергией», существует и другое название – «избыток кинетической энергии» [6, с. 138]. Согласно *принципу Гамильтона* среди всех возможных виртуальных значений интеграла действия его экстремальное (в общем случае стационарное) значение всегда соответствует действительному движению системы. Иначе говоря, из всех возможных виртуальных перемещений системы из одного состояния в другое за один и тот же промежуток времени, действительным является то, для которого действие по Гамильтону будет стационарным и экстремальным и локально наименьшим. Данная форма принципа используется для нахождения реального пути системы как функции времени. В отличие от формы Мопертюи, форма Гамильтона в общем случае не требует сохранения полной энергии системы.

В качестве иллюстрации принципа Гамильтона можно привести форму траектории камня, брошенного под углом к поверхности Земли. Эта траектория всегда будет параболой, если только угол броска был не прямой. Такая математически точная форма пути камня по остроумному замечанию Ричарда Фейнмана объясняется «равновесием между желанием раздобыть как можно больше потенциальной энергии и желанием как можно сильнее уменьшить количество кинетической энергии – это стремление добиться максимального уменьшения разности кинетической и потенциальной энергии» [171, с. 100].

Гамильтон, по сути, дал улучшенную формулировку принципов, установленных Эйлером и Лагранжем. Так если начальное и конечное состояние системы фиксировано, принцип Гамильтона аналогичен принципу возможных перемещений [См.: 91, с. 138]. В отличие от принципа наименьшего действия Мопертюи-Лагранжа, принцип Гамильтона являлся более универсальным, так как не рассматривал пространственные координаты. Эта особенность позволяет применять принцип Гамильтона не только к механическим, но и к любым типам систем. Однако принцип Гамильтона применим только для так называемых голономных связей – налагающих ограничения только на положения (или перемещения за время движения) точек и тел системы, но не на величины их скоростей. Для голономной системы число степеней свободы всегда равно числу независимых координат, необходимых для определения конфигурации системы [167, с. 47].

Общим у обоих принципов остается то, что они рассматривают экстремальную величину действия с размерностью «энергия \times время». Поскольку интеграл действия может принимать минимальные или максимальные значения, а иногда ни те, ни другие, но при этом всегда имеет стационарное значение, Гамильтон предложил называть свой принцип – законом стационарного действия. Поскольку действие на действительной траектории есть минимум только для малых областей [Там же, с. 282].

Русский математик Михаил Васильевич Остроградский (1801–1862) в 1848 году вывел принцип наименьшего действия, не используя допущение Гамильтона о стационарности или голономности связей системы. Получалось, что принцип работает и для неконсервативных систем, где закон сохранения энергии не имеет места. Поэтому обобщенный принцип наименьшего действия зачастую называют *принципом Гамильтона-Остроградского*, где лагранжиан выражается как:

$$L = \delta T + \sum F_i \delta s_i,$$

где T – кинетическая энергия; F – активные силы.

Немецкий математик Карл Густав Якоби (1804–1851) развил идеи Гамильтона и нашел форму ПНД, связанную с геометрией обобщенного пространства, согласно которой действительная траектория частицы является геодезической (кратчайшей) линией [201]:

$$S_j = \min, \delta S_j = 0, S_j = \int_A^B \sqrt{2(F + E)} ds,$$

где F – силовая функция активных сил; $E = T + U$ – полная энергия системы. По сути, это обобщение закона инерции, открытого Леонардо да Винчи и Галилеем: под действием собственной инерции частица движется по прямой линии с постоянной скоростью. Оказывается, этот закон верен не только для 3-х мерного, но и для n -мерного искривленного риманова пространства [См.: 91, с. 167]. *Принцип Якоби* – механический аналог принципа Ферма в оптике. Вот как об этой аналогии пишет К. Ланцош: «Механические траектории консервативных систем могут быть получены... с помощью построения ортогональных траекторий к поверхностям $S = const$. Это построение аналогично построению волнового фронта и световых лучей в геометрической оптике. Поверхности равного времени в оптике соответствуют поверхностям равного действия в механике, а принцип наименьшего времени Ферма – принципу наименьшего действия или принципу Якоби. И оптические и механические явления могут быть описаны как с помощью волн, так и с помощью частиц» [91, с. 314]. Вслед за Лагранжем, и Якоби и Остроградский рассматривали свои принципы только как математически удобную форму дифференциальных уравнений движения, не придавая им ни физического, ни философского смысла.

Еще два дифференциальных экстремальных принципа сформулировали Карл Гаусс (1777–1855) и Генрих Герц (1857–1894). Гаусс в 1829 году, развил принцип Д’Аламбера, который не был связан с минимальностью какой-либо функции системы, и сформулировал *принцип наименьшего «принуждения» Гаусса* [41, с. 171]. Вместо вариации по координатам, он провел вариацию по ускорениям:

$$\sum (F_i + J_i) \delta w_i = 0 \quad \text{или} \quad \sum (F_i - m_i w_i) \delta w_i = 0,$$

где F – активные силы; J – силы инерции; m – масса; w – ускорение. Затем Гаусс ввел величину Z , назвав ее «мерой принуждения», которая для действительного движения принимает наименьшее возможное значение из всех значений, совместимых с данными кинематическими связями [48]. В результате он получил:

$$Z = \min, \quad \delta Z = 0, \quad \text{где} \quad Z = \frac{1}{2} \sum m_i \left(\frac{F_i}{m_i} - w_i \right)^2.$$

Физический смысл принципа Гаусса состоит в том, что система движется так, чтобы максимально сохранить свободу всех своих точек от влияния (принуждения) связей системы. В качестве меры принуждения используется сумма произведений массы каждой точки системы на квадрат величины отклонения от того положения, которое она заняла бы, если бы была свободной [41, с. 171]. Из принципа Гаусса следует, что точка будет двигаться вдоль пути с наименьшей кривизной. Гаусс высоко ценил свой принцип, потому что он был полной механической аналогией метода наименьших квадратов в теории ошибок (также открытым Гауссом). В отличие от принципа наименьшего действия, принцип Гаусса с успехом может использоваться для неголономных связей или непотенциальных сил [См.: 91, с. 134]. Свое развитие принцип получил в теоремах, доказанных Е.А. Болотовым (1916) и Н.Г. Четаевым (1933).

Ф. Журден в 1903 году предложил принцип, аналогичный принципам Д’Аламбера и Гаусса, но в котором варьируется не координата и не ускорение, а скорость. Согласно *принципу Сулова-Журдена* из всех кинематически возможных движений механической системы с идеальными неголономными связями действительным является то, для которого в каждый момент времени скалярное произведение всех приложенных активных сил и сил инерции на любую возможную скорость системы равно нулю:

$$\sum (F_i - m_i w_i) \delta v_i = 0,$$

где v_i – скорость точки. Принцип можно назвать общим уравнением динамики для неголономных систем, из него можно получить все уравнения динамики неголономных систем. Он же эквивалентен принципу Д’Аламбера–Лагранжа при расширении понятия возможных перемещений для неголономных систем.

На основе идей Якоби и Гаусса в 1892–1893 годах Генрих Герц разработал *принцип кратчайшего пути или принцип наименьшей кривизны*, сводя задачи механики к проблеме геодезических линий, тем самым геометризировав классическую динамику [См.: 126, с. 849]. Герц показал, что в случае, когда приложенные силы равны нулю, мера принуждения Z может быть интерпретирована как геодезическая кривизна траектории точки в трехмерном евклидовом пространстве. Иначе говоря, точка при движении стремится уменьшить кривизну своей траектории в каждой точке до минимального значения, допускаемого связями [См.: 91, с. 134].

Стремясь построить механику без сил, Герц исключил из рассмотрения не только силы инерции, но и всякие силы вообще, заменив их кинематическими связями системы. По Герцу естественным движением материальной системы является движение по кратчайшему пути с постоянной скоростью или по пути с наименьшей кривизной. Критерием кривизны, как и в геометрии, является скорость изменения направления движения при изменении положения в пространстве. В соответствии с принципом Герца всякая свободная система пребывает в состоянии покоя или равномерного движения вдоль «прямейшего» пути. Под свободной системой Герц понимает систему, не подверженную действию активных сил и стесненную только внутренними связями, накладывающими условия лишь на взаимное расположение точек системы.

Из своего принципа Герц в качестве частных случаев вывел принцип наименьшего действия в формах Мопертюи–Лагранжа, Гамильтона–Остроградского и Якоби. На этом факте Герц основывал свою критику телеологической интерпретации ПНД. Ведь поскольку в движении по геодезическим линиям не заложено предвидение будущей цели, то и во всех

частных случаях этого принципа не может быть скрыта некая цель достигнуть кратчайшего пути, наименьшей затраты энергии или кратчайшего времени. Эти идеи Герца нашли свое неожиданное продолжение в общей теории относительности.

1.2 Экстремальные принципы в термодинамике

Немецкий физик Рудольф Клаузиус (1822–1888) обнаружил, что из-за необратимого рассеивания (диссипации) часть энергии системы теряется безвозвратно. В 1865 году он вводит понятие термодинамической энтропии S_t , как функции состояния термодинамической системы, а изменение энтропии определяет через отношение изменения общего количества тепла Q к величине абсолютной температуры T : $dS_t \geq \frac{\delta Q}{T}$.

Затем Клаузиус установил, что для замкнутых систем скорость изменения энтропии всегда больше нуля (или равна нулю для обратимых процессов), иначе говоря, энтропия всегда возрастает:

$$S_t = \max, \int dS_t = \int \frac{\delta Q}{T} \geq 0.$$

Энтропия (греч. *en* – в, *trope* – поворот, превращение) выражает способность энергии к превращениям: чем больше энтропия системы, тем меньше заключенная в ней энергия способна к превращениям [175, с. 445]. Предположив, что Вселенная – замкнутая система, Клаузиус обобщил свой вывод и назвал его *вторым началом термодинамики* – энтропия мира стремится к максимуму. В поисках единства Клаузиус пытается вывести второе начало из законов механики, для чего в принцип наименьшего действия Гамильтона вводит несколько серьезных допущений. Но поскольку Клаузиус исходил из движения отдельной

точки, он не смог истолковать физический смысл полученного им результата [См.: 126, с. 851].

Аналогичную попытку вывести второе начало термодинамики из ПНД предпринял Герман Гельмгольц (1821–1894). Клаузиус и Гельмгольц пытались сохранить механическое существо принципа Гамильтона. Но, как оказалось, что напрямую свести тепловые процессы к механической форме движения материи невозможно.

Американец Джозайя Гиббс (1839–1907) в 1875 году разрабатывает метод термодинамических потенциалов, позволяющий исследовать устойчивость равновесия системы относительно малых вариаций её термодинамических параметров. Гиббс исходил из аксиомы – термодинамическая система стремится к устойчивому равновесию и предположил, что равновесие системы характеризуется максимумом или минимумом одного из её термодинамических потенциалов, в зависимости от того какие термодинамические переменные постоянны – энтропия, внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия или энергия Гиббса. Кратко смысл *экстремальных принципов Гиббса* определяется так: «экстремумы (максимумы и минимумы) термодинамических потенциалов... задают состояния аттракторы, к которым самопроизвольно стремится система, если ее граничные условия соответствуют определениям потенциалов» [132, с. 118]. Гиббс сформулировал несколько критериев равновесия в виде вариационных принципов.

1) Для равновесия любой изолированной (замкнутой) системы необходимо и достаточно, чтобы во всех возможных изменениях состояния системы, при которых не изменяется ее внутренняя энергия U , вариация ее энтропии S была бы нулевой или отрицательной. В этом случае энтропия стремится к минимальному значению:

$$S_i = \max, \delta S \leq 0, U = \text{const}.$$

В случаях, при которых не изменяется энтропия, необходимо и достаточно, чтобы была нулевой или отрицательной вариация внутренней энергии. Энергия при этом стремится к минимуму: $U = \min, \delta U \geq 0, S = \text{const}$.

Первая часть данного принципа соответствует второму началу термодинамики, а в целом он аналогичен механическим вариационным принципам – принципу возможных перемещений и принципу Д’Аламбера.

2) Открытая система с фиксированными значениями энтропии и объёма $S_i = \text{const}, V = \text{const}$ стремится к минимуму внутренней энергии:

$$U = \min, \delta U \geq 0, dU = dTS_i - dPV = dQ - dA,$$

где V – объём; P – давление; T – абсолютная температура; Q – полученная извне теплота; A – работа над внешними системами.

3) Открытая система с фиксированными значениями энтропии и давления $S_i = \text{const}, P = \text{const}$ стремится к минимуму энтальпии:

$$H = \min, \delta H \geq 0, dH = dU + PdV.$$

4) Открытая система с фиксированными значениями температуры и объёма $T = \text{const}, V = \text{const}$ стремится к минимуму свободной энергии:

$$F = \min, \delta F \geq 0, dF = dU - TdS_i.$$

По выражению И. Пригожина в этом случае «равновесие есть результат конкуренции между энергией и энтропией» [132, с. 118].

5) Открытая система с фиксированными значениями температуры и давления $T = \text{const}, P = \text{const}$ стремится к минимуму энергии Гиббса:

$$G = \min, \delta G \geq 0, dG = (dU + PdV) - TdS_i,$$

где PdV – работа над внешними системами.

Знаки больше или меньше во всех принципах соответствуют устойчивому состоянию, знаки равенства или нулевая вариация соответствуют безразличному состоянию. Условия равновесия и устойчивости Гиббса применимы к состояниям локально равновесным и устойчивым. При этом состояния системы в целом могут быть неравновесным и неустойчивым. Всю статистическую теорию термодинамического равновесия удалось изложить, исходя из первого принципа Гиббса, а в целом принципы Гиббса стали общепризнанной основой теории термодинамического равновесия. В отличие от вариационных принципов аналитической механики, где варьируется только положение частиц, в принципах Гиббса варьированию подвергаются все параметры, которые могут изменяться в исследуемых процессах.

В отличие от Клаузиуса и Гельмгольца, Людвиг Больцман (1844–1906), отказался от механической аналогии, предложив применять к обоснованию второго начала термодинамики статистический подход. Вместо мгновенных величин он предложил рассматривать только их средние значения, а теплоту понимать как энергию неупорядоченных движений молекул. Тогда для термодинамической системы среднее значение функции Лагранжа \bar{L} в принципе наименьшего действия Гамильтона становится аналогом энтропии этой системы: $S = \bar{L}/T$ и, соответственно, уравнение $\delta\bar{L} = 0$ аналогично вариационной записи для энтропии $\delta S = 0$ [См.: 6, с. 62].

Используя пример газа, Больцман отождествил энтропию с числом комплексов или числом способов, которыми может быть достигнуто данное макроскопическое состояние [См.: 132, с. 116]. Затем он выразил энтропию количественно в своей знаменитой формуле: $S = k \ln N$, где k – постоянная Больцмана, N – число комплексов или число возможных состояний системы. В равновесном состоянии системы: $N = \max, p_t = \max$, где p_t – вероятность состояния, которая пропорциональна числу возможных состояний: $p_t \sim N$, где $N = e^{S/k}$.

Больцман предположил, что максимальная симметрия на микроскопическом уровне отдельных молекул соответствует максимальному хаосу (минимальному порядку) на макроскопическом уровне системы или газа в целом, тогда энтропия равна нулю. Таким образом, был введен новый потенциал, к максимуму которого самопроизвольно стремится термодинамическая система, при этом отклонение от максимальной вероятности стремится к нулю, а состояние устойчивого равновесия системы – это состояние с максимальной вероятностью: $p_i \rightarrow \max, p_i \rightarrow \bar{p}_i$.

В 1902 году Гиббс развил идеи Больцмана о статистическом истолковании второго начала термодинамики и обобщении принципа Гамильтона. В своей статистической механике Гиббс использовал понятие фазового объема, имеющего размерность действия в том смысле, в котором этот термин употребляется в принципе наименьшего действия [См.: 6, с. 64].

Потенциалы Гиббса и Больцмана относятся к равновесным процессам, в которых система стремится в одном направлении – к максимуму или минимуму соответствующего потенциала, при достижении которого наступает устойчивое равновесие – состояние, в котором и скорость, и ускорение изменения этого потенциала равны нулю. В 1931 году с работы Ларса Онсагера (1903–1976) начинается изучение неравновесных термодинамических и химических процессов. В таких процессах система стремится не к равновесному, а к более общему – стационарному состоянию, в котором существенные для системы величины или не меняются со временем, или меняются с постоянной скоростью (ускорением). Иначе говоря, производные этих величин по времени равны нулю. Оказалось, что стационарные состояния открытых систем также характеризуются экстремальными значениями некоторого потенциала. Онсагер сформулировал соотношения взаимности и *принцип минимума роста энтропии или минимума рассеяния энергии*, согласно которому действительный процесс отличается от всех возможных тем, что при постоянном производстве энтропии $\sigma = \sum JX = \text{const}$ рассеивание (диссипация) энергии минимально:

$$[\Phi + \Psi] = \min, \delta \int_V [\Phi + \Psi] dV = 0.$$

При постоянных силах $X = const$ или потоках $J = const$ разница между локальным производством энтропии и локальными потенциалами рассеивания максимальна:

$$[\sigma - \Phi] = \max, \delta \int_V [\sigma - \Phi] dV = 0, [\sigma - \Psi] = \max, \delta \int_V [\sigma - \Psi] dV = 0,$$

где σ – объемная плотность производства энтропии; Φ – потенциал рассеивания потоков; Ψ – потенциал рассеивания сил; J – потоки; X – силы.

Опираясь на принципы Онсагера, Илья Пригожин в 1947 доказал *теорему о минимуме производства энтропии* для стационарных состояний. Поскольку открытая система обменивается с внешней средой энергией или веществом, изменение энтропии dS_t можно представить в виде суммы двух членов. Один – поток энтропии dS_e обусловлен происходящими обменами, другой – производство энтропии dS_i обусловлен процессами внутри системы. Тогда можно записать: $\frac{dS_t}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt}$. Теорема Пригожина гласит, что если в системе протекает слабо неравновесный процесс, описываемый линейным уравнением, то в стационарном состоянии, когда в целом энтропия системы не меняется), скорость возникновения или производство энтропии в системе P_S также не меняется: $\frac{dS_t}{dt} = 0, \frac{dS_e}{dt} = -\frac{dS_i}{dt} = -P_S$ и принимает минимально возможное значение, совместимое с внешними условиями для данной системы, что также можно записать в вариационной форме:

$$P_S = \min, \delta P_S = 0, P_S = \frac{dS_i}{dt} = \int_V \sigma dV.$$

Иначе говоря, при данных внешних условиях, препятствующих достижению системой равновесного состояния, стационарному состоянию

системы соответствует минимум производства энтропии. По выражению Пригожина: «стационарное состояние, к которому стремится система, отличается тем, что в нем перенос энтропии в окружающую среду настолько мал, насколько это позволяют наложенные на систему граничные условия» [132, с. 129]. Производство или скорость возникновения энтропии – это новый термодинамический потенциал для линейных или слабо неравновесных процессов. В случае закрытой системы, когда не обмена с окружающей средой этот принцип верен для производства энтропии системы в целом:

$$P_s = \min, \delta P_s = 0, P_s = \frac{dS}{dt} = \int_V \sigma dV .$$

Пригожин не считал экстремальные принципы достаточно универсальными для природы [111, с. 276], видимо, поэтому он не стал записывать свою теорему в вариационной форме. Это сделал другой ученый. Оказалось, что неравновесная термодинамика способна объединить такие разные области как физику континуума, гидродинамику и электродинамику, которые описываются на языке теории поля. «Перевод» неравновесной термодинамики на этот язык был произведен в 1974 году венгерским ученым Иштваном Дьярмати, сформулировавшим вариационный принцип, объединяющий принцип наименьшего рассеяния энергии Онсагера и наименьшего производства энтропии Пригожина [58, с. 8]. Согласно этому принципу действительный процесс в открытой системе отличается от всех возможных тем, что для него обобщенная функция Онсагера-Махлупа O_M достигает максимального значения, совместимого с внешними условиями данной системы. Предложенная Дьярмати интегральная форма универсального экстремального принципа термодинамики, эквивалентная полной системе уравнений переноса для необратимых линейных и нелинейных процессов выглядит так [Там же, с. 167]:

$$O_M = \max, \delta O_M = 0, O_M = \int_V [\sigma - (\Phi + \Psi)] dV .$$

Смысл функции Онсагера-Махлупа можно выразить как термодинамическую объемную плотность, равную разности производства энтропии (характеризует внутреннюю активность системы) и суммы двух потенциалов рассеяния (характеризует связи системы). По аналогии с лагранжианом в принципе Гамильтона, Дьярмати назвал первую часть – кинетической, а вторую – потенциальной. Для замкнутой системы, где нет потоков и сил, универсальный принцип сводится к принципу минимального производства энтропии Пригожина. Другой частный случай – принцип Онсагера получается при фиксированном значении локального производства энтропии σ и одновременном варьировании по силам и потокам.

По Дьярмати в общем случае стационарного состояния произведенная энтропия не вся уходит в окружающую среду, как у Пригожина, а частично остается в системе, при этом остающаяся разница принимает максимально возможное значение, определяемое граничными условиями. Таким образом, универсальным термодинамическим потенциалом для необратимых линейных и нелинейных систем является разность между плотностью производства энтропии во времени и суммой плотности потоков энтропии и плотности термодинамического поля в пространстве. В стационарном состоянии системы этот потенциал принимает максимальное значение из всех возможных.

Далее Дьярмати развивает догадку Пригожина о том, что в термодинамике справедлив принцип, аналогичный дифференциальному принципу Гаусса в механике и формулирует *принцип наименьшего принуждения Дьярмати*: если заданы свободные термодинамические силы и условия локального принуждения, то в любой термодинамической системе возможны лишь такие необратимые процессы, для которых «принуждение» минимально [Та же, с. 159]:

$$C = \min, \delta C = 0, C = \frac{1}{2} \sum R_{ii} \left(\frac{x_i}{R_{ii}} - J_i \right)^2,$$

где C – принуждение; R – сопротивления; X – обобщенные термодинамические силы; J – потоки. Сопротивления в термодинамике аналогичны массе в механике, потоки аналогичны ускорению, термодинамические силы аналогичны

ньютоновским силам. Несмотря на то, что Дьярмати фиксирует аналогию между своим принципом и принципом Гаусса, он не может «сделать никаких дальнейших заключений о сущности связи между фундаментальными принципами механики и термодинамики» [Там же, с. 157].

Непосредственно к термодинамике примыкают гидродинамика и механика сплошных сред, где экстремальные принципы применяются не менее широко. Обзор таких принципов дан в работе В.Е. Захарова и В.А. Кузнецова [62]. В работе Г.А. Максимова представлена формулировка обобщенного вариационного принципа для диссипативных гидродинамических и механических систем в виде суммы вариационных принципов Гамильтона и Онсагера [98]. В этом случае система уравнений диссипативной гидродинамики соответствует уравнениям движения механического и температурного полей, получаемых из условия стационарности действия, построенного на лагранжиане в виде разности кинетической и свободной энергий. Тем самым Максимов опровергает существующее утверждение [См. например: 87; 88] о невозможности сформулировать вариационный принцип, аналогичный принципу наименьшего действия Гамильтона для диссипативных систем. В качестве аргументов он ссылается на успешные подходы, применяющие вариационные принципы в теории теплопроводности и неравновесной термодинамике, где явно учитываются диссипативные процессы (Л. Онсагер, Г. Циглер [187], И. Дьярмати, П. Гленсдорф и И. Пригожин [47], М. Био [12], В.Л. Бердичевский [10]).

В 70-е годы XX столетия на основе объединения неравновесной термодинамики и теории систем развивается новое направление в науке – синергетика (Г. Хакен) или теория диссипативных структур (И. Пригожин). Развитие или эволюция в синергетике понимается как последовательность периодов стабильных состояний системы, сменяющихся периодами хаотического поведения (бифуркациями), после которых происходит переход к одному из следующих устойчивых состояний – аттракторов, выбор которых определяется случайными флуктуациями в точке бифуркации. Для того чтобы перейти к новому устойчивому состоянию диссипативные структуры поддерживают связь между своими членами и ведут себя как единое целое – синергетически, причем

«дальнодействующие корреляции организуют систему еще до того, как происходит макроскопическая бифуркация» [132, с. 165]. Интересно, что несмотря на существенную разницу, фундаментальные уровни описания диссипативных и равновесных структур могут быть связаны с помощью экстремальных принципов и вероятностного подхода.

С точки зрения синергетики всеобщая необратимость природных процессов, выражаемая через экстремальный принцип роста энтропии, порождает естественную случайность в поведении объектов, которая в свою очередь непрерывно выводит систему из состояния устойчивости, но только для того, чтобы согласованные действия частей системы вновь привели ее к очередному устойчивому состоянию. Именно так, через случайные флуктуации и бифуркации – энтропия в отдельных областях и системах уменьшается, а значит, возникают системы с возрастающей степенью порядка и сложности.

Таким образом, общее правило термодинамики можно обобщить так: система стремится к одному из устойчивых стационарных состояний-процессов. Устойчивость таких состояний-процессов обеспечивается экстремальными значениями одного из термодинамических потенциалов системы, зависящих от внешних условий. Какое из всех возможных состояний-процессов окажется более устойчивым и будет выбрано системой, определяется различными принципами отбора или законами устойчивости. Для каждого типа взаимодействия, по словам В.П. Бранского, «закон устойчивости, которому это взаимодействие подчиняется... игра[ет] роль селекционного фильтра» [23, с. 73]. Глобальным принципом отбора является стремление системы к состоянию с максимальной вероятностью, частными принципами отбора – экстремальные принципы, описывающие отдельные состояния-аттракторы, в которых некоторый потенциал принимает максимальное или минимальное значение.

Энтропия, как характеристика состояния систем, имеет смысл не только в термодинамике. Ее можно использовать для описания меры упорядоченности, организованности и разнообразия систем, а также меры обмена информацией и устранения неопределенности. В каждой из этих областей существуют экстремальные принципы, которые мы перечислим в следующих разделах.

1.3 Экстремальные принципы в электродинамике, теории относительности, теории поля

В 1886 году Герман Гельмгольц пытался систематизировать применение ПНД в механике, термодинамике и электродинамике. Для этого он предложил отказаться от характерного для механики допущения, что кинетическая энергия есть однородная квадратичная форма скоростей, а потенциальная энергия – функция только от координат (и времени). Для расширения сферы применения ПНД необходимо ввести в рассмотрение скрытые движения некоторых недоступных нашему наблюдению масс [См.: 125, с. 857].

Гельмгольц дал общую формулировку ПНД, в которой за основу берет не разность кинетической и потенциальной энергии как в механике, а кинетический потенциал, который только в частном случае становится равным этой разнице. Согласно *экстремальному принципу Гельмгольца* действительный из всех возможных переходов в определенное время из определенного начального в определенное конечное состояния физической системы таков, что действие является наименьшим (стационарным):

$$S = \min, \delta S = 0, S = \int_{t_1}^{t_2} (H + \sum F_i s_i) dt = \int_{t_1}^{t_2} (H + A) dt, H = T - U,$$

где H – кинетический потенциал; T – кинетическая энергия; U – потенциальная энергия; F – внешние силы; s – координаты; A – внешняя работа.

В случае покоя, кинетический потенциал равен потенциальной энергии, которая при равновесии должна иметь минимум [45, с. 434]. Из этого принципа Гельмгольц выводит экстремальный принцип для свободной энергии термодинамической системы, а также электродинамический закон Ленца и закон термоэлектрического эффекта [См.: 125, с. 853]. Если принцип наименьшего действия минимизирует переход потенциальной энергии в кинетическую и

наоборот, то закон Ленца минимизирует переход магнитной энергии в электрическую и наоборот [152]. Однако теория Гельмгольца подходила только для обратимых процессов [См.: 121, с. 571].

Позже Р. Фейнман приводил один из примеров приложения *принципа наименьшего действия, связывающего электрические явления с термодинамикой*: токи, протекающие через вещество, распределяются так, чтобы скорость генерации тепла была наименьшей:

$$\frac{dQ}{dt} = \min .$$

Стационарное распределение скоростей электронов в металле, по которому течет ток можно найти из принципа, что «оно при данном токе должно быть таково, что развивающаяся в секунду за счет столкновений энтропия уменьшится настолько, насколько это возможно» [171, с. 120].

Поставив целью свести электродинамику Максвелла и электронную теорию к единым динамическим принципам или к общей форме движения материи, Джозеф Лармор (1900 г.), а вслед за ним К. Шварцшильд, Г. Лоренц, Г. Ми и другие достигли этого, найдя соответствующее выражение для функции Лагранжа в принципе наименьшего действия [См.: 122, с. 587]. Вместо лагранжиана, интегрируемого по координате, использовалась плотность лагранжиана, интегрируемая по всему объему. Фейнман в своих лекциях [171, с. 113] приводит пример того, как электростатическое поле (распределение потенциалов в пространстве) легко описывается не только при помощи дифференциального уравнения, но и через требование стационарности и минимума действия поля S_f :

$$S_f = \min, \delta S_f = 0, S_f = \int L_f dt, L_f = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V (\nabla \varphi)^2 dV ,$$

где L_f – лагранжиан поля; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость; φ – электростатический потенциал.

Таким образом, *принцип минимума полной энергии поля* говорит, что «правильное поле и есть то единственное, которое из всех полей, получаемых как градиент потенциала, отличается наименьшей полной энергией» [Там же, с. 115]. Или объемный интеграл действия, равного полной энергии поля, по всему пространству для истинного распределения значений потенциалов поля имеет минимум, что аналогично теореме Лагранжа-Дирихле для механических систем.

Если в электростатическом поле движется заряд, в соответствии с *принципом наименьшего действия для заряда, движущегося в электростатическом поле*, сумма действия поля S_f , действия заряда S_m и действие его взаимодействия с зарядом S_{mf} будет стационарна и минимальна:

$$S = \min, \delta S = 0, S = S_f + S_m + S_{mf},$$

$$S = \int L dt, L = L_f + L_m + L_{mf} = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V (\nabla \varphi)^2 dV + \int_V \frac{1}{2} m v^2 dV - \int_V \rho \varphi dV,$$

где L_{mf} – лагранжиан взаимодействия зарядов и поля; L_m – лагранжиан заряда; ρ – объемная плотность заряда.

Чтобы построить теорию поля (любого, а не только электромагнитного), в каждой составляющей необходимо было учесть скорость движения заряженной частицы. Причем сделать это с учетом уравнений теории относительности, то есть в релятивистской форме. Сразу нескольку физиков (Г. Лоренц, Д. Гильберт, А. Эйнштейн и А. Пуанкаре) выяснили, что для построения теории поля достаточно так сформулировать ПНД и выбрать для вариации такую функцию Лагранжа, чтобы они отвечали требованиям релятивистской инвариантности. Пуанкаре объединил интегрирование по пространству и времени и записал принцип Гамильтона в таком виде, из которого не только легко получаются уравнения Максвелла, но его можно применять для теоретического построения теории относительности [См.: 6, с. 71].

Экстремальный принцип для свободной релятивистской частицы формулируется так: действительная траектория свободной частицы из одного

состояния в другое за один и тот же промежуток времени отличается от всех возможных траекторий тем, что ее действие минимально [90, с. 45]:

$$S_m = \min, \delta S_m = 0, S_m = -mc^2 \int_{e_1}^{e_2} d\tau = -mc \int_{e_1}^{e_2} ds = -mc^2 \int_{e_1}^{e_2} \sqrt{1 - v^2/c^2} dt ,$$

где τ – собственное время частицы; t – время системы отсчета; e_1 и e_2 – начальное и конечное события; ds – элемент мировой линии; c – скорость света. Если пренебречь релятивистским изменением массы частицы, ее действие будет равно:

$$S_m = \tau = \int_{e_1}^{e_2} d\tau = \max .$$

Последнее выражение называют *принципом стационарности собственного времени* [См.: 261] или *принципом максимального старения* [См.: 271]: собственное время или скорость «старения» частицы стационарны, в данном случае – максимальны относительно всех виртуальных или возможных траекторий частицы. При этом длина мировой или геодезической линии также минимальна или стационарна.

Для нахождения уравнений электромагнитного поля функцию Лагранжа в принципе Гамильтона выразили через разность квадратов векторов напряженности электрического и магнитного полей. При этом магнитная энергия выступала аналогом кинетической, а электрическая – аналогом потенциальной энергии. Тогда действительное свободное электромагнитное поле (изменение распределения потенциалов в пространстве) отличается от всех возможных тем, что его действие минимально:

$$S_f = \min, \delta S_f = 0, S_f = \int L_f dt, L_f = \frac{1}{8\pi} \int_V (E^2 - H^2) dV ,$$

где E – напряженность электрического поля; H – напряженность магнитного поля.

Для 4-мерного пространства-времени лагранжиан интегрируется не только по пространству, но и по времени. С релятивистской точки зрения действие в смысле Гамильтона имеет смысл произведения плотности материи и плотности поля на четырех мерный объем пространства-времени [См.: 125, с. 857]. Поэтому, если то же условие записать в 4-мерной форме, получаем (в гауссовой системе единиц) [См.: 90, с. 102]:

$$S_f = -\frac{1}{16\pi c} \int F_{ik} F^{ik} d\Omega, \quad d\Omega = c dt dV,$$

где F^{ik} – тензор электромагнитного поля.

В 1906 году Макс Планк (1858–1947) записал *принцип наименьшего действия для релятивистского движения частицы в поле консервативной силы*: действительная траектория заряженной частицы из одного состояния в другое за один и тот же промежуток времени отличается от всех возможных траекторий тем, что сумма действия частицы S_m и действия ее взаимодействия с полем S_{mf} минимальна:

$$S = \min, \quad \delta S = 0, \quad S = S_m + S_{mf}, \quad S = \int [-mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - V] dt,$$

где m – масса покоя частицы; v – ее скорость; V – потенциал поля, зависящий от положения частицы. Для траектории заряженной частицы в электромагнитном поле суммарное действие принимает вид:

$$S = S_m + S_{mf} = \int_{e_1}^{e_2} \left(-mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - \left[\rho\varphi - \frac{1}{c} jA \right] \right) dt,$$

где ρ – объемная плотность заряда; φ – скалярный потенциал поля; A – векторный потенциал поля; j – вектор плотности тока. Если то же самое условие записать в 4-мерной форме, добавив действие поля S_f получим [См.: 90, с. 105]:

$$S = S_m + S_{mf} + S_f, \quad S = -\sum mc \int ds - \frac{1}{c^2} \int A_i j^i d\Omega - \frac{1}{16\pi c} \int F_{ik} F^{ik} d\Omega,$$

где A_i – 4-потенциал поля; j^i – 4-вектор плотности тока.

Уравнения гравитационного поля были практически одновременно выведены в ноябре 1915 года: 20 числа Давидом Гильбертом из ПНД и 25 числа Альбертом Эйнштейном из принципа общей ковариантности уравнений гравитационного поля. Но работа Гильберта была опубликована позднее работы Эйнштейна, который все таки посвятил отдельную статью выводу уравнений общей теории относительности из принципа Гамильтона [197, с. 599]. *Принцип наименьшего действия для гравитационного поля* можно сформулировать так: действительное гравитационное поле (распределение гравитационных потенциалов в пространстве) отличается от всех возможных тем, что сумма его действия S_g и действия материи S_m (массивных частиц и негравитационных полей) – минимальна:

$$S = \min, \quad \delta S = 0, \quad S = S_g + S_m, \quad S_g = -\frac{1}{16\pi G} \int R \sqrt{-g} d\Omega, \quad S_m = -\frac{1}{2c} \int T_{ik} g^{ik} \sqrt{-g} d\Omega,$$

где G – гравитационная постоянная Ньютона; R – скалярная кривизна пространства-времени; g – определитель матрицы матричного тензора; T_{ik} – тензор энергии-импульса [См.: 90, с. 361–372].

Выражаясь словами Г. Вейля, «от всех возможных 4-мерных пространств реально существующий мир отличается тем, что в любой его области действие принимает экстремальное значение» [31, с. 522]. Позже А. Эйнштейн, Г. Вейль, А. Эддингтон и другие, опираясь на принцип Гамильтона, попытались создать единую теорию поля, однако не смогли достичь этого, в первую очередь потому,

что не принимали во внимание вероятностный характер поведения квантовых микроробъектов. В этом преуспела квантовая механика.

1.4 Экстремальные принципы в квантовой механике

Макс Планк произвел революцию в физике, предположив, что действие, которое используется в принципах наименьшего действия и имеющее размерность энергии умноженной на время, величина прерывная. Планк исходил из двух методологических принципов: простоты законов природы и дискретности материи [См.: 6, с. 81]. Арнольд Зоммерфельд в статье, посвященной открытию Планка, обратил внимание на то, что его термин «квант действия» говорит о связи с понятием действия в принципе наименьшего действия так, что «при каждом чисто молекулярном процессе каждая молекула воспринимает или отдает определенное универсальное количество действия, а именно: $\int_0^{\tau} L dt = h/2\pi$, где τ – длительность процесса [66, с. 779].

В 1913 году Нильс Бор, используя понятие кванта действия, создает модель атома и объясняет ряд закономерностей атомных спектров. Электрон по Бору стремится занять стационарное состояние на соответствующих орбитах атома. Стационарность орбиты характеризуется минимальной энергией, заполняющих ее электронов. В целом атом устойчив, когда распределение его электронов по всем орбитам соответствует минимальной энергии атома в целом. В теории Бора «электрон спонтанно переходит из возбужденного в нормальное состояние, так как он стремится к состоянию с минимум энергии» [125, с. 866].

Луи Де Бройль, опираясь на работы Гамильтона по оптико-механической аналогии и идентичность ПНД и принципа Ферма, объединяет понятия волн и квантов. Он приходит к выводу, что динамически возможные траектории движущегося тела совпадают с возможными лучами фазовой волны [Там же, с.

861]. Затем он предположил, что именно «квант действия служит соединительным звеном между корпускулярным и волновым представлениями о материальных частицах» [57, с. 135]. Вскоре его гипотеза о том, что любое тело можно одновременно рассматривать и как фазовую волну, подтвердилась экспериментально.

Как и Де Бройль, Эрвин Шредингер был уверен, что принцип Гамильтона можно рассматривать как принцип Ферма для распространения волн в конфигурационном пространстве [См.: 125, с. 691]. Тогда уравнение Гамильтона будет выражать принцип Гюйгенса для данных волн, а функция действия играть в волновой механике роль фазы. Гюйгенс, как известно, объяснял распространение фронта волны, воображая, что каждая точка фронта испускает небольшую сферическую волну. Он смог показать, что эти небольшие волны в дальнейшем воссоздают фронт основной волны, а все прочие колебания небольших волн пересекаются и просто гасят друг друга. В 1819 году французский инженер Огюстин Френель придал этой идее математическое обоснование и использовал ее для детального объяснения оптической дифракции и интерференции.

Шредингер считал, что в соответствии с идеей Гюйгенса, «лучи» или ортогональные траектории волновых поверхностей можно рассматривать как пути движения системы с энергией E в соответствии с уравнениями Гамильтона-Якоби [См.: 6, с. 90]. Воспользовавшись соотношением Де Бройля, Шредингер получает свое основное волновое уравнение, вводя в макроскопическую физику понятия длины волны и амплитуды [См.: 125, с. 861]. В своей первой работе 1926 года Шредингер попытался вывести волновую механику непосредственно из классического принципа Гамильтона, после неудачной попытки он пошел другим путем. Он вводит некую абстрактную волновую функцию – ψ , исходя из определения, что: $S = K \ln \psi$, где S – действие Гамильтона; K – коэффициент с размерностью действия.

Опираясь на аксиому о том, что в стационарном состоянии атом имеет минимальную энергию, Шредингер был уверен, что варьирование интеграла его волновой функции позволит вывести уравнение квантовой механики. В результате он формулирует вариационный принцип для волновой функции.

Вскоре Макс Борн выяснил, что смысл уравнения Шредингера и его волновой функции состоит в том, что они определяют вероятность любого варианта хода событий в механическом процессе [18, с. 117].

Следующий логичный шаг – объединить принцип Гамильтона и вероятностное описание квантовых событий. Но в определении лагранжиана, входящего в вариационные принципы обычного поля возникает проблема. Дело в том, что состояние квантовой системы является суперпозицией множества состояний со своими значениями координат и импульсов, входящих в лагранжиан, и не имеющих однозначной связи, поскольку они подчиняются соотношению неопределенности Гейзенберга. Эта проблема частично была решена в квантовой электродинамике, описывающей взаимодействие электромагнитного поля с электроном.

Для нахождения действительного движения электрона, точнее электронно-позитронной пары в электромагнитном поле рассчитывается плотность лагранжиана: $L = L_m + L_{mf} + L_f$, где L_m – плотность лагранжиана свободной частицы (электронно-позитронной пары); L_f – плотность лагранжиана электромагнитного поля (фотона); L_{mf} – плотность лагранжиана взаимодействия частицы и поля.

$$L = \left[i\bar{\psi}\gamma_\mu\partial_\mu - m\bar{\psi}\psi \right] - e\bar{\psi}\gamma_\mu A_\mu\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu},$$

где ψ и $\bar{\psi}$ с чертой – биспинор электронно-позитронного поля и его сопряжение; ∂_μ – частная производная; e и m – заряд и масса электрона; γ_μ – 4-матрица Дирака; A_μ – 4-вектор поля электрона и внешних источников; $F_{\mu\nu}$ – тензор электромагнитного поля.

Для проведения расчетов в квантовой электродинамике Поль Дирак предложил каждую отдельную возможную эволюцию квантовой системы из одного состояния в другое описывать с помощью оператора, содержащего функцию, эквивалентную классическому действию и имеющей смысл фазы волны вероятности. После подсказки Дирака, Ричард Фейнман в 1940-х годах в своей

докторской диссертации [220, р. 119] использовал ту же самую идею Гюйгенса, которая ранее помогла Шредингеру, и предложил новый подход к квантовой физике. Фейнман предположил, что квантовая частица одновременно движется по всем возможным траекториям, но волны вероятности гасятся в точке прибытия так, что максимальная вероятность падает на узкий пучок траекторий вокруг действительного пути, для которого вариация действия равна нулю. Для нахождения стационарной траектории системы из одного состояния в другое Фейнман предложил вместо варьирования вдоль единственной траектории суммировать вклады в полную амплитуду вероятности от всех возможных траекторий. Полученная таким образом максимальная амплитуда вероятности и даст действительную траекторию системы. Сначала «интегралы по траекториям» были успешно использованы для изучения броуновского движения и диффузии частиц, и только потом применены к квантовой механике.

Эксперимент с двумя щелями, в котором возникает интерференция двух несовместимых траекторий, Фейнман объяснил тем, что в момент измерения (взаимодействия с прибором или другим объектом) происходит выбор одного из интерферирующих альтернативных или возможных состояний. В результате ранее совместимые состояния становятся несовместимыми и перестают интерферировать, что наблюдается как «коллапс» или «редукция». При этом, по словам М. Борна, важен факт взаимодействия с прибором, а не наличие сознательного наблюдателя [14, с. 32].

Как было описано выше, основные законы классической электродинамики, выражаемые уравнениями Максвелла, также могут быть сформулированы с помощью принципа наименьшего действия путем определения экстремального значения действия, выраженного через скалярный и векторный потенциалы, путем варьирования его по этим потенциалам. Рассуждая по аналогии, Фейнман находит законы квантовой электродинамики, исходя из правила: амплитуда вероятности какого-либо события равна интегралу по траекториям, который берется по всем значениям потенциалов в каждой точке пространства-времени и вдоль всех путей, удовлетворяющих определенным граничным условиям в начальной и конечной мировых точках события [169, с. 257].

Фейнман формулирует квантовомеханическое правило вычисления амплитуды вероятности. Необходимо установить, какой вклад вносит каждая траектория в полную амплитуду вероятности перехода системы из точки a в точку b . Вклад дают сразу все траектории, а не только та, которая соответствует экстремальному действию. При этом вклады отдельных траекторий равны по величине, но различаются значением фазы. Таким образом, вероятность p перехода частицы из точки a в точку b равна квадрату модуля амплитуды вероятности этого перехода [Там же, с. 41]: $p(b,a) = |K(b,a)|^2$, где K – функционал, называемый пропагатором. Смысл пропагатора состоит в том, что он описывает волновую функцию в момент t_2 через волновую функцию в момент t_1 [Там же, с. 90]:

$$\psi(x_2, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} K(x_2, t_2; x_1, t_1) \psi(x_1, t_1) dx_1.$$

Амплитуда вероятности представляет собой сумму вкладов (фаз) амплитуд вероятности от каждой траектории в отдельности, а суммирование выполняется по всем траекториям, соединяющим точки a и b :

$$K(b, a) = \sum_{\substack{\text{по всем} \\ \text{возможным} \\ \text{переходам} \\ \text{из } a \text{ в } b}} \varphi$$

Фаза каждой траектории пропорциональна действию – тому же самому, что и в случае соответствующей классической системы, но выраженному в единицах кванта действия \hbar : $\varphi = \text{const} \cdot e^{iS/\hbar}$. В классическом пределе, когда величина действия много больше кванта действия ($S \gg \hbar$) или длина волны частицы существенно меньше размеров самой частицы, достаточно учитывать только одну – классическую траекторию с классическим действием, поскольку фазы всех остальных траекторий взаимно компенсируют друг друга [Там же, с. 43].

Результирующей траектории будет соответствовать максимальная вероятность. В результате интеграл по траекториям можно записать как [Там же, с. 48]:

$$K(b, a) = \int_a^b e^{iS(x)/\hbar} Dx(t), \text{ где } S(x) = \int_{t_1}^{t_2} L[x(t)] dt,$$

где D – означает суммирование по всем возможным траекториям из $a(t_1)$ в $b(t_2)$, для каждой из которых величина действия имеет свое значение; S – действие для отдельной траектории.

Свой подход Фейнман применил к квантовой электродинамике, поскольку его «интеграл по траекториям» применим к квантовому описанию как точечных частиц в обычном пространстве, так и полей в конфигурационном пространстве. Оказалось, что в релятивистском случае среди траекторий есть и траектории с участками обратного движения во времени, которые могут быть интерпретированы как траектории виртуальной античастицы во времени вперед, а точки поворота — как виртуальное рождение и уничтожение пар частица-античастица.

Для расчета вероятности состояния (траектории) электрона в электромагнитном поле, необходимо рассчитать амплитуды вероятности всех возможных состояний (траекторий) и просуммировать их фазы. Для расчета необходимо использовать действия вещества S_m , действия поля S_f , и действия взаимодействия вещества и поля S_{mf} [Там же, с. 285]. Полученное распределение вероятностей будет соответствовать действительному состоянию (траектории). Можно сказать, что чем выше вероятность состояния (траектории), тем ближе оно к наблюдаемому состоянию:

$$p \rightarrow \max, p = |K|^2, K = \int e^{i(S_m + S_{mf} + S_f)/\hbar} DqDAD\varphi \text{ или } K = \int \left\{ e^{iS_f/\hbar} \right\} TDAD\varphi,$$

где T – амплитуда вероятности движения частицы в поле; Dq – означает суммирование по всем возможным траекториям; DA и $D\varphi$ – означает суммирование по всем возможным полям.

По мнению Фейнмана, данная формула является фундаментальным принципом квантовой электродинамики, даже тогда когда амплитуду вероятности движения частицы во внешнем поле нельзя представить в виде интеграла по траекториям. В случае, когда величина действия много больше постоянной Планка, а размеры частицы существенно больше ее длины волны, максимальная вероятность и минимальное действие соответствуют действительной классической траектории:

$$p=\max, S=\min.$$

Из «интегралов по траекториям» можно получить волновое уравнение Шредингера, можно проделать и обратную операцию, что говорит об эквивалентности обоих подходов. Но в отличие от метода Шредингера новый подход интуитивно более понятен. Фейнман предлагает: «забудьте обо всех этих амплитудах вероятностей. Частица движется по особому пути – именно по тому, по которому S в первом приближении не меняется». Такова связь между принципом наименьшего действия и квантовой механикой [171, с. 119].

На основе «интегралов по траекториям» в 1949 году была разработана техника «диаграмм Фейнмана», являющаяся на сегодня самым наглядным и эффективным способом описания взаимодействия в квантовой теории поля. Именно формулировка Фейнмана стала «незаменимой частью инструментария каждого физика, использующего квантовую теорию поля» [28, с. 403]. Например, в работе В. Йорграу и С. Мандельштама [281] подробно рассмотрена связь ПНД классической механики, волновой механики, классической квантовой механики и квантовой механики в представлении Р. Фейнмана. Сегодня существуют различные мнения о методе «интегралов по траекториям», о границах его применения и о его физическом смысле [64; 226; 256; 263; 264]. Фейнман представлял формулировку квантовой механики через метод «интегралов по

траекториям», связанный с принципом наименьшего действия, как изящный математический прием. Он избегал придавать своему методу онтологический статус, считая, что изучение причин вероятностного предсказания будущего и проблемы соотношения наблюдаемого и наблюдателя есть предмет философии, и для дальнейшего развития физики в этом нет необходимости [169, с. 35].

Несмотря на осторожность Фейнмана, именно его метод представляется нам наиболее продуктивным в понимании сущности перехода многих возможных состояний в одно действительное. По словам М. Каку, сила фейнмановского «суммирования по траекториям» состоит в том, что сегодня, когда мы формулируем космологическую теорию инфляции и даже струнную теорию, мы пользуемся подходом Фейнмана, основанным на «интегралах по траекториям». Этот метод преподается сейчас во всех университетах мира, и на сегодняшний день является самым эффективным и удобным способом формулировки квантовой теории [70].

1.5 Экстремальные принципы в космологии

Космология в XXI веке – передовой край физики. Знания, накопленные в области механики, термодинамики, теории поля, теории относительности и квантовой механики, востребованы сегодня для изучения строения и эволюции Вселенной. Экстремальные принципы, в том числе ПНД, играют здесь ключевую роль. Выше уже упоминались два важнейших принципа: ПНД гравитационного поля и принцип стационарности собственного времени для свободной релятивистской частицы. Первый описывает распределение гравитационных потенциалов в пространстве-времени. Согласно второму принципу, в отсутствии полей частица путешествует по Вселенной так, что ее собственное время между событиями убытия и прибытия больше по прямой мировой линии, чем по каждой из соседних альтернативных мировых линий между этими двумя событиями.

Если существуют поля, искривляющие пространство-время, то результирующую мировую линию общая теория относительности называет геодезической. В окрестности независимой от времени структуры, типа вращающейся звезды, нейтронной звезды или черной дыры, не зависящая от времени метрика связывает собственное время вдоль отрезка мировой линии со смещением частицы в координатах пространства и времени этого отрезка. Используя метрику и принцип максимального собственного времени, мы можем исследовать большие области общей теории относительности без тензоров или уравнений поля. Тем более что для низких скоростей и слабых гравитационных эффектов принцип максимального собственного времени упрощается до нерелятивистского принципа наименьшего количества действия. Механика Ньютона, таким образом, становится частным случаем релятивистской механики [См.: 270].

В современной космологии ПНД используется для расчета движения систем, состоящих из N -космических тел [222]. Зная современное распределение массы в расширяющейся Вселенной и используя принцип наименьшего количества действия, астрономы научились рассчитывать прошлые орбиты галактик. В частности, ПНД использовали в 1991–1994 годах для расчета так называемой пекулярной скорости скопления приблизительно 1100 галактик Местной Группы. На сегодня ПНД – единственная техника, с которой можно исследовать нелинейное поведение галактик с любой точностью в отличие от приближенных расчетов по методу Я.Б. Зельдовича, основанном на измерении реликтового излучения, проходящего через изучаемые галактики [254].

Исследования Вселенной заставляют по новому взглянуть на экстремальные принципы термодинамики, в частности на ее второе начало. В 1974 году американский физик Стивен Хокинг обнаружил, что черные дыры не такие уж черные. Они все-таки излучают и у них есть энтропия, причем по расчетам она имеет огромное значение. Получается, что энтропия видимой Вселенной не увеличивается, так как ее просто отсасывают черные дыры, в том числе находящиеся в центре каждой галактики [52, с. 219]. Поскольку отрицательная энтропия ассоциируется с информацией, можно предположить, что информация в

черной дыре накапливается и может где-то сохраняться, так что черная дыра может быть окном в другие Вселенные [Там же, с. 223].

ПНД используется и в расчетах современной космологической теории струн [217]. Например, действие для свободной релятивистской бозонной струны называется действием Намбу-Гото, а его модификация – действием Полякова. Если свободные частицы движутся вдоль геодезических линий в искривленном пространстве, то струна движется в пространстве вдоль мирового листа или по мировой трубе. Для расчета траектории движения струн минимизируется естественный аналог длины пути — площадь трубы. С точки зрения квантовой механики для струн используется тот же метод Фейнмана, что и для обычных частиц. Проводится суммирование по всем мировым трубам, описывающим перемещение струны из одной конфигурации и момента времени в другие. При этом суммирование по трубам производим с весом i умноженном на действие (площадь поверхности мировой трубы). Так получается распределение квантово-механических амплитуд свободного распространения струны. Затем, как всегда в квантовой механике, рассчитываются вероятности путем возведения этих амплитуд в квадрат. Так строится квантовая механика свободных струн [См.: 54].

Экстремальные принципы имеют все шансы объяснить даже такой обычный факт, как размерность пространства. Одна из особенностей 4-мерного пространства-времени состоит в том, что именно в нем устойчивы атомы, именно такой минимальной размерности достаточно для взаимодействия полей и вещества. Возможно, любая система «пробует» действовать сразу во всех измерениях одновременно, но именно четыре измерения соответствуют минимуму какого-то параметра (возможно, этот параметр – действие). Может быть, размерность определяется максимальной вероятностью взаимодействия всех объектов Вселенной.

М. Инаба используя альтернативную геометрическую форму квантовой механики Е. Сантамато, предложил *принцип минимальной средней кривизны*, который подразумевает, что классическая теория может быть построена эквивалентно квантовой механике. Согласно гипотезе Инаба, частица движется в потенциальном поле пропорциональном скалярной кривизне Вселенной, которая

в свою очередь определяется принципом минимальной усредненной кривизны [233]. Другим вопросам применения ПНД в космологии посвящены работы К. Маршала [242], Дж. Понче [259], К. Грея и Э. Пойсона [229].

1.6 Экстремальные принципы в теории информации

В параграфе, посвященном термодинамике, упоминалось, что только благодаря статистическому или вероятностному подходу Больцману удалось описать поведение сложных систем, состоящих из большого количества относительно независимых молекул. Оказалось, что понятие энтропии, как вероятностной характеристики состояния системы, можно с успехом применять в другой, казалось бы, абстрактной и далекой от естествознания области науки – теории информации.

В определении термодинамической энтропии имеется в виду неупорядоченность только одного рода – связанная с хаотическим тепловым движением молекул. А поскольку понятие энтропии в теории информации не связывается с каким-то определенным типом неупорядоченности, то оно оказалось более широким, чем энтропия в статистической физике. Больцман отождествлял энтропию с числом комплексов или числом способов, которыми может быть достигнуто данное макроскопическое состояние термодинамической системы. Количественно он выразил энтропию в формуле: $S = k \ln N$, где k – постоянная Больцмана; N – число комплексов или возможных состояний системы. В равновесном состоянии системы: $N = \max, p_i = \max$, где p_i – вероятность состояния.

Для удобства расчетов значений возможных состояний Больцман вводит некую функцию, которая служит мерой отклонения текущих вероятностей

состояния системы от максимальной вероятности равновесного состояния:
 $\aleph = \sum p_i \ln \frac{p_i}{\bar{p}_i}$, где \bar{p}_i – распределение вероятностей равновесного состояния.

Эта функция монотонно убывает, стремясь к нулю в состоянии равновесия, и служит мерой прогрессирующего выравнивания неоднородностей в системе. Изолированная система как бы эволюционирует от «порядка» к «беспорядку» [См.: 132, с. 211]. Для замкнутой системы в состоянии равновесия:

$$\aleph = 0, p_i = \bar{p}_i = \max.$$

Как уже было отмечено, Больцман предположил, что максимальная симметрия на микроскопическом уровне отдельных молекул соответствует максимальному хаосу (минимальному порядку) на макроскопическом уровне системы или газа в целом, тогда энтропия равна нулю. Термодинамическая система самопроизвольно стремится к состоянию с максимальной вероятностью или к состоянию устойчивого равновесия, одновременно отклонение от максимальной вероятности стремится к нулю:

$$p_i \rightarrow \max, p_i \rightarrow \bar{p}_i, \aleph \rightarrow 0.$$

Иногда функцию, введенную Больцманом, связывают с отрицательной энтропией. В свое время понятие «отрицательная энтропия» употребил Э. Шредингер, который анализируя с термодинамических позиций биологические системы, пришел к выводу, что им необходимо извлекать из окружающей среды отрицательную энтропию для компенсации внутреннего производства энтропии, и тем самым тормозить свое движение в сторону термодинамического равновесия, соответствующего состоянию смерти [190]. Затем Л. Бриллюэн стал называть отрицательную энтропию для краткости «негэнтропией» и ввел этот термин в теорию информации, сформулировав принцип: «Информация представляет собой отрицательный вклад в энтропию» [24, с. 34]. В отличие от

энтропии, рассматриваемой в качестве неупорядоченности системы, негэнтропией обычно называют меру упорядоченности системы.

Понятие энтропии как меры неопределенности или непредсказуемости была введено в 1949 году американским математиком Клодом Шенноном (1916–2001) при разработке математической теории связи. Шеннон предположил, что прирост информации равен утраченной неопределённости. В основе аналогии негэнтропии и информации лежит внешнее сходство формул, их описывающих. Так называемая шенноновская или информационная энтропия H выражается формулой:

$$H = -\sum p_i \log p_i \text{ или } H = -\int p_i \log p_i dX ,$$

где X – точки фазового пространства (события или значения); p_i – число возможных исходов (вероятность) независимых случайных событий (значений) или относительная частота i -го события (значения) по сравнению с частотой остальных возможных событий (значений). Индекс i соответствует значениям, которые может принимать случайная переменная. Это могут быть скорости, координаты и т.д. Причем сумма всех вероятностей равна единице: $\sum p_i = 1$ или $\int p_i dX = 1$.

Смысл информационной энтропии можно выразить как среднюю вероятность всех i -х событий в системе. Из формулы следует, что информационная энтропия, в отличие от термодинамической, всегда положительна. Она равна нулю только тогда, когда одна из вероятностей равна единице, следовательно, остальные равны нулю и тогда всякая неопределенность отсутствует: $H = 0$, когда $p_1 = 1, p_2 = \dots = p_n = 0$. Максимум информационной энтропии отвечает равновероятным событиям: $H = \max$, когда $p_1 = p_2 = \dots = p_n$.

Оказалось, что информационную энтропию можно трактовать и как меру количества информации. Если энтропия – функция состояния системы, отражающая степень ее неопределенности, то разница между значениями

энтропии в разных состояниях характеризуется количеством информации, которая есть количество устраненной неопределенности:

Если негэнтропию I выразить как разность между информационной энтропией свободного равновесного состояния (\bar{H} с чертой) и информационной энтропией текущего состояния H , то учитывая неотрицательность негэнтропии, мы можем получить теорему Гиббса для термодинамических систем: $I = \bar{H} - H$, $I \geq 0$, $\bar{H} \geq H$. Интересно, что связь между понятиями энтропии и количеством информации напоминает соотношение между физическими понятиями потенциала и разности потенциалов.

Один из основателей синергетики Герман Хакен в 1988 году высказал утверждение о том, что «в системах, далеких от теплового равновесия, или даже в нефизических системах информация (Шеннона) играет такую же роль, как энтропия в системах, находящихся в тепловом равновесии или близких к нему, а именно является *причиной протекания процессов*» [182, с. 232]. Часть информации, которая относится к параметрам порядка и отражает коллективные свойства системы, Хакен предложил называть синергетической информацией, являющейся по своему смыслу потенциалом, переводящим систему в определенные стационарные состояния.

Если система состоит из большого числа частей со сложными связями, стационарное состояние такой системы характеризуется не только его вероятностью, но и распределением вероятностей состояний ее частей. В качестве основной характеристики «действительного состояния» системы, являющегося наиболее вероятным среди множества возможных, по мнению Г.А. Голицына и А.П. Левича, целесообразно рассматривать именно распределение вероятностей. Обычно – это в каком-то смысле «равновесное» распределение [48].

Дж. Максвелл был первым, кто показал, что состояние термодинамического равновесия газа наступает тогда, когда распределение скоростей молекул принимает форму колоколообразной или гауссовой кривой [См.: 132, с. 214]. Изолированный газ стремится к состоянию равновесия, характеризуемым таким нормальным распределением скоростей. Аналогичному закону распределения подчиняются частоты плотности энергии для излучения черного тела.

Американский физик Эдвин Джейнс (1922–1998) в 1957 году предложил метод отыскания равновесных распределений вероятности, показав фундаментальную связь между теорией информации, статистической термодинамикой и квантовой механикой. Этот метод сегодня успешно применяется не только в термодинамике, но и в таких, казалось бы далеких от нее областях, как биология, лингвистика, математика, психология, экономика и т.д. Формализм Джейнса еще называют критерием максимального правдоподобия или *принципа максимума информационной энтропии*. Основан он на обобщении принципа максимума энтропии в вероятностной форме, которая может рассматриваться как мера нашего незнания, в сочетании с методом множителей Лагранжа. В случае недостатка информации о внешних ограничениях системы, разумнее всего предположить, что распределение вероятностей в ней будет равномерным, что соответствует максимуму шенноновской энтропии [См.: 48]. Иначе говоря, если равновесное распределение вероятностей не меняется, то действительное состояние (значение его характеристики) равновесия сложной системы при наличии внешних информационных потенциалов отличается от всех возможных состояний тем, что его информационная энтропия H принимает максимальное значение из всех возможных в данных условиях:

$$H = \max, H = -\sum p_i \log p_i, \bar{p}_i = \text{const} .$$

Джейнс показал, что из принципа максимума информационной энтропии можно вывести основные теоремы термодинамики [Цит. по: 182, с. 94]. В частности, при отсутствии внешних сил наиболее правдоподобное распределение вероятностей случайной величины будет соответствовать нормальному (гауссовскому) закону распределения. Иначе говоря, действительное состояние равновесия сложной свободной системы отличается от всех возможных состояний тем, что она имеет равновесное распределение вероятностей, а ее информационная энтропия принимает максимальное значение из всех возможных:

$$H = \max, p_i = \bar{p}_i.$$

Другой частный случай относится к действительному состоянию равновесия простой свободной системы, которое отличается от всех возможных состояний тем, что его вероятность p принимает максимальное значение из всех возможных: $p = \max$.

Формализм Джейнса оказался частным случаем другого общего метода статистики – *принципа минимума различающейся информации* [См.: 48]. Понятие различающейся информации было введено в работах Реньи и Кульбака [83, с. 408] и, по сути, является обобщением функции Больцмана. Согласно этому принципу, если известно некоторое равновесное распределение вероятностей свободной системы в отсутствии внешних ограничений \bar{p} и некоторые дополнительные ограничения, наложенные на систему в виде внешних потенциалов, то действительное равновесное распределение вероятностей в системе будет минимально отличаться от априорного или действительное состояние отличается от всех возможных тем, что различающая информация минимальна:

$$K = \min, K = \sum p_i \log \frac{p_i}{\bar{p}_i} \text{ или } K = k \int p_i \log \frac{p_i}{\bar{p}_i} dX,$$

где K – информация различия; X – точки фазового пространства (события или значения); i – индекс относительной вероятности значения случайной переменной.

Принцип максимума информационной энтропии становится частным случаем принципа минимума различающейся информации при постоянном равновесном распределении вероятностей. Можно показать, что перечисленные результаты получаются путем варьирования соответствующего лагранжиана [См.: 60, с. 23–66].

В другом частном случае, когда \bar{p} – гауссово распределение вероятностей, из принципа минимума различающейся информации следует знаменитый *принцип наименьших квадратов Гаусса*. Этот принцип состоит в том, что если при

измерении некой неизвестной величины Y_i получается ряд значений y_i , то наиболее вероятным значением для Y_i можно считать такое, при котором средний квадрат его отклонения будет минимальным:

$$\sum (Y_i - y_i)^2 = \min.$$

Как известно, сам Гаусс был убежден в глубокой аналогии своего принципа наименьших квадратов со своим же принципом наименьшего принуждения. По аналогии с последним, смысл принципа минимума различающей информации можно выразить так: система стремится к стационарному состоянию, минимально отличающемуся от стационарного состояния, которое она бы заняла, если бы была свободной от влияния окружающей среды. Иначе говоря, она стремится найти оптимальный компромисс между влиянием среды и свободным стационарным состоянием.

Голицин Г.А. и Левич А.П. предлагают формулировать условие равновесия в вероятностном случае в форме, аналогичной *принципам наименьшего принуждения Гаусса* для механики и *Дьярмати* для термодинамики [48]: действительное состояние равновесия сложной системы при наличии внешних информационных потенциалов отличается от всех возможных состояний тем, что его принуждение Z минимально:

$$Z = \min, Z = \frac{1}{2} \sum p_i \left(F_i - \frac{p_i - \bar{p}_i}{p_i} \right)^2,$$

где F – внешние силы. Иначе говоря, действительное состояние системы (распределение вероятностей ее частей) находится в максимальном согласии с равновесным состоянием, какое только допускают внешние силы и связи, наложенные на вероятности.

Е.В. Луценко пошел еще дальше и сформулировал *Универсальный информационный вариационный принцип развития систем* [97]: развитие открытых систем, а также процессы взаимодействия между различными

иерархическими уровнями этих систем и между системами и окружающей средой происходит таким образом, что скорость информационных потоков между ними в пространстве и времени, стремится к максимуму, причем не только к локальному, но и к глобальному. Предположив, что движение любых объектов можно рассматривать как потоки информации разной мощности, он выводит частный случай: реально осуществляются те варианты физических процессов, для которых информационный трафик (скорость потока информации) максимален по сравнению со всеми другими вариантами.

Число попыток приложить ПНД к математике и теории информации в последние годы заметно возросло. С. Лебедев, В. Тсуи и П. Гельдер изучают приложение ПНД к рисованию [238]. К. Сибург пишет о роли ПНД в геометрии [265]. К. Ванг рассматривает связь ПНД и принципа максимальной информации [278]. Принципу максимальной информации посвящена работа О. Чунсук и Р. Фридена [212]. Р. Нумрих применяет ПНД к компьютерным вычислениям [253]. Таким образом, экстремальные принципы в вероятностной трактовке оказались в центре современной теории информации, неожиданно став своеобразным мостиком между описанием физических и биологических систем.

1.7 Экстремальные принципы в химии и биологии

Во второй половине XX века начался процесс обобщения законов термодинамики и теории информации на область сначала открытых систем, затем неорганических химических процессов (Л. Онсагер, И. Пригожин, С. Де Гроот, П. Гленсдорф, Г. Хакен), и наконец, на область эволюции биологических систем (М. Эйген и др.). Вариационные принципы в химии исследовались в работах Л.М. Мартюшева и Е.М. Сальниковой [103], А.П. Руденко [146]. Е.В. Луценко, опираясь на предложенный им универсальный информационный вариационный принцип, высказал гипотезу: «само возникновение химических элементов,

молекул различной сложности и химические реакции идут таким образом, что при этом образуются все более сложные системы, содержащие все больше информации в своей структуре, имеющие все более высокий уровень системности (эмерджентности)» [97].

Экстремальные принципы биологии все еще находятся в процессе становления и не обладают достаточно четкой и общепризнанной формулировкой. Однако очевидно, что для биологических систем типичны и принципиально важны такие процессы как стремление к состоянию равновесия, потеря устойчивости и переход к новому устойчивому равновесию. Подобные процессы наблюдаются на всех уровнях иерархии – от молекул и клеток, до популяций, биоценозов и биосферы в целом.

Согласно идее Ч. Дарвина каждый вид стремится к максимальному размножению своих членов, что в условиях ограниченности ресурсов ведет к конкуренции как внутри вида, так и с другими видами. Дарвин предполагал, что все организмы имеют врожденную и передаваемую по наследству способность к вариациям своих свойств [56, с. 105]. С другой стороны окружающая среда сама непрерывно изменяется. В результате автоматического механизма естественного отбора выживают или дают потомство только некоторые организмы и некоторые виды. Этот механизм является аргументом в пользу возникновения всех видов из общего предка. Интересно, что возражая сторонникам одновременного сотворения всех видов, Дарвин в качестве аргумента приводит философскую аксиому «наименьшего действия», высказанную Мопертюи [Там же, с. 414].

Лауреат Нобелевской премии по химии 1967 года Манфред Эйген обнаружил реальный класс химических реакций, которые ведут себя подобно дарвиновским видам, а эволюцию которых можно было бы рассматривать с точки зрения теории автоматов. Именно такими свойствами обладают нелинейные автокаталитические реакции, которые Эйген назвал гиперциклами. Возникающая в результате таких реакций система обладает интегрирующими свойствами и предоставляет своим членам возможность коэволюции (совместной эволюции), которая определяется конкурентными условиями за пределами системы. Такая система удовлетворительно описывает процесс возникновения на основе

взаимного катализа системы «белок – нуклеиновая кислота», которая является решающим шагом в процессе возникновения жизни.

Эйген обобщил термодинамический и информационный подходы к эволюции и сформулировал экстремальный *принцип отбора максимальной «селективной ценности»*: «отбор при постоянных селекционных ограничениях является процессом, при котором средняя продуктивность оптимизируется путем достижения высшей селективной ценности, имеющейся в популяции носителей информации при данных условиях среды» [Цит. по: 6, с. 157]. Согласно предлагаемому решению в процессе эволюции выживает только один гиперцикл, имеющий максимальную селективную ценность – ценность информации для продолжения циклов воспроизведения.

По мнению Эйгена современная теория информации ограничена, поскольку имеет дело с переработкой и передачей информации (это было связано с техническими задачами систем связи), а не с ее генерацией в процессе эволюции. Поэтому Эйген вводит понятие «ценности» информации, которая приобретается в процессе ее отбора. Экстремальный принцип Эйгена дает описание предбиологической и ранних стадий биологической эволюции, но недостаточен для описания высших стадий эволюции. Одновременно, он показал, что дарвиновский подход к эволюции не только не противоречит законам термодинамики, а, наоборот, вполне с ними согласуется [194, с. 197]. По мнению Эйгена эволюция биологических форм проходит по экстремальным кривым и может быть выведена из соответствующего экстремального принципа [См.: 145]. В частности степень приспособленности популяции стремится к максимуму. Японский биолог М. Кимура в 70-х годах прошлого века выдвинул в качестве общего принципа идею, что в течение любого заданного промежутка времени естественный отбор вызывает такие изменения частот генов в популяции, которые максимизируют ее приспособленность [См.: 6, с. 162].

Принцип максимума энтропии, сформулированный Дж. Гиббсом и обобщенный У. Джейнсом, впоследствии был распространен на неравновесные состояния термодинамических систем, а затем совместно с принципами теории информации стал использоваться в теории самоорганизации систем различной

степени сложности [60; 74; 132; 181; 182]. В 70-е годы XX столетия возникло новое направление в науке – синергетика (Г. Хакен) или теория диссипативных структур (И. Пригожин). Оказалось, что в нелинейной области сильно неравновесных процессов у системы появляется несколько таких устойчивых стационарных состояний или траекторий, в которых ее характеристики изменяются с постоянной скоростью. Такие стационарные состояния или траектории называются аттракторами. Каждому аттрактору соответствует экстремум (максимум или минимум) какого-либо потенциала системы. Глобальным аттрактором является состояние, в котором энтропия S_t достигает максимального значения:

$$S_t = \max.$$

Существование у системы и процесса нескольких локальных аттракторов со своими локальными экстремумами потенциалов приводит к неустойчивости системы или процесса. В совокупности с глобальным аттрактором это приводит к флуктуациям и скачкообразному изменению состояния или траектории. Какой из аттракторов выберет система, предсказать невозможно, поэтому такие состояния или процессы называются неустойчивыми, а системы – диссипативными. В подобных системах любые случайные флуктуации вместо того, чтобы затухать как в равновесных системах, могут усиливаться и завладевать всей системой, вынуждая ее эволюционировать к новому состоянию. Точка разветвления путей эволюции открытой нелинейной системы называется точкой бифуркации или порогом устойчивости. По мнению Пригожина, процессы выбора в точке бифуркации – это «случайные явления, аналогичные исходу бросания игральной кости» [132, с. 149], а стремление систем к максимальной устойчивости является движущей силой эволюции: поиск максимальной устойчивости играет роль естественного отбора [111, с. 89]. В.П. Бранский называет этот *экстремальный принцип отбора* – объективным законом для диссипативных систем, результатом такого отбора является мутация, или флуктуация, то есть реализация

(превращение возможной бифуркационной структуры в действительную) одной из бифуркационных структур [23, с. 73].

Используя аппарат теории информации применительно к биологическим системам, Г.А. Голицин и А.П. Левич сформулировали *принцип максимума биологической информации* [48]: действительное состояние динамического информационного равновесия биологического организма отличается от всех возможных состояний тем, что скорость его обмена информацией со средой или их средняя взаимная информация минимальна:

$$I(X, Y) = \min, I(X, Y) = H(X) - H(X/Y) \text{ или } I(X, Y) = \sum p(x_i, y_i) \log \frac{p(x_i / y_i)}{p(x_i)}.$$

где X – условия среды; Y – признаки или реакции системы; $I(X/Y)$ – средняя взаимная информация между условиями среды и признаками или реакциями системы; $p(x_i/y_i)$ и $p(x_i)$ – условная и безусловная вероятность; $H(X/Y)$ и $H(X)$ – условная и безусловная информационная энтропия.

Смысл принципа максимума информации в том, что по мере адаптации к среде признаки и реакции организма со все большей полнотой и точностью отражают условия среды. Организм стремится к выравниванию информации с окружающей его средой, к состоянию динамического информационного равновесия, в котором скорость обмена информации со средой будет минимальна. В указанной работе показано, что данный принцип является более общим, чем принцип минимума различающей информации, описанный в предыдущем разделе, и переходит в последний только вблизи равновесия.

Обзор большого числа экстремальных принципов, разрабатываемых в современной биологии, достаточно подробно представлен в работе П.В. Фурсовой, А.П. Левича и В.Л. Алексеева [180]. Перечислим только некоторые из них. *Принцип минимума общего осмотического давления* в клеточных реакциях (С. Шустер и Р. Гейнрих, 1991). *Принцип максимальной общей скорости биохимической реакции* (Т. Вильгельм с соавторами, 2000). *Принцип максимума жизненного репродуктивного успеха особи* – в процессе эволюции вида при

заданных внешних условиях и физиологических ограничениях оптимизируется удельная скорость роста популяции (А.Т. Терехин, 2001). *Принцип максимизации репродуктивных усилий* (Б. Зайде, 1991). *Принцип максимальной неожиданности протекания эволюции* – основан на развитии идей М. Эйгена с применением формализма Джейнса (Е.В. Евдокимов, 1999). *Принцип максимальной обобщенной энтропии* для экологии сообществ (А.П. Левич с соавторами, 1980–2000). *Принцип минимума потребления лимитирующего вещества* в описании микробиологических процессов (Н. С. Паников, 1991).

Особо следует выделить *экстремальный принцип «биологического» действия*. В экологии неоднократно предпринимались попытки использования принципа наименьшего действия в форме Гамильтона для получения логистического уравнения роста популяции. Точнее, рассматривалась обратная задача: записать выражение для действия, которое приведет к специальному уравнению роста. Одна из наиболее удачных попыток разрешить эту задачу представлена в работе Дж. Вебба [279]. В качестве функционала действия S , вариация которого равна нулю, используется выражение, в котором под $x(t)$ подразумевается уравнение эволюции популяции, а V – внешнее влияние среды на популяцию:

$$\delta S = 0, S = \int \left[\frac{1}{2} \dot{x}^2 - V(x) \right] dt.$$

По аналогии с физикой, где действие разделено на свободное движение и взаимодействие, авторы предлагают рассматривать действие как сумму члена, описывающего популяцию, которая не подвержена помехам в росте, и члена, описывающего внешнее влияние среды на популяцию. Однако подобная интерпретация хорошо описывает лишь случай $V=0$, когда применение вариационного принципа приводит к уравнению экспоненциального роста. По мнению Дж. Вебба, применение вариационного принципа позволяет сместить акцент с поведения системы на факторы, которые его определяют, а также делает

возможным разделением внутреннего поведения популяции и эффектов внешней среды.

Принцип максимального разнообразия (Д. Лурье и соавторы, 1983) предполагает, что живым системам присуще адаптивное поведение, обусловленное конкуренцией между двумя тенденциями – тенденцией к большему разнообразию, происходящей из постоянного появления ошибок в генетическом коде, и тенденцией к меньшему разнообразию из-за естественного отбора. В одном из вариантов решения вводится понятие удельного разнообразия биомассы ω , которое стремится к максимуму:

$$\omega = \max, \quad \omega = -\int p(m) \ln p(m) dm,$$

где $p(m)$ – плотность вероятности распределения биомассы.

В упоминаемой работе [180] дается обзор, получившей в последнее время широкое распространение так называемой модели динамической структуры, в основе которой лежит максимизация некой целевой функции биологической системы (С. Йоргенсен с соавторами, 1995, К. Паттен, 1995). В качестве последней разные авторы предлагают рассматривать скорость изменения общего потока энергии через систему, эмергентность, эксергию, косвенные эффекты и другие характеристики систем.

Э.В. Сергеев предлагает использовать ПНД для описания самоорганизации биотехнических систем [155]. Р.Г. Зарипов рассматривает вариационные и экстремальные принципы применительно к статистической теории самоорганизации и необратимости в неэкстенсивных системах [61]. А. Эдвардс изучает роль экстремальных принципов в эволюционной биологии [216]. В соответствии с *принципом максимального потока информации биологических систем* Е.В. Луценко [97] процесс биологической эволюции путем естественного отбора происходит таким образом, что объем сгенерированной, накопленной и переданной последующим поколениям популяции, как системы информации о выживании и продолжении рода в ряде поколений стремится к максимальному. Действие этого принципа приводит к тому, что максимизируется поток как

информации из прошлого в будущее, передаваемой биологическими системами, как генетической информации, так и информации, связанной с накоплением опыта, пока не нашедшей воплощения на генетическом уровне. На основе принципа экстремального действия, по мнению И.И. Свеницкого тождественного принципу энергетической экстремальности самоорганизации и прогрессивной эволюции, можно обосновывать закон выживания, противоположный по своей сущности второму началу термодинамики [151].

В.Н. Томалинцев [165], М.Н. Киятина, О.С. Разумовский [73] пытаются обобщить экстремальные принципы на изучение человека. В последнее время методы вариационного исчисления и решение соответствующих экстремальных задач находят широкое применение в теории оптимального управления, в приложении к объектам самой различной природы — техническим, физическим, экономическим, биологическим и социальным. Этим задачам, посвящены работы О.С. Разумовского [138], Л. Янга [202], В.Ф. Кротова [80] и других авторов [29; 40; 65].

Таким образом, применение экстремальных принципов в органической химии и биологии популяций является весьма продуктивным и перспективным. Оно позволяет не только осознанно использовать математические методы изучения, но и лучше понимать единые законы природы, управляющие как физическими, так и живыми системами.

1.8. Обобщение исторического обзора

В предыдущих параграфах было описано, как развивались ПНД и другие экстремальные принципы в различных областях науки. Поскольку все экстремальные принципы тесно связаны друг с другом, для понимания смысла любого из них целесообразно максимально подробно рассмотреть эту связь. Еще раз кратко перечислим формулировки некоторых принципов, одновременно

обобщая возможный физический смысл. Затем подведем краткие итоги обзора места и роли ПНД в развитии естествознания.

Принцип Д’Аламбера-Лагранжа. *Область применения:* механика, динамика и статика, голономные системы (связи идеальны). *Формулировка:* действительное движение механической системы отличается от всех кинематически возможных тем, что сумма элементарных работ всех приложенных активных сил и сил инерции на любом возможном перемещении системы в каждый момент времени равна нулю. *Физический смысл и связь с другими принципами:* является общим уравнением динамики, из него можно получить все теоремы и законы динамики голономных систем. Если все ускорения равны нулю, принимает вид общего принципа статики (принцип возможных перемещений). При расширении понятия возможных перемещений системы из принципа могут быть выведены все дифференциальные вариационные принципы классической механики.

Принцип Гаусса или Принцип наименьшего «принуждения». *Область применения:* механика, динамика, идеальные линейные неголономные связи второго порядка. *Формулировка:* действительное движение системы материальных точек, связанных между собой и подверженных влияниям, в каждое мгновение отличается от возможных движений тем, что величина принуждения стационарна и имеет минимум. *Физический смысл и связь с другими принципами:* система движется так, чтобы максимально сохранить свободу всех своих точек от влияния (принуждения) связей системы. Принуждение – это «геодезическая кривизна» траектории точки в 3-х мерном евклидовом пространстве. Принцип является физическим аналогом метода наименьших квадратов Гаусса теории ошибок, эквивалентен принципу Д’Аламбера–Лагранжа при расширении понятия возможных перемещений для случая наложения линейных неголономных связей второго порядка. Имеет геометрический аналог – принцип Герца.

Принцип Герца или принцип прямейшего пути и наименьшей кривизны. *Область применения:* механика, динамика, геометрия. *Формулировка:* всякая свободная система пребывает в состоянии покоя или равномерного

движения вдоль прямейшего пути. Действительная траектория системы отличается от всех возможных, совместимых со связями траекторий тем, что ее кривизна имеет локальный минимум. *Физический смысл и связь с другими принципами:* точка при движении стремится уменьшить кривизну своей траектории до минимального значения, допускаемого связями. Критерием кривизны является скорость изменения направления движения при изменении положения системы. Из принципа в качестве частных случаев выводятся принципы Мопертюи-Лагранжа, Гамильтона-Остроградского и Якоби. Принцип эквивалентен принципу Гаусса для систем со стационарными связями и не подверженных действию активных сил, а также принципу Ферма и принципу максимального собственного времени.

Принцип Ферма. *Область применения:* геометрическая оптика. *Формулировка:* действительная траектория распространения света (электромагнитной волны) между любыми двумя точками отличается от всех возможных тем, что оптический путь и время распространения имеют стационарное и минимальное значение. *Физический смысл и связь с другими принципами:* имеет механический аналог – принципы Мопертюи-Лагранжа, Гамильтона, Якоби и Герца, а также принцип максимального собственного времени. Выводится из метода «интегралов по траекториям» квантовой механики.

Принцип Мопертюи-Лагранжа. *Область применения:* механика, консервативные (энергия сохраняется) и голономные системы (геометрические связи). *Формулировка:* действительное перемещение (траектория) системы из одной точки пространства в другую отличается от всех возможных перемещений (траекторий) тем, что действие по Мопертюи является стационарным и имеет локальный минимум. *Физический смысл и связь с другими принципами:* используется для нахождения реального времени пути системы, когда известны начальное и конечное положение системы и энергия сохраняется. Может быть получен из принципа Герца для свободной точки.

Принцип Гамильтона-Остроградского. *Область применения:* механика, голономные системы. *Формулировка:* действительное перемещение (траектория) системы из одного состояния в другое за один и тот же промежуток времени

отличается от всех возможных перемещений (траекторий) тем, что действие по Гамильтону является стационарным и имеет локальный минимум. *Физический смысл и связь с другими принципами:* используется для нахождения реального пути системы, когда зафиксированы начальное и конечное события. Из принципа выводятся дифференциальные уравнения Эйлера-Лагранжа движения системы. Может быть получен из принципа Герца для свободной точки.

Принцип Якоби. *Область применения:* механика, геометрия, консервативные (энергия сохраняется) и голономные системы (геометрические связи). *Формулировка:* действительное перемещение (траектория) системы из одной точки пространства в другую под действием сил стационарного потенциального поля отличается от всех возможных виртуальных перемещений (траекторий) тем, что действие по Якоби является стационарным и локально наименьшим. *Физический смысл и связь с другими принципами:* действительная траектория частицы в отсутствии активных сил является геодезической (кратчайшей), что является обобщением закона инерции Галилея для n-мерного искривленного риманова пространства. Для случая одной материальной точки в евклидовом 3-мерном пространстве, является механическим аналогом принципа Ферма в оптике. Может быть получен из принципа Герца для свободной точки.

Второе начало термодинамики Больцмана. *Область применения:* термодинамика, изолированные системы. *Формулировка:* действительный процесс отличается от всех возможных тем, что термодинамическая вероятность возможных состояний системы возрастает, а отклонение от ее равновесного состояния, вероятность которого максимальна, стремится к нулю. В состоянии равновесия энтропия изолированной системы и вероятность ее состояния достигают максимума. *Физический смысл и связь с другими принципами:* система стремится к состоянию с максимальной вероятностью и минимальной степенью упорядоченности. Выводится из теорем Гиббса.

Теоремы Гиббса. *Область применения:* термодинамика равновесная, замкнутые и открытые системы. *Формулировка:* необходимое и достаточное условие равновесия любой замкнутой системы: действительное состояние равновесия отличается от всех возможных тем, что при постоянной энергии,

энтропия достигает максимального значения, а при постоянной энтропии, энергия достигает минимального значения. *Физический смысл и связь с другими принципами:* аналогичные теоремы формулируются для открытых систем с использованием свободной энергии, энтальпии и энергии Гиббса. В состоянии равновесия системы некоторые термодинамические потенциалы всегда достигают минимума или максимума при постоянстве других. Теоремы имеют аналоги в механике – принцип возможных перемещений и принцип Д'Аламбера.

Принцип наименьшего производства энтропии Пригожина. *Область применения:* термодинамика, слабо неравновесные (линейные) процессы в открытых и закрытых системах. *Формулировка:* действительный процесс в открытой системе отличается от всех возможных тем, что производство энтропии в системе в единицу времени достигает минимального значения, совместимого с внешними условиями. Действительный процесс в замкнутой системе отличается от всех возможных тем, что для него производство энтропии в системе в единицу времени минимально. *Физический смысл и связь с другими принципами:* перенос энтропии в окружающую среду настолько мал, насколько это позволяют наложенные на систему граничные условия. Иначе говоря, активность открытой системы непрерывно увеличивает энтропию окружающей среды, при этом вся произведенная в системе энтропия уходит на это увеличение. Является частным случаем принципа Дьярмати.

Универсальный принцип Дьярмати. *Область применения:* термодинамика, слабо неравновесные (линейные) процессы в открытых и закрытых системах. *Формулировка:* действительный процесс в открытой системе отличается от всех возможных тем, что обобщенная функция Онсагера-Махлупа достигает стационарного значения и имеет максимум, совместимый с внешними условиями данной системы. *Физический смысл и связь с другими принципами:* функция Онсагера-Махлупа по смыслу есть термодинамическая объемная плотность, равная разности производства энтропии (кинетический член характеризует внутреннюю активность системы) и суммы потенциалов рассеяния (потенциальный член, характеризующий связи системы). Эволюция системы всегда одновременно направлена на уменьшение рассеивания энергии,

уменьшение производства энтропии и увеличение остатка энтропии после рассеяния энергии. Принцип эквивалентен полной системе уравнений переноса для необратимых линейных и нелинейных термодинамических процессов. Обобщает принцип наименьшего рассеяния энергии Онсагера и принцип минимального производства энтропии Пригожина. Из принципа можно вывести уравнение Фурье для теплопроводности и уравнение Навье-Стокса для вязких течений.

Принцип синергетики. *Область применения:* термодинамика, сильно неравновесные процессы в открытых системах. *Формулировка:* действительный процесс отличается от всех возможных тем, что вероятность состояния системы возрастает вплоть до максимального, а распределение вероятностей частей системы стремится к равновесному распределению. Система стремится к равновесным состояниям, а процесс стремится к стационарным траекториям с максимальной вероятностью – к аттракторам. Каждому аттрактору соответствует экстремум (максимум или минимум) какого-либо потенциала системы. Глобальным аттрактором является состояние, в котором энтропия системы достигает максимума. *Физический смысл и связь с другими принципами:* существование у системы и процесса нескольких локальных аттракторов со своими локальными экстремумами потенциалов приводит к неустойчивости системы или процесса. В совокупности с глобальным аттрактором это приводит к флуктуациям и скачкообразному изменению (бифуркации) состояния или траектории. В каждый момент времени система стремится к одному из устойчивых стационарных состояний или траекторий (аттракторов). Обобщает другие экстремальные принципы равновесной и неравновесной термодинамики и теории информации.

Принцип максимального собственного времени. *Область применения:* общая теория относительности для релятивистской частицы. *Формулировка:* действительная траектория свободной частицы из одного состояния в другое за один и тот же промежуток времени отличается от всех возможных траекторий тем, что ее действие стационарно и имеет локальный минимум. В случае пренебрежения релятивистским изменением массы частицы, величина ее

собственного времени имеет стационарное и максимальное значение. *Физический смысл и связь с другими принципами:* свободная частица движется вдоль геодезической мировой линии. Имеет механические аналоги – принципы Герца и Гаусса, волновой аналог – принцип Ферма.

Принцип наименьшего действия электромагнитного поля. *Область применения:* электростатика, электродинамика, скорости много меньше скорости света. *Формулировка:* действительное свободное электромагнитное поле отличается от всех возможных тем, что его действие стационарно и имеет минимум. Действительная траектория заряженной частицы в электромагнитном поле из одного состояния в другое за один и тот же промежуток времени отличается от всех возможных траекторий тем, что сумма действий ее, поля и их взаимодействия стационарна и имеет минимум. *Физический смысл и связь с другими принципами:* из принципа можно вывести дифференциальные уравнения электростатического поля Пуассона и уравнения Максвелла. Аналогичен принципу Гамильтона. Принцип минимума энергии свободного поля аналогичен теореме Лагранжа-Дерихле.

Принцип наименьшего действия для гравитационного поля. *Область применения:* общая теория относительности для гравитационного поля. *Формулировка:* действительное гравитационное поле отличается от всех возможных тем, что сумма его действия и действия материи (массивных частиц и негравитационных полей) стационарна и имеет минимум. *Физический смысл и связь с другими принципами:* из принципа выводятся уравнения Эйнштейна для гравитационного поля, принцип связан с принципом наименьшего действия электромагнитного поля.

Принцип наименьшего действия для квантового поля. *Область применения:* взаимодействие электронов, фотонов и квантовых полей. *Формулировка:* действительная траектория электронно-позитронной пары в электромагнитном или другом поле из одного состояния в другое отличается от всех возможных траекторий тем, что сумма действий ее, поля и их взаимодействия стационарна и имеет минимум. *Физический смысл и связь с*

другими принципами: связан с принципом наименьшего действия электромагнитного поля и методом «интегралов по траекториям».

Метод «интегралов по траекториям». *Область применения:* квантовая электродинамика, для точечных частиц в обычном пространстве и для полей в конфигурационном пространстве. *Формулировка:* для расчета вероятности траектории частицы в электромагнитном поле необходимо рассчитать амплитуды вероятности всех ее возможных траекторий и просуммировать их фазы. Полученное распределение вероятностей будет соответствовать действительной траектории, которая обладает максимальной вероятностью. *Физический смысл и связь с другими принципами:* фаза каждой виртуальной траектории пропорциональна классическому действию для этой траектории. Эквивалентен волновому уравнению Шредингера, является обоснованием «диаграмм Фейнмана» и теории возмущений в квантовой теории поля. Является обоснованием принципа Ферма. В классическом пределе эквивалентен принципам Гамильтона и Якоби. Фаза амплитуды вероятности – эквивалент классического действия.

Принципа минимума информации различия Кульбака. *Область применения:* теория информации. *Формулировка:* действительное состояние равновесия сложной системы при наличии внешних информационных потенциалов отличается от всех возможных состояний тем, что его различающаяся информация минимальна. *Физический смысл и связь с другими принципами:* система стремится к равновесному состоянию, минимально отличающемуся от равновесного состояния, которое она бы заняла, будучи свободной от внешней среды. Является обобщением функции Больцмана для термодинамических систем. Имеет аналог в механике – теорема Лагранжа-Дерихле. Связан с принципом синергетики.

Принцип максимума информационной энтропии. *Область применения:* теория информации, распределение вероятностей равновесного состояния постоянно. *Формулировка:* действительное состояние (значение какой-либо характеристики) равновесия сложной системы при наличии внешних информационных потенциалов отличается от всех возможных состояний тем, что

его информационная энтропия принимает максимальное значение в данных условиях. Действительное состояние равновесия сложной свободной системы отличается от всех возможных состояний тем, что имеет равновесное распределение вероятностей, нулевую информацию различия, а информационная энтропия принимает максимальное значение. *Физический смысл и связь с другими принципами:* является частным случаем принципа минимума информации различия Кульбака и обобщением теорем Гиббса.

Принцип максимума биологической информации. *Область применения:* теория развития биологических систем. *Формулировка:* действительное состояние динамического информационного равновесия биологического организма отличается от всех возможных состояний тем, что скорость его обмена информацией со средой или их средняя взаимная информация принимает минимальное в данных условиях значение. *Физический смысл и связь с другими принципами:* организм стремится к максимальному выравниванию информации с окружающей его средой. Принцип является более общим, чем принцип минимума информации различия и переходит в последний только вблизи равновесия.

В дальнейшем мы будем рассматривать не все перечисленные принципы, а только вариационные принципы, так или иначе связанные с принципом наименьшего действия – математически, через оптико-механическую аналогию, через использование понятия действие или другого функционала, имеющего размерность действия. Для краткости такие принципы мы будем называть частными формами принципа наименьшего действия или просто принцип наименьшего действия (ПНД). Подведем краткие итоги исторического обзора места и роли частных форм ПНД в развитии естествознания, учитывая их связь с другими экстремальными принципами.

1) Почти все частные формы ПНД можно свести к форме типа: действительное состояние, процесс или движение системы отличаются от всех возможных при данных граничных условиях тем, что некий функционал, характеризующий систему в целом, стационарен и принимает экстремальное значение. Или так: любая система ведёт себя таким образом, чтобы некоторая величина принимала минимальное (максимальное) значение из всех возможных

при данных условиях. Или так: система достигает каждого своего нового состояния способом, имеющим максимальную вероятность, то есть кратчайшим путем, за минимальное время.

2) Частные формы ПНД описывают состояние равновесия, к которому стремятся все состояния, возможные в данных условиях. Или, они описывают стационарный процесс (траекторию) в n -мерном конфигурационном пространстве, к которому стремятся все процессы (траектории), возможные в данных условиях. Стационарность означает, что скорость или ускорение изменения функционала, характеризующего систему или процесс в целом – постоянны. Частным случаем стационарного процесса является равновесный процесс, при котором скорость изменения функционала равна нулю. Частный случай равновесного процесса – равновесное состояние, когда не только скорость изменения функционала, но и скорости изменения всех характеристик системы равны нулю. Таким образом, в общем случае ПНД описывает стационарные процессы. Особенно наглядно это видно в ПНД для частиц, движущихся в поле.

3) Каждая частная форма ПНД имеет простую математическую форму записи, из которой выводятся основные уравнения движения систем в соответствующей области естествознания. Для этого используется аппарат вариационного исчисления.

4) Величина действия, входящая во все частные формы ПНД, имеет размерность «энергия \times время» и является инвариантом относительно преобразований пространства-времени.

5) ПНД подходит для описания на языке геометрии движений любых реальных или виртуальных объектов в фазовых пространствах любых топологий и размерностей.

6) ПНД – один из немногих физических принципов, переводящих на язык математики фундаментальные философские категории – «потенциальная возможность» и «действительность».

7) ПНД объединяет описание реальных физических процессов как через действующие, так и через конечные или целевые причины.

8) ПНД и другие экстремальные принципы в равной степени подходят для описания движения и изменения систем как в терминах динамической, так и в терминах вероятностной причинности, поскольку не противоречит ни той, ни другой.

9) ПНД и другие экстремальные принципы описывают устойчивые состояния, а также устойчивые линейные и нелинейные процессы в природных системах различной сложности, как замкнутых, так и открытых.

10) ПНД и другие экстремальные принципы находятся в основании не только физики, но и претендуют на заметное место в теории информации и в биологии.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к применению ПНД в различных областях естествознания. Общим проблемам использования экстремальных принципов для макроскопических систем посвящен обширный сборник [276]. В.М. Филиппов построил вариационные принципы для необратимых процессов (например, горения и теплопроводности), а также разработал теорию построения экстремальных вариационных принципов для широкого класса дифференциальных уравнений с непотенциальными операторами. В работе [173] приводится библиография работ, посвященных вариационным задачам в физике и математике. Е.В. Луценко сформулировал универсальный информационный вариационный принцип развития систем [97]. М.В. Горбатенко пишет о роли ПНД в общей теории относительности [49]. Х. Каструп рассматривает приложения формализма Гамильтона-Якоби к теории поля [235]. Работа А.П. Маркеева посвящена принципу наименьшего принуждения [102]. В.В. Козлов распространяет классический принцип Гаусса на системы без связей с анизотропными силами вязкого трения [76; 77]. Теме соотношения механики Ньютона и ПНД посвящены работы Н.И. Евсеевича [59] и Г.Я. Зверева [63]. Т. Мур исследует связь наибольшего и наименьшего действия [247]. Д. Лютцен возвращается к анализу принципа Герца [241]. Интересный исторический обзор применения ПНД дают Д. Огборн, Д. Ханк и Э. Тэйлор [255]. К. Грей и Э. Тэйлор рассматривают случаи, когда действие в ПНД принимает значения, отличные от минимальных [230].

Несмотря на повышенный интерес в конкретных науках и множество своих достоинств, ПНД так и не стал универсальным научным принципом в полном смысле слова. Причина в том, что до сих пор остается нерешен целый ряд проблем, связанных с этим принципом. Обзору и анализу части из них посвящена следующая глава.

2 Методологические и философские проблемы ПНД

Как показал исторический обзор, экстремальные принципы используются в большинстве областей науки. Однако до сих пор неясно, на каком основании мы можем так широко их использовать и доверять получаемым результатам. На протяжении двух с половиной столетий использование частных форм ПНД было основано лишь на универсальном научном методе – аналогии. В разное время это были оптико-механическая, математическая, геометрическая, и, наконец, вероятностная аналогия. Однако любая аналогия должна иметь какое-то основание.

Для обобщения множества методологических и философских проблем, связанных с ПНД, объединим их в три основные группы. Первая группа относится к удивительному разнообразию форм ПНД из разных областей естествознания. Вторая группа проблем касается места ПНД в общей системе законов природы и взглядов на методологическую и философскую сущность этого принципа. Третья группа объединяет вопросы совмещения в ПНД двух типов описания объектов – через действующие и через целевые причины, а также трактовки ПНД с точки зрения однозначной и вероятностной причинности. Каждой группе проблем будет посвящена отдельная часть этой главы.

2.1 Проблема разнообразия формулировок ПНД

Перечислим основные проблемы, связанные с разнообразием формулировок ПНД в разных разделах естествознания, затем проследим, как решались некоторые из этих проблем.

- 1) Существует ли какой-то физический и философский смысл в понятиях «действие» и «лагранжиан», употребляемых в разных формах ПНД?
- 2) Что означает размерность «действия» – энергия, умноженная на время?
- 3) В чем смысл минимального «кванта действия» Планка?
- 4) Почему лагранжиан во многих формах ПНД равен разности двух форм энергии?
- 5) Почему «действие» в стационарных состояниях системы всегда стремится к экстремальным значениям?
- 6) Почему в одних случаях «действие» стремится к минимуму, в других – к максимуму, а в третьих оно только стационарно?
- 7) Существует ли связь различных форм ПНД друг с другом? Каковы границы применимости разных принципов и чем они обусловлены?
- 8) Можно ли обобщить формы ПНД из разных областей естествознания и привести их к универсальной форме?

Подробнее остановимся на последних двух проблемах, для этого проследим, какими аргументами пользовались ученые, используя ПНД для изучения различного типа явлений. Развитие взглядов ученых на ПНД прошло через несколько этапов. Вначале аналогии, связанные с ПНД, опирались на метафизический принцип мировой экономии, основанной на Божественной мудрости (П. Мопертюи, Л. Эйлер). Затем за основу был взят математический формализм, не привязанный к каким-либо религиозным или философским доктринам (Ж. Лагранж, У. Гамильтон, К. Якоби, Г. Герц). В конце XIX и начале XX веков некоторые ученые вновь стали искать причину аналогий в универсальном физическом смысле понятия «действие» (Г. Гельмгольц, М. Планк, Л. Де Бройль). Но поиски этого смысла длились недолго. В течение XX века вновь возобладало мнение о ПНД как об удобном формализме. Новая волна интереса к поиску смысла ПНД сегодня связана с понятием информации.

У. Гамильтон посчитал возможным использовать принцип аналогии для объединения принципа Ферма из оптики с формулировками ПНД Эйлера и Лагранжа. Будучи уверенным в полной аналогии оптических и механических явлений, он распространил этот принцип на всю динамику. Однако Гамильтон

сомневался во всеобщем характере принципа, поскольку действие в нем может стремиться как к минимуму, так и к максимуму. Несмотря на свою веру в высшие принципы простоты и целесообразности природы, Гамильтон сделал философский вывод, до сих пор определяющий научную оценку всех экстремальных принципов: «Хотя закон наименьшего действия стал, таким образом, в ряд с высочайшими теоремами физики, тем не менее, его претензии на космологическую необходимость на основании экономии во вселенной теперь обычно отвергаются. Среди других причин это вытекает из того, что величина, которая претендует на то, чтобы быть сэкономленной, в действительности часто расточительно расходуется» [Цит. по: 6, с. 38].

К. Якоби и М.В. Остроградский рассматривали свои варианты ПНД только как математически удобную форму дифференциальных уравнений движения, не придавая им ни физического, ни философского смысла. Г. Герц рассматривал принцип наименьшего принуждения К. Гаусса как удобный математический способ описать поведение любых динамических объектов во всеобщем геометрическом пространстве. При этом сам Гаусс очень дорожил своим принципом, считая его полной механической аналогией своего «метода наименьших квадратов». Герц разработал свой принцип кратчайшего пути, сводя задачи механики к проблеме геодезических линий, что нашло свое неожиданное продолжение в общей теории относительности.

На рубеже XIX и XX веков начался новый этап попыток обобщения ПНД. Сначала Г. Гельмгольц, уверенный во всеобщей значимости этого принципа не только в механике, но и в термодинамике, а также в электродинамике, предлагает всеобщую форму для ПНД для любых систем. Он считал, что всеобщая значимость принципа наименьшего действия настолько не подлежит сомнению, что он может претендовать на большую роль в качестве эвристического принципа и путеводной нити в исканиях формулировок для законов новых классов явлений [45, с. 434]. Используя эту аналогию, сразу несколько ученых находят для электромагнитного поля формулу, аналогичную принципу наименьшего действия Гамильтона. А. Пуанкаре и А. Эйнштейн из принципа Гамильтона получают уравнения Максвелла и уравнения теории относительности.

М. Планк, абсолютно уверенный во всеобщем характере ПНД, предполагает, что величина действия имеет дискретное значение. Опираясь на идею Планка, Н. Бор создает модель атома, Эйнштейн объясняет фотоэлектрический эффект. Л. Де Бройль, опираясь на работы Гамильтона по оптико-механической аналогии и идентичность ПНД и принципа Ферма, объединяет понятия волн и квантов, тем самым объединяя поле и вещество через понятие фазовой волны. Э. Шредингер обобщает трактовку оптических явлений Гюйгенса и принцип Гамильтона, получая волновое уравнение квантовой механики.

Л. Больцман формулирует второе начало термодинамики в форме экстремального принципа, но вместо механической аналогии использует статистический подход и понятие вероятности. Этот же подход он предлагает распространить на принципы развития всего живого на Земле, в том числе и на закон естественного отбора Ч. Дарвина. Продолжил работу Больцмана И. Пригожин, сформулировав теорему о минимуме производства энтропии. Однако Пригожин не считал экстремальные принципы достаточно универсальными [111, с. 276]. В подтверждение своего мнения он приводит несколько философских аргументов, правда не раскрывая их. По его мнению, экстремальная трактовка законов ограничена поскольку: а) причины принимаются за следствия; б) не учитываются возможные радикальные преобразования, подменяющие проблему и ее решение; в) инерциальные связи могут привести систему к гибели; г) природа вообще-то не может быть всемогущим калькулятором; д) в природе нет упорядоченной истории и неукоснительного прогресса, возможны неожиданные события [132, с. 185]. Одновременно Пригожин абсолютизирует новый экстремальный принцип синергетики в диссипативных системах: «поиск устойчивости играет роль естественного отбора» [Там же, с. 89]. Бранский В.П. называет этот экстремальный принцип объективным законом для диссипативных систем, а результатом такого отбора является мутация, или флуктуация [23, с. 73]. И. Дьярмати сформулировал вариационный принцип, объединяющий неравновесную термодинамику, гидродинамику и электродинамику, и описывающий эти области на языке теории поля. Он же распространил принцип

наименьшего принуждения Гаусса на термодинамику, при этом, не делая никаких философских обобщений.

С середины XX века основной термодинамический потенциал – энтропия приходит в теорию информации. Вводятся понятия информационной энтропии (К. Шеннон) и синергетической информации (Г. Хакен). Э. Джейнс показал фундаментальную связь между теорией информации, статистической термодинамикой и квантовой механикой. Его метод сегодня успешно применяется в термодинамике, биологии, лингвистике, математике, психологии, экономике, социологии.

Д. Лармор, К. Шварцшильд, Г. Лоренц с помощью функции Лагранжа свели электродинамику Максвелла и электронную теорию к единым динамическим принципам. А. Пуанкаре используя принцип Гамильтона, предложил способ объединения теории Максвелла и общей теории относительности. Л. де Бройль и Э. Шредингер были уверены, что принцип Гамильтона можно рассматривать как принцип Ферма для распространения волн в конфигурационном пространстве. М. Планк считал, что ПНД занял первое место среди физических законов не только в квантовой теории, но и в теории относительности Эйнштейна, и причина этого в основном заключается в том, что величина действия Гамильтона является инвариантом относительно преобразований Лоренца. По мнению Шредингера, именно при волновом способе рассмотрения принцип Гамильтона раскрывает свое истинное простое значение [Цит. по: 6, с. 92].

Р. Фейнман предложил новую формулировку квантовой механики, основанную на принципе наименьшего действия. Опираясь на свой метод «интегралов по траекториям», он делает вывод о первичности законов квантовой механики относительно законов классической механики и теории относительности. По его мнению, фундаментальные физические законы могут быть выражены в виде принципа наименьшего действия [171, с. 108]. И даже связь между законами симметрии и законами сохранения объясняется законами квантовой механики, выраженными через принцип наименьшего действия [168, с. 93]. Закон сохранения энергии, так же как и другие законы сохранения могут быть получены из действия и вариационных принципов [См.: 210; 225]. Конец XX и

начало XXI веков характеризуется распространением экстремальных принципов теории поля в космологических теориях, в том числе в теории струн.

Экстремальные принципы из теории информации и термодинамики постепенно распространяются на биологические системы. Вводится новый потенциал для биологических систем – ценность информации (М. Эйген). Вариационные и экстремальные принципы применяются к теории самоорганизации сложных систем (Р.Г. Зарипов, Г.А. Голицин и А.П. Левич). Формулируется универсальный информационный вариационный принцип развития систем (Е.В. Луценко), из которого различные варианты ПНД выводятся как частные случаи. Механизм, по которому реализуется выбор экстремального пути, заимствуется из метода «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана для квантовой механики, поскольку квантовое движение имеет общий характер для всех форм движения, изучаемых различными науками.

Проблемам связи формулировок ПНД из различных областей науки посвящено достаточное число работ [210; 215; 224; 241; 251; 260; 271; 274; 281]. К. Грей, Дж. Карл и В.А. Новиков рассматривают связь классического ПНД с квантовой механикой [227; 228]. Дж. Ханк, С. Тулейя и М. Ханкова описывают способ вывода уравнений механики Ньютона из ПНД [232]. Н.Н. Горобей пишет о связи ПНД и теории Ньютона [51]. Э. Тэйлор пишет о связи квантовой механики и ядерной физики [269]. Другая работа Ханка и Тэйлора посвящена связи принципа сохранения энергии и ПНД [231]. Р. Нивен и Б. Андресен прослеживают связь экстремальных принципов применительно к энтропии и геометрии пространства [252]. Дж. Ставек, М. Ипек и Дж. Эстак рассматривают роль ПНД в самоорганизующихся химических реакциях [266]. Связи ПНД и энтропии посвящена работа К. Ванга [277].

Таким образом, специалисты большинства областей науки с успехом используют различные формулировки ПНД, при этом они, как и два столетия назад, особо не заботятся о причинах эффективности не только самого ПНД, но и вообще экстремальных принципов. Анализируя только внешний вид частных ПНД, можно сформулировать лишь формальные признаки их единства. Во-первых, это общие понятия: «действие» и «лагранжиан», имеющие общую

размерность. Во-вторых, все формулировки ПНД строятся по общему принципу: действительное состояние, процесс или движения системы отличаются от всех возможных при данных граничных условиях тем, что некий функционал, характеризующий систему в целом, стационарен и принимает экстремальное значение.

Все формы ПНД можно привести к единой математической записи и применить к ней методы вариационного исчисления. Функционал действия S , определяется как интеграл от некоего выражения L или по времени t , или по пути s , или по объему V , или по 4-мерному пространству-времени Ω . Подынтегральное выражение L является функцией состояния системы:

$$\delta S = 0, S = \min (\max), \text{ где } S = \int_{t_1}^{t_2} L dt, S = \int_A^B L ds, S = \int_V L dV, S = \int_{\Omega} L d\Omega.$$

До сих пор рассуждения об общем основании частных ПНД опирались лишь на интуитивные догадки и метод аналогий. Для подтверждения любых обобщений, а также для обоснования справедливости использования аналогии в соответствии с гипотетико-дедуктивным методом следует сформулировать гипотезу о месте ПНД в общей системе законов природы. В идеале такая гипотеза должна обладать тем свойством, что все частные ПНД можно будет вывести из нее в качестве частных случаев. В следующем разделе мы проанализируем несколько таких гипотез.

2.2 Проблема места ПНД в системе физических законов

Вторая группа проблем, связанных с принципом наименьшего действия, касается его места в общей системе законов природы. Сформулируем эти проблемы и исследуем различные подходы к их решению.

1) Каково положение ПНД в системе законов природы? Из каких законов он следует, а какие следуют из него? Какова его связь с принципами симметрии и законами сохранения.

2) Почему ПНД успешно работает в таких, казалось бы, далеких областях науки как классическая и квантовая механика, термодинамика, электродинамика, общая теория относительности и т. д.? Почему значительная часть физических, и не только задач может быть рассмотрена как экстремальные математические задачи.

3) Как понятие «действие» связано с другими основными категориями науки: энергия, пространство, время, информация, вероятность, энтропия и т. д.?

4) Как ПНД связан с принципами простоты и экономии природы, с экономией мышления, с оптимизацией и управлением процессами?

5) Как ПНД связан с космологическими принципами эволюции Вселенной? Как он связан с законами эволюции живых систем?

6) Если не рассматривать ПНД как телеологический принцип, отражающий Высшую или Божественную цель, то каков его философский (онтологический) и методологический (гносеологический) статус?

Тот или иной вариант ответа на вопрос о месте ПНД в научном знании давал каждый ученый, соприкасавшийся с этим принципом. Г. Лейбниц, первым предложивший понятие «действие», считал, что законы природы, выраженные в математической форме, отражают совершенство Бога, который наиболее экономичным образом распорядился местом, пространством и временем и при помощи простейших средств произвел наибольшие действия [92, с. 404]. Создатели ПНД П. Мопертюи и Л. Эйлер видели в нем Божественную цель природы – экономить действие. Они были уверены, что ПНД является всеобщим законом, в котором скрыты основы всей метафизики. Поскольку отсылка к всемогуществу Бога ничего не объясняет, и может трактоваться достаточно произвольно, подобное «объяснение» очень быстро было признано ненаучным. Позже Бога стали заменять природой и вместо принципа экономии Бога в ранг всеобщего возвели принцип экономии природы.

Ж. Д'Аламбер и Ж. Лагранж видели в принципе наименьшего действия простой и общий вывод из законов механики. Д'Аламбер писал: «Вообще все теоремы о действии, определенном как угодно... суть не больше, как более или менее общие математические теоремы, а не философские принципы» [55, с. 115].

Г. Гельмгольц писал: «Всеобщая значимость принципа наименьшего действия настолько не подлежит сомнению, что он может претендовать на большую роль в качестве эвристического принципа и путеводной нити в исканиях формулировок для законов новых классов явлений. У этого принципа имеется преимущество, которое заключается в возможности объединить в узких рамках одной формулы все условия, влияющие на изучаемый класс явлений, и таким образом окинуть взглядом все существенное в них» [45, с. 434].

М. Планк считал экстремальный принцип наименьшего действия «высшим физическим законом», венцом всей системы законов [123, с. 85]. Впоследствии он пошел еще дальше, сказав, что экстремальный принцип наименьшего действия создает «впечатление того, что природа управляется разумной, осознавшей цель волей» [257]. М. Планк и Д. Гильберт рассматривали теорию относительности как частный случай ПНД, понимая при этом, что без физической интерпретации этот принцип представляет собой только пустую форму. Несмотря на это их ученики, логические эмпиристы М. Шлик, Х. Хан и Ф. Франк игнорировали ПНД, а аксиоматический метод Гильберта рассматривали как суд над метафизическим реализмом Планка, хотя сам Гильберт принял ПНД как ключевое понятие в свою аксиоматизацию физических теорий [См.: 267].

По мнению Р. Фейнмана большая часть принципов минимума физики в той или иной форме вытекает из принципа наименьшего действия механики и электродинамики, но существует класс принципов, откуда не вытекающих [171, с. 119–120]. Фейнман указывал на то, что фундаментальная взаимосвязь между законами симметрии и законами сохранения вытекает как раз из того, что законы подчиняются принципу минимума действия [168, с. 93]. Одним из таких частных случаев является закон сохранения энергии.

К сожалению, большая часть научной литературы по рассматриваемой теме принадлежит зарубежным авторам. Если говорить о философской литературе,

здесь картина обратная. обстоятельному изучению экстремальных принципов и ПНД с точки зрения их методологического и философского значения посвящены работы именно отечественных авторов. Кратко изложим некоторые их выводы.

В работе, посвященной соотношению динамической и вероятностной причинности, Г.Я. Мякишев отметил общность ПНД и новой трактовки квантовой механики, предложенной Р. Фейнманом на основе метода «интегралов по траекториям». По мнению Мякишева, Фейнман перекинул мост от квантовых принципов к классическому принципу наименьшего действия в форме Гамильтона, и именно в изложении Фейнмана квантовая механика предстает как непосредственное обобщение классической механики, тем самым устраняется пропасть между физическим содержанием основных принципов классической и квантовой механики [109, с. 157].

Серьезный философский анализ экстремальных принципов в науке начался с фундаментальных работ Л.С. Полака [124; 125; 127]. Впервые он собрал и обобщил большинство работ с середины XVIII до середины XX веков, так или иначе связанных с применением экстремальных или вариационных принципов в физике. Полак делает ряд важных выводов.

а) Вариационные принципы заключают в себе синтез континуального и дискретного аспектов движения и являются выражением обобщенного принципа причинности в физике [125, с. 879].

б) Формула закона сохранения энергии может быть выведена из принципа Гамильтона, обратное же без дополнительных предположений невозможно. Поэтому в принципе Гамильтона мы имеем более общую формулировку реальных соотношений, чем в законе сохранения энергии [Там же, с. 871].

в) В основе применения и физического смысла вариационных принципов механики лежат две теоремы: теорема независимости Гильберта и теорема Эмми Нетер. Первая дает математическое обоснование вариационных принципов, вторая раскрывает их физический смысл, связывая их с центральной физической проблемой – проблемой инвариантов различных групп преобразований [Там же, с. 863].

г) Мы не знаем, почему из известных нам физических явлений природы значительная часть укладывается в вариационную схему [124, с. 258].

Полак указывает, что ряд ученых всегда стояли на точке зрения, согласно которой содержание принципа Гамильтона тождественно с содержанием основных уравнений динамики. Но, по мнению Полака, методологической основой этой концепции является непонимание соотношения между формой и содержанием вообще. Принцип Гамильтона выражает некоторое свойство неорганической природы, общее ряду форм движения, и поэтому он применим к механическому движению как одному из частных случаев. Принцип Гамильтона является наиболее общей и абстрактной формой изложения физической сущности механики [125, с. 864].

Полак показывает, что из теоремы Гильберта не только непосредственно следуют условия минимума функционала, но также и все существенные положения теории Гамильтона-Якоби. Теорема Нетер гласит, что всякому непрерывному преобразованию координат, обращающему в нуль вариацию действия, при котором задан также закон преобразования функций поля, соответствует определенный инвариант, то есть сохраняющаяся комбинация функций поля и их производных. Именно теорема Нетер глубже и полнее всего выражает физический смысл принципа Гамильтона [Там же, с. 863].

Обращает внимание Полак и на тесную связь принципа Гамильтона с принципом инерции, лежащим в основе классической механики Галилея-Ньютона. При отсутствии внешних сил мы получаем первую аксиому Ньютона из ПНД, при этом в самом принципе заключено значительно больше содержания, чем в аксиоме Ньютона. Если учесть, что первая аксиома Ньютона выражает принцип причинности в классической механике, принцип наименьшего действия позволяет глубже понять причинность механики [Там же, с. 867].

Полак указывает на аналогию принципа Гамильтона с другим законом, имеющим очень общий характер и гласящим, что всякая система стремится к состоянию с минимумом потенциальной энергии. Этот, по сути дела, вариационный принцип минимума потенциальной энергии лежит в основе

исследования задач устойчивого равновесия, и применим, кроме прочего ко второму началу термодинамики [Там же, с. 868].

Другое преимущество вариационных принципов в том, что всякий такой принцип эквивалентен некоторой системе дифференциальных уравнений. Таким образом, если законы каких-либо физических явлений выражаются дифференциальными уравнениями, то, исходя из чисто математических соображений, не связанных с сущностью этих явлений, возможно их приведение к вариационной форме [Там же, с. 872].

В ряде работ [32; 33; 128] В.П. Визгин исследует связь трех фундаментальных классов принципов физики: симметрии, сохранения и экстремальности. Анализируя все варианты использования двух теорем Э. Нетер, он обращает внимание, что они действительны только в случае вариационности уравнений системы.

В работе о связи экстремальных принципов и детерминизма О.С. Разумовский пишет о том, что «материи объективно присуща общая экстремальная закономерность, которая находит отражение в теории в форме вариационных принципов» [136, с. 135]. Посредством этой всеобщей экстремальной закономерности, по мнению Разумовского, «устойчивость и неустойчивость, сохранение и изменение оказываются теснейшим образом связанными с возможностью и действительностью в механике и физике» [137, с. 174]. С одной стороны Разумовский выражает мнение, что «экстремальные закономерности (вариационные принципы, оптимизации и т.д.) не являются философскими, а только научными и практическими и следуют из диалектического принципа взаимосвязи категорий наименьшего и наибольшего» [Там же, с. 128]. С другой стороны, он уверен, что аналогия, которая подталкивает к оборачиванию методов оптимизации в области механики и физики, вытекает из факта объективной всеобщности экстремальных закономерности для систем как неживой природы, так и бихевиоральных систем, как из своей онтологической основы. Существующие формы вариационных принципов, по его мнению, это всего лишь относительное и ограниченное выражение единства и взаимосвязи симметрии, инвариантности, сохранения, экстремальности и причинности [135].

По сути, онтологическая природа экстремальных принципов по Разумовскому является следствием онтологической природы законов сохранения: «в релятивистской теории вариационные принципы служат формой выражения фундаментального закона сохранения энергии–импульса» [Там же]. Впоследствии О.С. Разумовский использовал экстремальные принципы для развития теории оптимального управления системами – оптимологии [138].

Если О.С. Разумовский выводит универсальность экстремальных принципов из универсальности принципа сохранения энергии и импульса, то В.А. Ассеев видит причину глубже – в общей для всей природы форме движения, не только физической, но и биологической, и информационной. Ассеев формулирует несколько радикальных философских выводов. Экстремальные принципы почти невозможно вывести из более общих принципов и законов, так как в общей формулировке они сами являются предельно общими [6, с. 195]. Движение и развитие в природе происходит экстремальными путями и в направлении к экстремальным состояниям и структурам [6, с. 210]. Действительное состояние любой системы реализуется при экстремальных значениях ее основных характеристик [6, с. 205]. Простота природы – частный случай экстремальных принципов [6, с. 218–220]. Целесообразность природы – следует из экстремальных закономерностей, выражающих направленность природных процессов [6, с. 218–228]. Любое устойчивое состояние является экстремальным (обратное – неверно) по отношению к определяющей его количественной характеристике [6, с. 212–218].

Ассеев предложил выводить экстремальные принципы из диалектических принципов взаимодействия и взаимопревращения противоположностей, из принципа движения и развития, а экстремумы считать состояниями или линиями равновесия взаимодействующих противоположностей. Однако Ассеев не проясняет, почему развитие стремится именно экстремальными путями к экстремальным состояниям, а также каков механизм этого стремления и какова его связь с другими законами физики. Сам он пишет: «остается открытым вопрос, почему движение совершается так, что из множества значений интеграла действия «выбирается» максимум или минимум» [6, с. 187]. Опираясь на

фундаментальную роль экстремальных принципов, в последующих работах Ассеев исследовал проблемы соотношения физики, биологии и синергетики [7].

Л.Н. Цехмистро, посвятившая изучению понятия действия диссертацию [186], ставит исключительно важный по ее мнению «вопрос об онтологических основаниях принципа стационарности действия: почему все движения в природе осуществляются таким образом, что на истинных (реальных) траекториях движения действие всегда оказывается стационарной величиной? Что скрывается за названным обстоятельством или на какое из структурных свойств природы оно указывает?». В другой работе Цехмистро предлагает свой ответ: свойство конечной физической неделимости и неразложимости мира можно рассматривать в качестве естественного онтологического основания принципа стационарности действия [185, с. 30].

Г.А. Голицын и А.П. Левич считают, что в методах научного описания мира экстремальные принципы обладают большей эвристической и обобщающей силой, чем любые уравнения движения: «в физической и методологической литературе сложилось убеждение, что указанное обстоятельство не случайно, что экстремальный принцип обладает столь несомненными достоинствами, что у него просто нет соперников» [48].

А.И. Липкин считает иначе и указывает, что в отличие от энергии действие не только не существует как измеримая величина, но даже фундаментальное качество постоянной Планка, имеющей размерность действия, использовавшееся в «старой» квантовой теории, не используется в современной квантовой механике, где важно, что $h\nu$ (где ν – частота) – это энергия [94]. Следует отметить, что, во-первых, ранее было показано, что ПНД – более общий принцип, чем принцип сохранения энергии. На это указывали М. Планк [30, с. 588], Л.С. Полак [125, с. 863–871] и другие [210; 225; 231]. Во-вторых, принципы симметрии, принципы сохранения и экстремальные принципы сегодня можно рассматривать только как единую систему взаимозависимых принципов (что нашло свое отражение в теореме Нетер). Однако теорема Нетер, согласно которой каждому преобразованию, относительно которого действие инвариантно, соответствует свой закон сохранения, сама по себе не устанавливает никаких

отношений субординации между свойствами симметрии, законами сохранения и инвариантностью функционала. Пока у нас нет оснований (кроме личных философских предпочтений), чему-то одному в этой троице отдавать предпочтение. В.П. Визгин отмечает, что «законы сохранения являются следствием инвариантности действия относительно непрерывных групп преобразований, задаваемых некоторыми принципами симметрии» [32, с. 10]. Пока не ясно, каким образом симметрия природы и связанная с ней необходимость сохранения отдельных физических величин связаны с ПНД. Хотя Р. Фейнман и утверждал, что глубокая связь, которая имеется между законами симметрии и законами сохранения покоится на принципе минимума, который вытекает из законов квантовой механики. Поэтому, в конечном счете, связь между законами симметрии и законами сохранения объясняется законами квантовой механики [168, с. 93]. В-третьих, ссылка на большую «физичность» энергии, чем действия опирается лишь на общепринятую традицию. То, что обычно измеряется, по сути дела не абстрактная энергия как таковая, а изменение ее разных форм, переходящих друг в друга. Общее у них только то, что они отражают некую способность объектов к изменениям и то, что в замкнутой системе сумма этих способностей сохраняется.

Дж. Катцав считает, что ПНД несовместим с популярной сегодня диспозиционистской онтологией, согласно которой мир, в конечном счете, представляет собой лишь нечто вроде конгломерата объектов и ни к чему несводимых предрасположений этих объектов [236]. В. Йорграу и С. Мандельштам одну из глав своей обширной работы о вариационных принципах динамики и квантовой механики посвятили анализу значения ПНД в естественной философии и пришли к выводу о его полной эквивалентности дифференциальным принципам. На этом основании они отказывают ПНД в философском значении [281]. К аналогичным выводам пришел Д.С. Лемонс [239]. На это же указывает М. Штольтцнер [267]. Рассуждая так, мы неизбежно возвращаемся к проблеме онтологических оснований математики. До сих пор не существует приемлемого объяснения эффективности математики, в частности, почему значительная часть физической науки с математической точки зрения может рассматриваться как

класс задач вариационного исчисления. Сводя все к математике, мы должны ответить на вопрос о том, каким образом математические связи между наблюдаемыми явлениями соотносятся с реальностью? Если вариационное исчисление не соответствует реальности и все вариации происходят в сознании ученого, то почему результат этой умственной вариации совпадает с вариациями в реальности? Такое странное совпадение требует объяснения или его придется принять за аксиому. Но принимая его за аксиому, мы вовсе не обязаны заранее отвергать саму возможность существования онтологической связи между умственными и реальными вариациями. Тем более, что употребление понятия «виртуальные вариации» сразу же требует своего определения, иначе проблема еще более усложняется.

Понятия «возможное», «действительное» и «вероятность» являются ключевыми в экстремальных принципах, однако сегодня философы даже не рассматривают эти принципы в качестве кандидата на онтологическую или методологическую основу для анализа соотношения причинности и вероятности. Это видно на примере сборника 2006 года «Спонтанность и детерминизм» [159]. В другом сборнике 2002 года «Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме» только в одной статье [133, с. 87] упоминается о роли экстремальных принципов для описания причинности в квантовой физике.

Одна из причин, по которой к обобщениям ПНД всегда относились настороженно – призрак целевой причины. Обоснование простотой и совершенством природы, понимаемыми телеологически, никогда не вписывалось в научную парадигму, и постепенно ПНД превратился в чисто эвристическое правило. Вслед за Ж. Д'Аламбером и Ж. Лагранжем против философской трактовки ПНД возражали К. Якоби, А. Эйнштейн, И. Пригожин и др. К. Ланцош пишет об Э. Махе, считавшим, что вариационные принципы механики – не более чем другая математическая формулировка законов Ньютона, не содержащая ничего нового. Правда тут же Ланцош добавляет: «современная математика не дает какого-либо другого метода, при помощи которого можно было бы сформулировать ковариантную и в то же время совместимую систему уравнений поля» [91, с. 24]. Лишение принципа простоты онтологического содержания

привело не только к отмежеванию от его объективно-идеалистической трактовки, но к субъективному пониманию простоты как свойства мышления.

М. Борн в 1956 писал: «Закон гравитации Эйнштейна, включающий в себя закон Ньютона как предельный случай, может быть также получен из экстремального принципа». В качестве величины, принимающей экстремальное значение, Борн вслед за Эддингтоном принимал искривление пространства-времени. Следуя Маху, Борн подчеркивал, что экстремальное описание говорит не о свойстве природы, а о стремлении нашего мышления к экономии [16, с. 131]. И. Пригожин, признавая, что «физические законы приводят к новой форме познаваемости, выражаемой несводимыми вероятностными представлениями» [132, с. 173–174], не считал экстремальные принципы достаточно универсальными для природы [111, с. 276].

Сегодня, как впрочем, и двести лет назад, все точки зрения на степень общности ПНД можно разделить на три типа. Интересно, что практически в каждой области науки, где применяется этот принцип, в умах большей части ученых одновременно уживаются все три типа. Первая и доминирующая точка зрения утверждает, что ПНД – это методологический и эвристический принцип, искусственная логическая и языковая конструкция, экономичный и удобный способ математической записи, позволяющий формулировать некоторые законы природы в простой и понятной человеку форме. Так считали Ж. Д’Аламбер, Ж. Лагранж, К. Якоби, М. Остроградский, Э. Мах, М. Борн, А. Эйнштейн, И. Пригожин. В этом убеждено большинство современных физиков. Здесь можно указать, минимум, на два возражения. Во-первых, отрицанием какой-либо реальной связи между экстремальными принципами заранее отвергается сама возможность поиска такой связи. Во-вторых, стремление разума к экономии здесь принимается как аксиома, причем остается не ясным, почему свойство экономии разума работает только для классических объектов. В других областях познания человечески разум существенно более расточителен в своей интеллектуальной деятельности.

Вторая точка зрения утверждает, что ПНД – это реальный феноменологический принцип, описывающий некоторые процессы природы, но

не имеющий всеобщего характера. Так считали У. Гамильтон, К. Гаусс, Г. Лоренц, Г. Герц, Г. Лоренц, Д. Гильберт, А. Пуанкаре, П. Дирак, Р. Фейнман. Ранее считалось, что все виды механического движения имеют общую онтологическую основу и, соответственно, ПНД является другим выражением обычных дифференциальных уравнений механического движения. Следовательно, единство форм ПНД вызвано общей природой механического движения. Так считали: У. Гамильтон, К. Гаусс и др. Когда в конце XIX века стали набирать популярность теории, геометризующие пространство и силы взаимодействия, онтологические основы ПНД стали искать в геометрии искривленного пространства, пытаясь свести любое движение к движениям по геодезическим линиям (Г. Герц, Г. Лоренц, Д. Гильберт, А. Пуанкаре и др.). Однако и здесь ПНД частично рассматривался как математический формализм, правда, имеющий основание не в особенностях мышления, а в одном из вариантов онтологии физики. Подобное объяснение также не может нас устраивать. Во-первых, онтологическая основа механического движения и геометрического представления в физических теориях опирается на разные, часто произвольно введенные аксиомы (о пространстве-времени, об инерции, о силах, о полях, о кривизне и т.д.). Во-вторых, ПНД успешно работает в областях, никак не связанных ни с механическим движением, ни с геометрией. Теории в этих областях используют совершенно другие аксиомы, часто также введенные произвольно.

Согласно третьей точке зрения, ПНД выражает всеобщий онтологический принцип существования объектов и систем Вселенной, которые в свою очередь являются следствием кого-то универсального метафизического принципа природы. Этим единством и обусловлена онтологическая связь экстремальных принципов друг с другом. Так считали П. Мопертюи, Л. Эйлер, Г. Гельмгольц, А. Эддингтон, М. Планк. Во многом этой же точки зрения придерживается и автор диссертации.

Как показывает исторический обзор, всеобщий онтологический характер ПНД вовсе не обязательно должен быть связан с телеологической интерпретацией, смешанной с теологией. Возможны и другие, вполне научные

трактовки. В качестве одной из таких трактовок в третьей главе будет описана вероятностная формулировка ПНД. Сама возможность получения такой формулировки по нашему мнению является весомым аргументом в пользу универсальной онтологической природы этого принципа. В следующем параграфе мы подробнее рассмотрим роль в ПНД таких понятий как «целенаправленность» и «вероятность», которые, в свою очередь, тесно связаны с проблемами причинности.

2.3 Проблема целенаправленности и вероятности в ПНД

Начнем, как обычно, с перечня нерешенных проблем, возникающих при использовании ПНД и связанных с причинностью, а точнее с понятиями вероятности и целенаправленности.

1) Все экстремальные принципы, так или иначе, связаны с понятием цели в природных процессах. Каким образом можно, не нарушая научной строгости, совместить в ПНД причинное (через действующие причины) и целевое (через конечные причины) объяснение? Какое из них первично?

2) Почему ПНД одинаково эффективен для описания детерминистических процессов механики, статистических процессов термодинамики и вероятностных процессов квантовой механики? Какая трактовка ПНД – однозначная или вероятностная является первичной, а какая следствием? А может быть эти трактовки равнозначны?

3) Каков физический и философский смысл понятий «возможные» применительно к состояниям, траекториям и перемещениям, используемых в формулировках ПНД и в вариационном исчислении в целом?

4) Насколько обосновано в научном описании физических объектов с помощью ПНД применение терминов «выбирают», «исследуют»,

«прощупывают» и т.п.? Как соотносятся необходимость и случайность в принципе наименьшего действия для квантовой механики?

Остановимся на первых двух проблемах подробнее.

2.3.1 Целевые причины и их соотношение с действующими причинами в ПНД

Обоснование ПНД простотой и совершенством природы, понимаемых телеологически, никогда не вписывалось в научную парадигму. Налет мистической телеологии – до сих пор одна из причин слабого интереса к экстремальным принципам. Вся история развития вариационных принципов тесно связана с попытками отстоять или опровергнуть их телеологическую интерпретацию. Особенно много споров вызывает проблема соотношения действующих и конечных причин применительно к неживым объектам.

Аристотель выделял в природе четыре вида причин: действующая, материальная, формальная и конечная (целевая). Телеология или учение о целях утверждает, что возникновение, существование, исчезновение любых объектов и их свойств определяются не действующими, а конечными причинами или целями. Противники телеологии и сторонники детерминизма не отрицали существования причин конечных, а сторонники телеологии не отрицали существования действующих причин. Но детерминизм настаивал на том, что там, где на поверхности мы видим действие конечных причин или целей, в глубине надо всегда искать действующие причины. Телеология утверждала противоположное.

По источнику конечных причин телеологию можно разделить на два направления – полную и частичную. Согласно первой считается, что любой объект природы действует сообразно с внутренними конечными причинами или внутренними целями. Это относится, как к живым, так и к не живым объектам. Например, Лейбниц утверждал, что существуют только атомы-субстанции (монады), которым присущи внутренние стремления, составляющие принципы изменений [93, с. 404]. Таким образом, активная сила или способность действовать присуща всякой телесной субстанции [Там же, с. 246]. Поэтому

Лейбниц считал, что «многие действия природы могут быть доказаны двояким путем, именно исходя из действующей причины и затем отправляясь от конечной причины» [Там же, с. 146]. С одной стороны, Лейбниц полагает путь действующих причин более глубоким и априорным. С другой, он показывает, что часто посредством конечной причины можно предсказать то, что посредством действующей причины еще не могло бы быть открыто [Там же, с. 177]. Частичная телеология признает внутренние цели и стремления только у человека и в какой-то степени у животных. Но в этом случае приходится признать внешнюю для неживых объектов целеполагающую силу или божественную конечную причину. Так телеология переходит в теологию. Существует и промежуточная точка зрения. Например, можно допускать у человека наличие целей и свободной воли, как его неотъемлемых свойств, не связанных с каким-то внешним источником, а для прочих объектов допускать только детерминизм действующих причин.

Признание приоритета конечных причин, действующих на объекты и проявляющихся в ПНД, рано или поздно приводит к последней – высшей цели, а значит к теологии, что противоречит принципам науки. Однако аргумент последней цели не более теологичен, чем аргумент первого движителя, к которому приводит цепочка действующих причин. Недаром оба эти аргумента использовал Ф. Аквинский, доказывая существование Бога [1]. Введение постулата о самодвижущейся материи не снимает проблему, так как с таким же успехом можно ввести постулат о самоцели материи. Внешнее притяжение и внутреннее стремление к какому-то конечному состоянию не более метафизичны, чем внутренние и внешние толчки от какого-то начального состояния.

Один из самых глубоких анализов телеологии дает И. Кант в «Критике способности суждения». Например, он считал, что живые организмы следует понимать как цели природы, и их нельзя мыслить по аналогии с физическими вещами, и именно поэтому «организмы дают понятию цели объективную реальность и тем самым естествознанию – основу для телеологии» [72, с. 401]. Ранее Кант выдвинул идею двух типов причинности. Естественная причинность – это связь одного состояния с другим в мире явлений. Свободная причинность вещей в себе – это способность самопроизвольно начинать состояние. В первой

явления прошедшего времени определяют всякое явление в последующем времени так, что если дано предшествующее состояние, то определенное событие неизбежно и необходимо следует за ним [71, с. 266]. Во второй причинности, наоборот, объяснение природы через конечные или целевые причины исключает объяснение из настоящего в будущее. Кант признает, что эти два различных способа объяснения совместимы, но принцип их соединения является трансцендентным: «Каким образом... природа... составляет... систему для нас, которую можно было признать возможной и по принципу возникновения из физических причин, и по принципу конечных причин, – этого никоим образом нельзя объяснить» [72, с. 441]. Далее Кант развивает мысль о том, что каждый из этих принципов в отдельности всегда будет недостаточен для объяснения природы.

Д.Н. Разеев исследует «трансцендентальный аргумент» Канта для решения телеологической проблемы, изложенный в «Критике способности суждения», согласно которому в основе телеологических суждений о природе лежит не целесообразное устройство природных объектов, но познавательный механизм самого субъекта [134]. Согласно трансцендентальной телеологии Канта, по мнению Разеева, для процесса познания природы имеет значение как сам познаваемый объект, так и познающий его субъект.

Последнее утверждение, конечно, не вызывает сомнений. Но, с другой стороны, целесообразность или нецелесообразность устройства объекта целиком зависит от того как проводится граница между субъектом и объектом. Если субъект – это только человек, то целесообразно только его устройство. Если субъект – это любой живой организм (Кант), то целесообразно и его устройство. Если же субъект или субстанция – это каждый природный объект (Лейбниц), то все объекты имеют целесообразное устройство.

В том же сочинении Канта можно найти и другие соображения. Например, о том, что, даже потерпев неудачу во всех попытках выявить согласие между различными силами, «разум предполагает систематическое единство различных сил, так как частные законы природы подчинены более общим законам, и экономия принципов становится не только принципом экономности разума, но и

внутренним законом природы... мы должны, таким образом, предполагать систематическое единство природы непременно как объективно значимое и необходимое» [72, с. 350]. С одной стороны, Кант пишет о том, что «порядок и целесообразность в природе должны быть объяснены из естественных оснований и по законам природы» [Там же, с. 405]. С другой стороны, «в телеологии, поскольку она привлекается к физике, вполне справедливо говорят о мудрости, бережливости, предусмотрительности, благодетельности природы, не делая этим из природы разумного существа (ибо это было бы нелепо), но и не позволяя себе ставить над ней другое разумное существо в качестве властелина, так как это было бы дерзко; этим должен быть лишь обозначен некоторый вид каузальности природы по аналогии с каузальностью в техническом применении разума, чтобы иметь перед глазами правило, по которому необходимо исследовать определенные продукты природы» [Там же, с. 410]. Таким образом, признавая необходимость трансцендентальной идеи творца, Кант призывает использовать телеологию в физике, но без ссылки на разумность творца или природы. Если во времена Канта для эффективного изучения природы отделение трансцендентного познания от научного было необходимостью, сегодня такое разделение не должно являться для исследователей принципиальным ограничением.

Как сказано выше, создатель ПНД П. Мопертюи был уверен, что именно количество действия является истинной тратой природы, и именно оно как можно более выгадывается [108, с. 27]. Поэтому любые физические явления можно объяснить с точки зрения конечных причин природы. Источник экономии действия Мопертюи видел в мудрости Творца и целесообразности природы. Л. Эйлер соглашался с Мопертюи в том, что «повсюду природа действует согласно некоему принципу максимума и минимума» [195, с. 746]. При этом Эйлер считал, что существует два равноправных пути познания природы – через производящие и через конечные причины [См.: 6, с. 22].

Уже Ж. Лагранж отказывается от любого теологического и телеологического толкования ПНД, считая его лишь простым и общим выводом из законов механики [85, с. 320]. У. Гамильтон не признавал телеологичность своего принципа, ссылаясь на то, что величина, которая претендует на то, чтобы

быть сэкономленной, в действительности часто расточительно расходуется» [Цит. по: 6, с. 38]. Г. Герц основывал свою критику телеологической интерпретации принципа на том факте, что из своего варианта принципа он вывел принципы наименьшего действия в формах Мопертюи-Лагранжа, Гамильтона-Остроградского и Якоби. Ведь поскольку в движении по геодезическим линиям не заложено предвидение будущей цели, то и во всех частных случаях этого принципа не может быть скрыта некая цель достигнуть кратчайшего пути, наименьшей затраты энергии или кратчайшего времени. Подобная точка зрения в совокупности с механическим детерминизмом преобладала в XVIII–XIX веках. Но с развитием биологии, психологии, термодинамики и особенно квантовой механики в конце XIX и начале XX веков часть ученых вновь вернулась к проблеме соотношения действующих и целевых причин в вариационных принципах.

Э. Мах утверждал, что «принцип наименьшего действия, как и все прочие принципы механики, исходящие из минимума, выражает одно, а именно, что в соответствующих случаях происходит только то, что при данных условиях может происходить, что ими определено и притом однозначно» [104, с. 324]. Взамен Мах постулирует принцип экономии мышления, который в частности требует из всех возможных описаний предпочесть наиболее экономное, максимально простое, универсальное и практичное в использовании. Г. Вейль писал, что нельзя установить никакого различия между причинностью и целесообразностью, а поскольку целесообразность относится не к естественнонаучному, а к метафизическому истолкованию, то она наряду с причинностью сохраняет полное право на существование [Цит. по: 6, с. 185]. М. Планк считал, мы должны рассматривать как величайшее чудо, что самая точная формулировка ПНД создает впечатление, как будто природа управляется разумной, целесообразной волей. Из анализа принципа Ферма Планк делает вывод, что фотоны ведут себя как разумные существа [259; 6, с. 185]. По его мнению, речь идет о другой по форме, а по сути, равноправной точке зрения на причинность. Дж. Уитроу считает, что раз вариационные и дифференциальные законы могут быть выведены друг из друга, то вариационные принципы физики не обнаруживают

преимущества ни перед причинностью, ни перед целесообразностью [166, с. 355]. М. Борн в своих поздних работах соглашался с точкой зрения Маха: «Представление о том, что в законах природы выражена цель или стремление к экономии, есть антропоморфная нелепость... Если даже мы и примем идею, согласно которой природа настолько экономна в своих запасах действия..., то мы не можем перестать удивляться, почему именно эта непонятная величина оказывается наиболее пригодной для этой цели. Истинное значение принципа Гамильтона находится в другой плоскости. Не природа следует экономии, а естествознание» [17, с. 129].

Л.С. Полак считал, что в первом и втором законах Ньютона заложен принцип причинности, сформулированный на языке механики. Он писал: «В то же время эта аксиома Ньютона получается из ПНД, которому усиленно придавалось телеологическое истолкование и который действительно долго сохранял некоторый неприятный привкус «конечных причин». Телеология должна быть отброшена уже потому, что принципы действия являются не минимальными, а вариационными принципами..., то есть может иметь место минимум, максимум или даже ни минимум и, ни максимум» [127, с. 362]. К замечанию Полака можно добавить, что в одних случаях экстремальное значение принимает время, в других кривизна, энергия или различные потенциалы системы. Однако следует признать, что возражение Полака работает ровно до тех пор, пока не будет найдена характеристика, объединяющая все перечисленные величины. В качестве именно такой характеристики в данной работе предлагается вероятность, которая во всех перечисленных случаях принимает максимальное значение из всех возможных при данных граничных условиях.

В.А. Ассеев отмечает, что «описание с помощью понятия “конечная причина”, опирающееся на интегральные вариационные принципы, является спекуляцией на существовании закономерной связи между начальными и конечными состояниями системы. Более того, описание через конечные состояния является лишь следствием обычного причинного описания, а поэтому вторично по отношению к последнему» [6, с. 194]. По мнению Ассеева конечные состояния в сочетании с интегральными принципами служат важным

эвристическим методом познания физических систем. Однако на уровне кибернетических систем, перерабатывающих информацию и способных в той или иной степени предвосхищать будущее, ситуация коренным образом меняется. Конечное (будущее) состояние, задаваемое в виде программ, начинает активно влиять на поведение системы, конечное состояние превращается в конечную причину. При этом математическое описание изменения систем при помощи использования и конечных состояний и конечных причин происходит при помощи одних и тех же интегральных принципов [6, с. 195].

В результате Ассеев приходит к выводу, что под целеподобными (телеономными) системами и процессами следует понимать системы и процессы, детерминированные их конечными («целевыми») состояниями. Тогда простота природы – это частный случай экстремальных принципов, а не наоборот, так же как целесообразность природы следует из экстремальных закономерностей, выражающих направленность природных процессов, а не наоборот [6, с. 218–228]. Однако Ассеев не поясняет, почему кибернетические системы коренным образом отличаются от физических, и почему те и другие описываются одними принципами? Исследуя кибернетические системы, У. Эшби отмечает, что «целенаправленное поведение является примером поведения, устойчивого около некоторого состояния равновесия» [200, с. 120], а именно такое поведение, как мы видели, описывается вариационными принципами.

М. Бунге исследует типы причинности и отмечает, что экстремальные принципы не более чем другие физические законы, указывают на целесообразное поведение, и сопоставление интегралов цели или намерению принадлежит к тому же самому сорту смешения размерностей языка, что и связывание дифференциальных уравнений с причинением [26, с. 103]. Рассуждая о соотношении телеологии и ПНД, Л.Н. Цехмистро пишет, что проблема телеологии снимается, если в качестве онтологического основания принципа стационарности действия рассматривать свойство конечной физической неделимости и неразложимости мира [185, с. 30].

В неравновесной термодинамике и синергетике существует та же проблема, что и в принципе наименьшего действия – проблема телеологии или соотношения

действующих и целевых причин. Это не удивительно, ведь там тоже действуют экстремальные принципы. По мнению И. Пригожина именно «экстремумы термодинамических потенциалов задают состояния-аттракторы, к которым самопроизвольно стремится система» [132, с. 118]. С одной стороны Пригожин считает, что сложность в природе невозможно свести к некоторому принципу глобальной оптимальности, с другой, говорит, что в своей погоне за сложностью природа занимает «прагматическую» позицию, в которой существенную роль играет поиск устойчивости» [111, с. 88]. Система, порождающая хаос, действует как своего рода селектор, отбрасывающий огромное большинство случайных последовательностей и сохраняющий лишь те из них, которые совместимы с соответствующими динамическими законами [Там же, с. 224]. Благодаря флуктуациям физико-химические системы приобретают способность «прощупывать» фазовое пространство и блуждать около состояния, предсказываемого решением феноменологического детерминистического уравнения (системы уравнений) [Там же, с. 174]. Чтобы оставаться в рамках господствующей научной парадигмы и преодолеть обвинения в телеологии, синергетика объявляет, что стремление к суператтрактору обусловлено стремлением системы к максимальной устойчивости, а такое стремление является более общим понятием, чем стремление к цели [См.: 23, с. 89]. По образному выражению К. Поппера: «Не пинки сзади из прошлого, подталкивают нас, а притяжение, соблазн будущего притягивают, приманивают нас. Именно это поддерживает жизнь, да и весь мир в непрерывном развертывании» [130, с. 190]. Р. Кунс идет еще дальше и указывает на прямую связь ПНД с телеологическим объяснением явления жизни [237].

Чтобы хоть как-то снять остроту философской проблемы внутренней и внешней конечной причинности, не прекращаются попытки создать искусственное деление объектов и процессов. А. Розенблют, Н. Винер и Дж. Бигеллоу предложили вообще отделить телеологические (целенаправленные) процессы от конечной причины: «телеологический подход полезен, если только не касаться проблем причинности лишь к таким целенаправленным реакциям, которые управляются ошибкой реакции, то есть разностью между состоянием

действующего объекта в данный момент и конечный состоянием, принимаемым за цель» [144]. Такие способы поведения Винер назвал кибернетическими. Однако осталось не ясным, как определить, какие объекты обладают обратной связью, а какие нет? Ведь колебание любого объекта возле состояния равновесия можно рассматривать как процесс с обратной связью, если конечным состоянием считать состояние равновесия, а ошибкой реакции – разность потенциальной энергии в данном состоянии и в состоянии равновесия.

Э. Майр предложил различать два типа целенаправленных процессов [243]. Телеоматические – происходящие под действием внешних сил и обстоятельств. Такие процессы являются пассивными. Например, камень падает на землю и достигает «цель». Телеономические процессы, – в которых достижение конечного состояния контролируется встроенной в них программой, где цель запрограммирована, но конечная причина не является действующей. Например, развитие организмов по программе ДНК. Е.А. Мамчур добавляет к признаку телеологических процессов осознаваемость цели и соглашается с И. Кантом в том, что при объяснении целесообразного поведения живых существ, если они не продиктованы сознательно поставленной целью, их следует рассматривать так, «как если бы они были» спроектированы и эта цель была бы в них заложена» [100, с. 21].

В.С. Степин, анализируя области применения различных типов причинности, указывает: «Саморазвивающиеся системы... способны усложняться в процессе развития, наращивать уровни иерархической организации элементов, причем формирование каждого нового уровня оказывает обратное воздействие на уже сложившиеся, перестраивает их... Уже не хватает ни вероятностной причинности, ни лапласовского детерминизма. Нужно ввести еще понятие целевой причинности. Аттрактор всегда втягивает систему в определенное русло развития, меняя вероятности первоначальных сценариев как возможных направлений эволюции системы» [162].

П.П. Гайденоко считает, что к концу XIX века в науках о природе понятие разума было сужено до так называемой научной рациональности, означавшей объяснение всех явлений с помощью установления между ними причинно-

следственной связи — в смысле действующей, механической, а не целевой, конечной причины. Сегодня же следует положить в основу как наук о природе, так и наук о культуре «единый принцип целесообразности, преодолев, наконец, их застарелый дуализм» [39, с. 25].

По мнению Д.Н. Разеева «понятие цели должно вернуться в философию науки строго в границах научной рациональности, т.е. не просто как гносеологический, но как эпистемологический концепт» [134]. Разеев строит рациональную теорию цели и целеполагания в науке, приобретающей особую значимость в условиях постнеклассической рациональности. В качестве аргумента используется «трансцендентальный аргумент» И. Канта, согласно которому применение телеологического принципа в естествознании не только дозволено, но и неизбежно.

Обобщая, можно заключить, что на сегодня не существует общепризнанного подхода, снимающего противоречия между детерминистическим описанием неживых объектов через действующие причины и описанием сложных саморазвивающихся систем через целевые или конечные причины. Связь действующих и конечных причин друг с другом не вызывает сомнений, но отдавать приоритет только одному типу причин нет оснований. И тот и другой типы являются равноправными эвристическими моделями, помогающими в описании различных процессов природы. Экстремальные принципы, в том числе ПНД, используются во многих разделах науки, являясь своеобразным мостиком между действующей и целевой причинностью. Поскольку в ПНД не отдается явного предпочтения действующей или целевой причине, можно предположить, что именно этот принцип способен стать ключом к решению проблемы причинности в целом. Как будет показано далее, экстремальные принципы связаны еще с одной важной проблемой — соотношением однозначной и вероятностной причинности.

2.3.2 Однозначная и неоднозначная причинность в ПНД

В разных разделах науки параллельно используются концепции, основанные на однозначной и неоднозначной причинности. Первая предполагает, что полное знание начальных условий и закона изменения системы во времени позволит однозначно определить ее состояние в любой момент прошлого или будущего. Вторая оперирует вероятностями состояний системы. Настаивая на однозначной причинности, невозможно объяснить ни необратимые процессы во Вселенной, ни явление жизни. Для этих целей обычно создаются теоретические модели, объединяющие разные типы причинности. Однако здесь возникает проблема взаимного перевода языков теорий, основанных на разных типах причинности. Кроме прочего, такой перевод должен объяснять, как и, почему происходит переход от неоднозначности к однозначности и обратно.

Неточное использование терминов обычно приводит к непониманию и противоречиям. Говоря о причинности важно определить не только понятия «причинно-следственная связь» и «детерминизм», но и сами типы причинности. Каждый тип причинности включает некие представления о том, что считать причиной, как она влияет на следствие и как вычислять (предсказывать) это следствие. Далее мы будем придерживаться следующих определений. Детерминизм или принцип причинности в общем смысле – это предположение о том, что все явления (объекты, системы, состояния, процессы) связаны друг с другом определенным, необходимо повторяющимся образом. Это означает, что любые связи можно определить (познать) и сформулировать в виде закономерной схемы на определенном языке. Ведь, как писал М. Борн: «Способность делать предсказания основывается на принципе причинности, который означает признание неизменных законов природы» [17, с. 191]. Причинно-следственная связь между двумя явлениями означает, что одно явление, называемое – причина, оказывает влияние на другое – следствие. Поскольку влияние всегда взаимно, разделение на причину и следствие достаточно условно. Такое определение шире, чем распространенное генетическое определение, согласно которому причина –

это явление, порождающее другое явление (следствие), а значит предшествующее ему во времени [См., например: 117]. Дело в том, что в последнем определении вводится дополнительная категория времени, которая сама нуждается в определении. Таким образом понимаемый детерминизм говорит о всеобщем характере связей, а причинно-следственная связь – о характере связей конкретных явлений.

В литературе существуют различные классификации типов причинности или характера причинно-следственных связей [13; 26; 157; 178]. Воспользуемся схемой Р. Фейнмана [168] и выделим шесть типов причинности по критерию однозначности определения следствия, а также по типу причины, определяющей способ предсказания следствия. В результате мы получим: два однозначных типа – динамическую и полевую, два частично однозначных типа – равновесную и статистическую и два типа неоднозначной причинности – вероятностную и эволюционную.

Динамическая или силовая причинность. В качестве причины принимается внешняя или внутренняя сила, однозначным образом вызывающая изменение движения или состояния объекта (следствие). Источником сил являются объекты. Следствие определяется классическими законами движения во времени.

Полевая или локальная причинность. За причину принимается внешнее или внутреннее поле, однозначным образом вызывающее изменение движения или состояния объекта (следствие). Поле может иметь источник (объект) или не иметь его. Следствие определяется классической теорией поля.

Равновесная или стационарная причинность. В качестве причины принимается возможное равновесное (стационарное или экстремальное) движение или состояние, однозначным образом направляющее и притягивающее действительное движение или состояние объекта (следствие). Сами пути, которыми объект достигает равновесное (стационарное или экстремальное) движение или состояние, часто однозначно неопределимы. Следствие определяется законами равновесия и экстремальными принципами.

Статистическая причинность. За причину принимается совокупность большого числа полностью или частично независимых сил или полей,

вызывающих изменение движения или состояния объекта (следствие). Суммарное следствие определяется законами статистического усреднения или распределения следствий, вызванных каждой отдельной силой или полем. Отдельные силы в принципе однозначно определяемы, но их влияние на следствие случайно, то есть однозначно неопределимо.

Вероятностная причинность. За причину принимается максимальная вероятность возможных движений или состояний, направляющая и притягивающая действительное движение или состояние объекта (следствие). Следствие определяется законами распределения вероятности отдельных движений или состояний, каждое из которых однозначно неопределимо в принципе. Вероятностную причинность часто сводят к статистической, поскольку предсказания статистики применительно к макроскопическим системам приобретают практически определенный, а не вероятностный характер. По сути это неверно, ведь сведение к статистике опирается на три идеализации: о замкнутости системы, о независимости ее подсистем друг от друга, о больших промежутках рассматриваемого времени [См.: 89, с. 16–30]. В отличие от статистической причинности отдельные объекты вероятностной системы не подчиняются однозначной причинности. В квантовой механике это обычно связывают с соотношением неопределенности, в сложных неравновесных системах – с неопределенностью в точках бифуркации, в живых системах – с внутренними стремлениями и со свободой воли.

Эволюционная или системная причинность. В качестве причины принимается возможное существование, развитие, рост, усложнение системы, направляющие и притягивающие действительное движение или состояние системы (следствие).

Иногда в литературе отдельно выделяют целевую или конечную причинность, о которой было сказано выше. В этом случае причиной считается внешняя или внутренняя цель или возможное конечное состояние, направляющее и притягивающее действительное состояние объекта (следствие), который стремится максимально приблизиться к этому конечному состоянию. По нашему мнению, действующие и целевые причины в разных соотношениях уже включены

в каждый из шести перечисленных типов причинности, и рассматривать целевые причины отдельно было бы излишним усложнением. Например, в динамической причинности сила всемирного тяготения может рассматриваться и как толкающая тело из начального положения, и как притягивающая к такому конечному состоянию, где расстояние между объектами будет минимальным. В полевой причинности поведение тела в поле можно рассматривать и как его внутреннее стремление занять такое конечное и при этом устойчивое состояние, когда потенциал поля имеет минимально возможное значение. В равновесной причинности поведение системы можно рассматривать, как его внутреннее стремление занять такое конечное и при этом устойчивое состояние, когда некий функционал системы примет стационарное значение. В статистической и вероятностной причинности конечным состоянием системы, к которому она будет стремиться, можно считать равновесное распределение вероятностей.

Перечисленные типы причинности не являются исключительной частью какого-то одного раздела науки. Классическая механика успешно использует динамический, полевой и равновесный типы, причем их результаты математически эквивалентны [См.: 168]. В термодинамике применяется динамическая, статистическая и эволюционная причинности. Общая теория относительности сочетает причинность полевую и равновесную. Биологические науки для объяснения явлений живой природы в той или иной мере используют все шесть перечисленных типов причинности.

Рассмотрим, какое отношение к вероятностной причинности имеют экстремальные принципы и в частности ПНД. Идея вероятностной трактовки экстремальных принципов не нова. Как уже было сказано, Д'Аламбер, Лагранж, Гамильтон, Гельмгольц и другие ученые в своих формулировках ПНД использовали одну и ту же формулу: из всех возможных или виртуальных состояний или путей системы, действительное состояние или действительный путь соответствуют минимуму (реже максимуму) некой величины – действия. Гаусс считал, что его принцип наименьшего принуждения являлся полной механической аналогией «метода наименьших квадратов» теории ошибок. Последний метод описывает способ нахождения наиболее вероятного

распределения значений некой измеряемой функции. Эддингтон при помощи принципа Гамильтона сравнивает свойства возможных состояний с невозможными состояниями [192, с. 262]. Сравнивая с понятием вероятности, он приходит к принципиально важному для нас выводу: «Принцип Наименьшего действия становится с этой точки зрения Принципом Наибольшей Вероятности. Закон природы сводится к тому, что то состояние мира, которое осуществлено в действительности, является наиболее вероятным состоянием» [193, с. 177]. Далее он пишет: «физическая реальность – это синтез всех возможных физических аспектов природы» [Там же, с. 181].

Дж. Максвелл ввел в физику понятие распределения вероятностей реальных характеристик сложной системы, к которому система стремится в состоянии равновесия. Л. Больцман отождествил энтропию – функцию, характеризующую состояние термодинамической системы, с числом комплексов или числом способов, которыми может быть достигнуто данное макроскопическое состояние системы. Чем больше число комплексов и соответствующих им способов, тем больше вероятность состояния системы. Из принципа Больцмана следует, что «наиболее вероятным состоянием, достижимым для системы, является такое, в котором события, происходящие одновременно, статистически взаимно компенсируются» [См.: 132, с. 117]. Дж. Гиббс развил идеи Больцмана о статистическом истолковании второго начала термодинамики и обобщении принципа Гамильтона. Э. Мах считал экстремальные принципы такими же однозначными, как и другие физические принципы [104, с. 324].

С середины XX века проводится широкое обобщение вероятностной трактовки понятия термодинамической энтропии в теории информации и в биологии. К. Шеннон выражает информацию через вероятность. Г. Хакен в качестве потенциала, к которому стремятся системы, вводит понятие синергетической информации, также выражаемой через вероятность. Причем этот потенциал – не только вероятность одного состояния, но и распределение вероятностей частей системы. И. Пригожин ставит вопрос, как связаны обратимые миры динамики, общей теории относительности, квантовый мир и необратимый мир неравновесной термодинамики? И сам отвечает – все законы

природы можно формулировать как принципы отбора состояний, основанные на вероятностном подходе [132, с. 231]. Э. Джейнс разрабатывает формализм, основанный на обобщении экстремального принципа максимума энтропии в вероятностной форме, из этого формализма частным образом вытекают все основные законы термодинамики.

Основным направлением, где используется вероятностная трактовка ПНД, сегодня является квантовая механика. Э. Шредингер объяснил квантовые явления на основе объединения принципа Ферма и принципа Гамильтона с их вероятностной трактовкой. Л. Де Бройль и М. Борн произвели поистине философское обобщение, говоря о том, что фазовая волна и ее функция, использованная Шредингером, описывают вероятность любых возможных вариантов событий в квантовом мире. Р. Фейнман сделал парадоксальное предположение, что квантовая частица одновременно движется по всем возможным траекториям, но волны вероятности взаимно гасятся так, что максимальная вероятность падает на узкий пучок траекторий вокруг истинного пути, который точно описывается принципом наименьшего действия. И хотя Л.С. Полак считал, что ПНД имеет в квантовой механике иной физический смысл, нежели в классической механике [125, с. 873], именно трактовка Фейнмана, несмотря на несовместимость со здравым смыслом, кажется нам наиболее перспективной в понимании философской сущности изучаемого принципа. По сути, Фейнман подтвердил идею Эддингтона о вероятностном характере действия в ПНД. По мнению Г.Я. Мякишева: «до работ Фейнмана глубинная внутренняя природа этого принципа оставалась скрытой» [109, с. 157]. Мякишев делает также вывод, что фундаментальный динамический принцип – принцип наименьшего действия – имеет, по существу, статистическую природу. В данном случае он имеет в виду природу вероятностную. По его мнению, нам лишь кажется, что природа выбирает однозначный классический путь, на самом деле участвуют все возможные пути [Там же, с. 159]. Вероятностная форма причинности является основной, а однозначная – лишь ее выраженным частным случаем [Там же, с. 226].

В.А. Ассеев обращает внимание, что в основном уравнении квантовой механики отражается однозначная связь, но связь не осуществившихся событий, а потенциальных их возможностей и выражающих их вероятностей. С другой стороны истолкование принципа наименьшего действия как обобщенной формы выражения детерминизма в физике особенно четко представлено в фейнмановской интерпретации данного принципа [6, с. 179]. Ассеев делает предположение, что и другие экстремальные принципы выражают максимальную вероятность той или иной формы движения. То, что это возможно не только для статистических принципов, таких как принцип возрастания энтропии, не вызывает сомнений в силу фундаментальности вероятностных законов [6, с. 192].

В последнее время появилось несколько работ, посвященных вероятностной трактовке ПНД и других экстремальных принципов. П. Рамон отмечает, что использование фейнмановского интеграла по траекториям обеспечивает ясный и элегантный язык для описания перехода от классической к квантовой физике [141, с. 11]. Э. Тэйлор, много сил посвятивший популяризации принципа наименьшего действия в высшем образовании, считает, что механика Ньютона становится банальным частным случаем квантовой механики. Чем больше масса объекта, тем больше вклад набора мировых линий в вероятность его обнаружения, а значит, тем уже пучок мировой линии наименьшего действия. В пределе этот пучок сжимается до единственной мировой линии, предсказанной принципом наименьшего количества действия [270]. В другой работе Дж. Огборн и Э. Тэйлор пишут: «То, что физика Ньютона рассматривает как причину и следствие (ускорение производится силой), квантовые «интегралы по путям» рассматривают как баланс изменений в фазе, произведенных изменениями в кинетической и потенциальной энергии» [256]. Аналогичный подход применяет В.И. Сбитнев, исследуя геодезические линии и вероятностную интерпретацию движения квантовых частиц [153].

Соотношение динамической и вероятностной причинности исследуется во многих работах, в т.ч. рассматривается возможность распространения вероятностного подхода квантовой механики на все области научного знания [13; 143; 147; 159; 174; 179; 204; 208; 223; 268; 273]. Л.Д. Ландау называл

однозначную причинность макросистем – идеализацией, приемлемой для практических целей человека, результатом статистического усреднения, основанного на предположении о квазизамкнутости системы и независимости ее подсистем друг от друга. Только в этом случае «предсказания статистики приобретают практически определенный, а не вероятностный характер» [89, с. 20–22]. В.А. Фок считал, что «навязывать природе именно детерминистическую форму закономерностей, отказываясь, наперекор очевидности, признать более общую вероятностную их форму, – значит исходить из каких-то догматов, а не свойств самой природы» [176]. По словам М. Борна «динамические законы оказываются справедливыми в среднем для очень большого числа частиц и теряют силу при переходе к малому числу частиц, когда необходимо пользоваться статистическими законами» [16, с. 170], и далее: «вероятностная форма причинности является основной, а однозначная – лишь ее выраженным частным случаем» [Там же, с. 226]. По мнению К. Поппера, вероятность выражает реальную предрасположенность объектов к тому или иному поведению, предрасположенности эти существуют реально, так же как силы или силовые поля [130, с. 17]. Похожую точку зрения излагают Л.Б. Баженов [9] и Н.Ф. Овчинников [116].

В.С. Степин утверждает, что новый взгляд на причинность «связывается с представлениями о превращении возможности в действительность. Целевая причинность, понятая как характеристика саморегуляции и воспроизводства системы, дополняется идеей направленности развития... Случайные флуктуации в фазе перестройки системы (в точках бифуркации) формируют аттракторы, которые... ведут систему к некоторому новому состоянию и изменяют возможности (вероятности) возникновения других ее состояний» [161].

Ю.В. Сачков пишет: «В настоящее время поставлен вопрос о разработке новой парадигмы, новых оснований постнеклассической науки, в которой новые концептуальные воззрения явятся обобщением вероятностных концепций» [148, с. 87]. И.А. Акчурин считает, что именно фейнмановская формулировка квантовой механики позволяет перейти к «когомологической» или «топологической» физике, исследующей топологию фазовых пространств

движений, где существуют предельные точки и траектории движений систем, обладающие свойством «притягивать» к себе ближайшие фазовые траектории [2, с. 47].

Таким образом, если вероятностные законы природы имеют фундаментальный характер, а все прочие законы являются их приближением, необходимо искать механизм, по которому осуществляется это приближение. Законы квантового уровня имеют принципиально вероятностную форму и, благодаря этому, позволяют обосновать вероятностную трактовку ПНД. Можно предположить, что существует возможность распространения вероятностного подхода квантовой механики в варианте Фейнмана на другие области научного знания. Для этого достаточно предположить, что и другие экстремальные принципы выражают максимальную вероятность того или иного движения, состояния или процесса. В следующей главе мы проанализируем возможность, а также достоинства и ограничения такого подхода.

3 Вероятностная интерпретация ПНД

В предыдущей главе были описаны три принципиально разных точки зрения на научный и философский статус ПНД. Согласно первой, это методологический и эвристический принцип, искусственная логическая и языковая конструкция. Согласно второй и третьей, это реальный принцип, занимающий важное и, возможно, ключевое место в системе законов природы. В этой главе мы попытаемся обосновать последнее утверждение. Для этого покажем, что в разных областях физики, отличающихся граничными условиями, одновременно с дифференциальными уравнениями движения, пригодными только для своей области, могут применяться различные формы ПНД. Покажем также, что основные формы ПНД могут быть объяснены через метод «интегралов по траекториям» квантовой механики. Затем сформулируем основные положения концепции «суммирования сосуществующих возможностей», основанной на предположении о фундаментальной роли вероятностной причинности и объединяющей метод «интегралов по траекториям» с некоторыми интерпретациями квантовой механики, использующих категории «возможность» и «действительность». Мы дадим общую вероятностную формулировку экстремальных принципов, благодаря которой может быть раскрыт физический и онтологический смысл ПНД, а также решены некоторые проблемы причинности в ПНД. Наконец, мы рассмотрим основные возражения против вероятностной интерпретации ПНД и оставшиеся нерешенными проблемы.

3.1 Связи между частными формами ПНД и другими принципами физики

Как было показано в предыдущих главах, взгляд на ПНД как на универсальный принцип природы встречает серьезные возражения. С одной стороны, неясен физический смысл ПНД. Почему какая-то абстрактная величина (действие) является стационарной и принимает экстремальные значения для действительных движений и состояний? С другой стороны, неясно, каким образом разные формы ПНД связаны друг с другом. Отвечая на эти возражения покажем, что ПНД для классической и релятивистской механики являются частными случаями законов квантовой механики, а их физический смысл может быть объяснен с помощью метода «интегралов по траекториям».

В рамках конкретных разделов науки каждую область природы принято описывать отдельным языком. Под языком раздела науки здесь мы будем понимать не только формальную совокупность понятий, аксиом, логических правил, математического аппарата, но еще и онтологическое содержание, включающее смысловое понимание причинности и реальности. Сегодня в физике мирно соседствуют языки, основанные на разных, иногда несовместимых понятиях и аксиомах. Это языки сил, полей, потоков, устойчивости, геометрии пространства и времени, статистики, вероятности и т.д. Например, движение макрообъектов описывается на языке сил или на языке поля. Для космологических объектов чаще используется язык искривленного пространства-времени. Языки описания макрообъектов объединяет возможность геометрической репрезентации явлений и объектов, а также наличие однозначной причинно-следственной связи. Но философские основания этих языков сильно отличаются. После успеха копенгагенской формулировки квантовой механики часть физиков смирились с неприменимостью языка геометрии и однозначной причинности к микрообъектам. Другая часть, как например М. Борн, были уверены, что «волновая теория необходимо должна располагать средствами для перевода ее результатов на язык механики обычных объектов» [15, с. 257]. Попытки свести квантовую вероятность к статистике или считать вероятностное

описание неполным не удалось, в результате возникло несколько интерпретаций квантовой механики [См., например: 118; 154; 234]. Каждая интерпретация предлагает свой набор аксиом, логических правил и свою онтологию – понимание сущности происходящих явлений. По сути, каждую интерпретацию можно считать одним из вариантов языка описания квантовых явлений. Не зря Р. Фейнман считал, что «каждый приличный физик-теоретик знает шесть или семь теоретических обоснований одних и тех же физических фактов» [168, с. 154].

Далее мы покажем, каким образом можно снять часть противоречий между геометрическим языком сил и поля, геометрическим языком четырехмерного пространства-времени и вероятностным языком квантовой механики. Дело в том, что, с одной стороны, уравнения движения основных физических теорий эквивалентны одной из форм ПНД, с другой, все формы ПНД можно представить предельными случаями метода «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана.

3.1.1 Варианты описания движения тела и их философские основания

В физике известно несколько вариантов или способов предсказания траектории тела, брошенного под углом к горизонту. Перечислим пять из них. Наглядное описание первых трех способов дано в работах Р. Фейнмана [168, с. 43; 171, с. 96].

Вариант №1. Теория Ньютона говорит, что тело обладает инерцией и притягивается к Земле с определенной силой. И инерция, и сила тяжести зависят от массы тела. Действительное движение в каждый момент времени является суммой движений, вызванных этими двумя причинами. Согласно идее Ньютона, тело имеет внутреннее «стремление» двигаться прямолинейно с постоянной скоростью, а «почувствовав» действие на себя внешней силы, тело ускоряется или меняет свое движение (вектор скорости) на определенную величину за каждый интервал времени. Предполагается, что сила действует на расстоянии

(нелокально) и зависит от удаления тела от центра тяжести Земли. Зная начальное местоположение и вектор начальной скорости тела, можно записать уравнение для вычисления всех точек его траектории.

Вариант №2. Если нам не нравится мистическое действие на расстоянии, тот же полет тела можно описать в терминах теории поля. В каждой точке пространства имеется число – потенциал, меняющееся от одной точки пространства к другой. Если в любую точку пространства поместить тело, на него будет действовать сила в направлении, в котором потенциал быстрее всего уменьшается. Действительная траектория тела определяется силой в каждой точке пространства. Вектор силы равен антиградиенту потенциальной энергии или массе тела умноженной на максимальную скорость уменьшения потенциала поля Земли. Тело как будто «прощупывает» пространство вокруг себя и устремляется туда, где потенциал поля тяготения будет наименьшим. Чем быстрее убывает потенциал, тем быстрее тело туда стремится (обычно говорят – тем больше действующая на тело сила). Полевая формулировка позволяет предсказать полет тела, если известно, что происходит в данный момент в точках, его окружающих. Оговорка «в данный момент» принципиальна, поскольку подобное виртуальное «прощупывание» пространства не происходит во времени. К сожалению, избавиться от многочисленных метафор не удастся, иначе как объяснить, откуда тело «узнает» величину потенциала в соседних точках?

Вариант №3. Существует третий способ, математически совпадающий со вторым, но иной в философском смысле. Нам не нужно знать, что происходит в соседних моментах времени или в соседних точках пространства, достаточно знать начальное и конечное положение тела в пространстве и времени. Принцип наименьшего или стационарного действия утверждает, что из всех возможных перемещений тела из одной точки в другую, совершаемых за один и тот же промежуток времени, реальной траекторией будет та, для которой некая величина, называемая «действие» имеет минимальное или стационарное значение. В ПНД в форме Гамильтона действие равно разнице между средней кинетической и средней потенциальной энергией тела. Путь с минимальным действием является действительным, именно его мы наблюдаем как реальный,

именно он совпадает с результатами вычислений первых двух вариантов. Из этого принципа выводятся дифференциальные уравнения движения тела в поле силы тяжести, но в этот раз нам не надо думать ни о каких силах. Не нужна и фиктивная сила инерции, ведь в отсутствии потенциального поля, путь тела с наименьшим количеством действия – это прямая с постоянной скоростью, вдоль которой действие минимально (стационарно). Так ПНД заменяет второй и первый законы Ньютона. Подробнее частные формы ПНД для механических тел были описаны в первой главе.

Вариант №4. Общая теория относительности говорит о поведении тела нечто интересное. Не существует не только силы притяжения, но и потенциального поля тяготения, вместо них есть единое гладкое геометрическое пространство-время, искривленное под влиянием массы Земли. В этом пространстве-времени тело движется по инерции вдоль одной из мировых линий между начальным и конечным событиями. Линия эта называется геодезической. Форма геодезической линии вычисляется через дифференциальные уравнения четырехмерного пространства-времени общей теории относительности.

Как было показано в первой главе, уравнения общей теории относительности для тела, двигающегося в гравитационном поле, можно записать, используя уже знакомое нам понятие действия. В отсутствии гравитационного поля ПНД для движения свободного тела, для которого можно пренебречь релятивистским изменением массы тела, упрощается до принципа максимального собственного времени. Из всех возможных мировых линий между двумя событиями действительной является та, для которой величина собственного времени нашего тела имеет максимальное или стационарное значение. Именно эта мировая линия называется геодезической. Для слабых гравитационных полей и невысоких скоростей ПНД гравитационного поля и принцип максимального собственного времени упрощаются до ПНД в форме Гамильтона для классической механики. Можно сказать, что из всех возможных путей тела в четырехмерном пространстве-времени есть только один путь с максимальным собственным временем. Этот путь мы и воспринимаем как действительный или реальный.

Вариант 5. Существует еще один способ описания движения тела. Вспомним формулировку квантовой механики Р. Фейнмана, описанную в первой главе. Фейнман заменил классическое представление о движении тела по одиночной и уникальной траектории представлением о движении по бесконечному множеству мыслимых траекторий, что математически описывается функциональным интегралом по этим траекториям. Если частица движется одновременно по всем возможным траекториям, а волны вероятности этих путей гасятся в конечной точке траектории, то максимальная вероятность отвечает действительному пути, для которого вариация некой величины равна нулю. По аналогии с классической механикой эту величину Фейнман назвал действием. Каждый возможный путь частицы связан с изменением фазы ее волны вероятности. Вблизи действительного пути волны вероятности находятся почти в одной фазе и взаимно усиливаясь, порождают значительный эффект, наблюдаемый как «реальный». Остальные пути существуют (их называют виртуальными или мыслимыми), но они нами не наблюдаются, поскольку вероятность их наблюдения крайне мала. Фейнман показал, что вероятность обнаружения частицы равна квадрату амплитуды вероятности (волновой функции) и эквивалентна результатам, получаемым матричным методом Гейзенберга и волновым уравнением Шредингера [См.: 256].

3.1.2 ПНД и квантовая механика

Казалось бы, какое отношение имеет квантовая механика к полету классического тела? Если законы для обычных тел однозначны и точно предсказывают их поведение, зачем здесь нужны вероятности микромира? Однако, еще В.А. Фок обращал внимание, что связь квантовой механики с классической заключается в принципе соответствия, согласно которому существует предельный случай, когда те формулы квантовой механики, которые

непосредственно сравниваются с опытом, переходят в классические. В этом предельном случае характерные для данной механической системы величины, имеющие размерность действия, можно считать большими по сравнению с «квантом действия» [176]. С другой стороны, как пишет В. Зурек, поскольку уравнение Шредингера было выведено из классической механики в форме Гамильтона-Якоби, не является неожиданностью тот факт, что оно приводит к классическим уравнениям движения, когда постоянная Планка может рассматриваться как малая величина [67].

Р. Фейнман сделал вывод о первичности квантовой механики относительно классической механики и теории относительности на основании того, что фундаментальные физические законы могут быть выражены в виде принципа наименьшего действия [171, с. 108]. По Фейнману классическое тело, как фотон или электрон, движется сразу по всем возможным путям (мировым линиям) между начальным и конечным событиями. Но поскольку фаза волны вероятности очень велика (отношение действия к постоянной Планка много больше единицы), набор мировых линий, вносящих значительный вклад в вероятность обнаружения классического тела, сокращается до узкого пучка. В пределе это единственная мировая линия, предсказанная классическим принципом наименьшего действия Гамильтона [См.: 270]. То, что физика Ньютона рассматривает как причину и следствие (ускорение производится силой), квантовые «интегралы по траекториям» рассматривают как баланс изменений в фазе, произведенных изменениями в кинетической и потенциальной энергии [См.: 256]. Классическая механика и теория поля становятся коротковолновым приближением квантовой механики, действие приобретает смысл фазы волновой функции. Фейнман подчеркивал, что нам больше нет необходимости прибегать к понятию сил, действующих на тело, телу достаточно одновременно «пройти» все возможные пути из одной точки в другую и «выбрать» путь, для которого величина действия минимальна [171, с. 111]. Однако, по нашему мнению, термин «выбрать» в данном случае излишен, ведь классическая траектория отбирается не телом, а правилом сложения фаз волновых функций всех возможных траекторий.

Как мы помним, движение свободного тела можно описать через уравнение общей теории относительности или через принцип максимального собственного времени (старения), который для низких скоростей и слабых полей сводится к ПНД в форме Гамильтона. По образному выражению Э. Тэйлора, объекту, перемещающемуся с нерелятивистской скоростью в области слабого пространственно-временного искривления, природа как бы командует: Следуй путем наименьшего количества действия! Объекту, перемещающегося с любой возможной скоростью в области любого конечного пространственно-временного искривления, природа командует: Следуй путем максимального старения! А электрону природа командует: Исследуй все пути! [270] В той же работе Тэйлор приводит схему, где ПНД, с одной стороны, показан предельным случаем и приближением принципа максимального собственного времени (старения), с другой, предельным случаем и приближением принципа Фейнмана «исследуй все пути». Иначе говоря, классическая механика одновременно является приближением и общей теории относительности, и квантовой механики.

Если продолжить рассуждения Тэйлора, то принцип максимального собственного времени (старения) также можно представить предельным случаем и приближением принципа Фейнмана «исследуй все пути». Для этого достаточно допустить, что под влиянием другого массивного объекта (на языке ОТО – под влиянием гравитационного поля) возможные траектории или волны вероятности движущегося тела изменяются настолько, что в результате сложения их фаз действительная траектория примет форму искривленной геодезической или мировой линии. Этот эффект искривления мировых линий в общей теории относительности трактуется как искривление пространственно-временного континуума. С точки зрения нашего подхода такая трактовка из объяснительной превращается в частный случай и наглядный формализм.

Можно пойти еще дальше. Известно, что применение аппарата квантовой теории поля к гладкому 4-х мерному пространству-времени порождает бесконечные и даже отрицательные вероятности. Одно из математических решений этой проблемы предлагает современная теория суперструн. Взамен она требует дополнительных измерений [См.: 52, с. 138]. По разным представлениям

в каждой точке 4-х мерного пространства-времени находится шесть или более дополнительных свернутых пространственных измерений, что порождает новый взгляд на проблему пространства в целом [См.: 164].

Если теория суперструн верна, а доказательств этого пока нет, можно предположить, что принцип максимального собственного времени является релятивистским предельным случаем принципа квантовой механики «исследуй все пути», так же как ПНД является классическим предельным случаем принципа максимального собственного времени. Допустим, что при увеличении до масштаба макрообъектов пульсирующая ткань флуктуирующего многомерного запутанного пространства-времени схлопывается и сглаживается до гладкого 4-х мерного пространственно-временного континуума. То есть флуктуации в дополнительных измерениях продолжают, но их влияние на макрообъект малозаметно с точки зрения других макрообъектов. Тело продолжает двигаться по всем возможным траекториям в 10-мерном пространстве, но в результате сложения их фаз, все траектории сводятся к возможным траекториям в 3-х мерном пространстве. Причем конкретное число измерений определяется лишь тем, что только в нем состояние макрообъектов может быть устойчивым. Перенесем перечисленные гипотезы на схему Э. Тэйлора и используем его же метафоры. Новые связи обозначим на рисунке 1 пунктиром и курсивом.

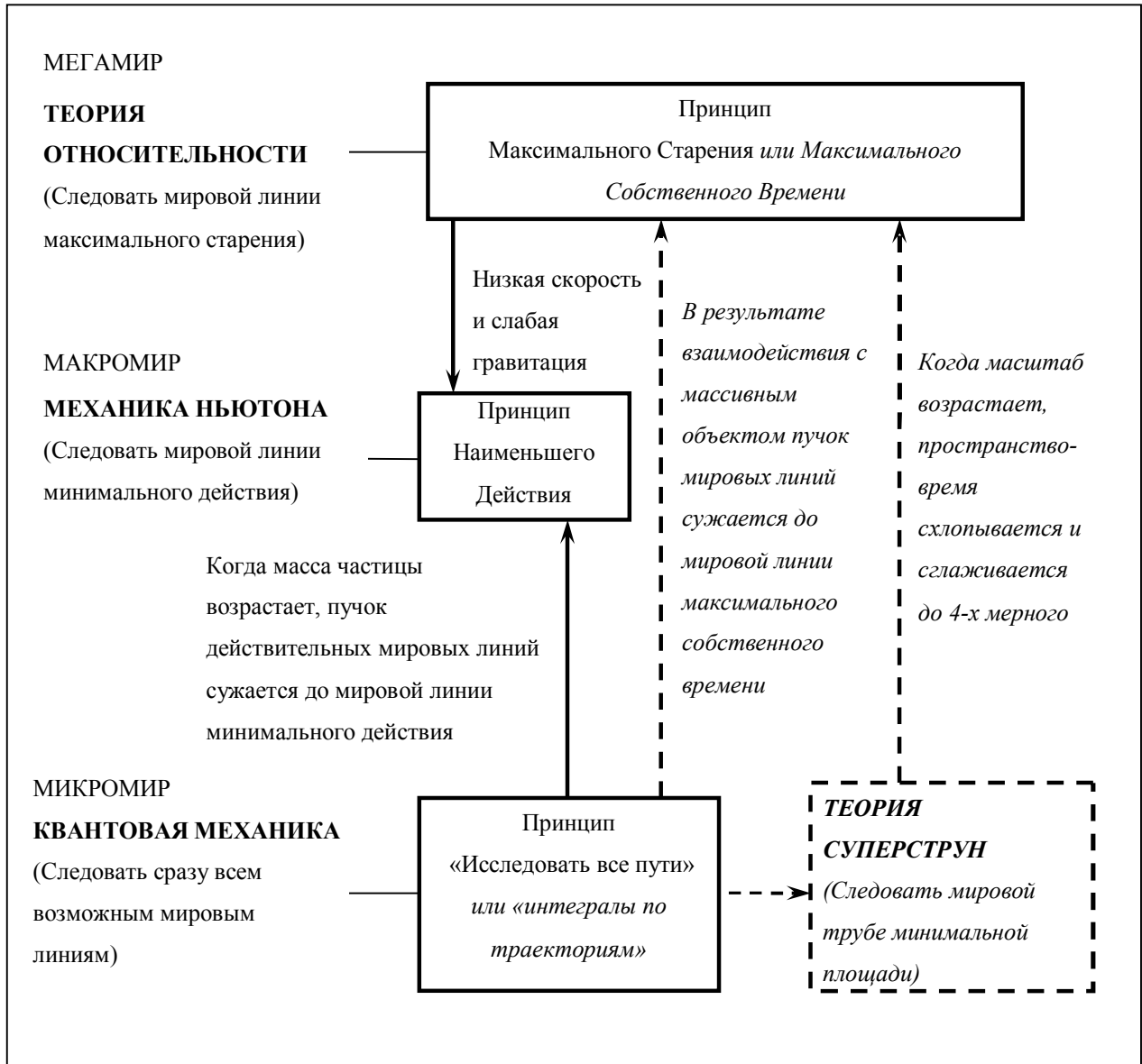


Рисунок – 1 Связь ПНД с другими принципами

Примечание – Механика Ньютона может быть представлена как приближение общей теории относительности и квантовой механики, а общая теория относительности – как приближение квантовой механики.

О том, что волновая механика в общем случае применима к многомерным пространствам указывал еще Э. Шредингер [См.: 14, с. 255]. В пользу этой гипотезы свидетельствует прямое использование ПНД в трактовке Фейнмана к движению струн. Нобелевский лауреат по физике Д. Гросс указывает, что в этом

случае струна предполагается движущейся в пространстве вдоль мирового листа или по мировой трубе, а для расчета траектории ее движения минимизируется аналог длины пути — площадь трубы [54]. Таким образом, через посредничество ПНД не только классическая механика, но и общая теория относительности может оказаться предельным случаем квантовой механики. И хотя квантовой теории гравитации пока не создано, методологический принцип соответствия дает нам основания предполагать наличие подобной связи.

Мы видим, что для каждой области физики один и тот же наблюдаемый результат с близкой математической точностью можно получить несколькими способами, опирающимися на разные логические и философские основания. Нет смысла обсуждать, какой из этих способов верный, а какой нет. Каждый способ и его язык описания полезен в своей области. Наша задача — найти основу для объединения различных форм ПНД друг с другом и с другими распространенными физическими теориями движения. Для этого добавим к рисунку 1 еще несколько теорий и принципов, объединив их в две группы. В первой соберем теории, описывающие движение объектов с помощью дифференциальных уравнений. Во второй — теории и принципы, связанные с ПНД. Горизонтальное деление проведем для объектов мега, макро и микромира.

Для объектов мегамира, где существенно влияние гравитационных полей и высоких скоростей, используется язык описания через геометрию 4-х мерного пространства-времени. Для объектов макромира обычно используется язык евклидовой геометрии сил и поля. Для объектов микромира обычно используется вероятностное описание на языке волновой механики. Картина будет неполной еще без двух принципов. Принцип Ферма утверждает, что свет выбирает из всех возможных путей путь с минимальным временем, одинаково хорошо работает как в ровной геометрии макромира, так и в искривленной геометрии мегамира. Этот принцип можно считать частным случаем одновременно и ПНД классической механики, и релятивистского принципа максимального старения. Именно их взаимная эквивалентность используется в оптико-механической аналогии физики. Принцип Гюйгенса предлагает объяснение и принципу Ферма, и ПНД для тел и полей, следовательно, может объяснить всю оптико-механическую аналогию

[См.: 125, с. 803]. Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, которые путем интерференции (суммирования фаз) образуют новый фронт. Именно принцип Гюйгенса был использован Де Бройлем и Шредингером при формулировке волновой механики [189, с. 679–704]. Фейнман, в свою очередь, использовал его для объяснения квантовой электродинамики. Таким образом, принцип Гюйгенса работает и в геометрическом языке сил и поля, и в вероятностном языке квантовых объектов. Создатели квантовой механики вслед за Эйлером, Лагранжем и Гамильтоном заимствовали оптико-механическую аналогию геометрической оптики (принципы Ферма и Гюйгенса) и классической механики (ПНД Гамильтона). Ту же самую аналогию использовали Гильберт и Эйнштейн, выписывая уравнения общей теории относительности [См.: 197, с. 599]. Применение одной и той же аналогии для разных языков описания свидетельствует в пользу их общности. Можно предположить, что общность здесь не только методологическая и математическая, но и онтологическая, отражающая общую сущность описываемых явлений.

Объединим на рисунке 2 перечисленные теории и принципы движения физических объектов. Снова используем метафоры «команд», которые природа «отдает» объектам в зависимости от того, языком какой теории мы описываем движение этих объектов. Можно сказать, что эти «команды» транслируются объектам через соответствующие законы.

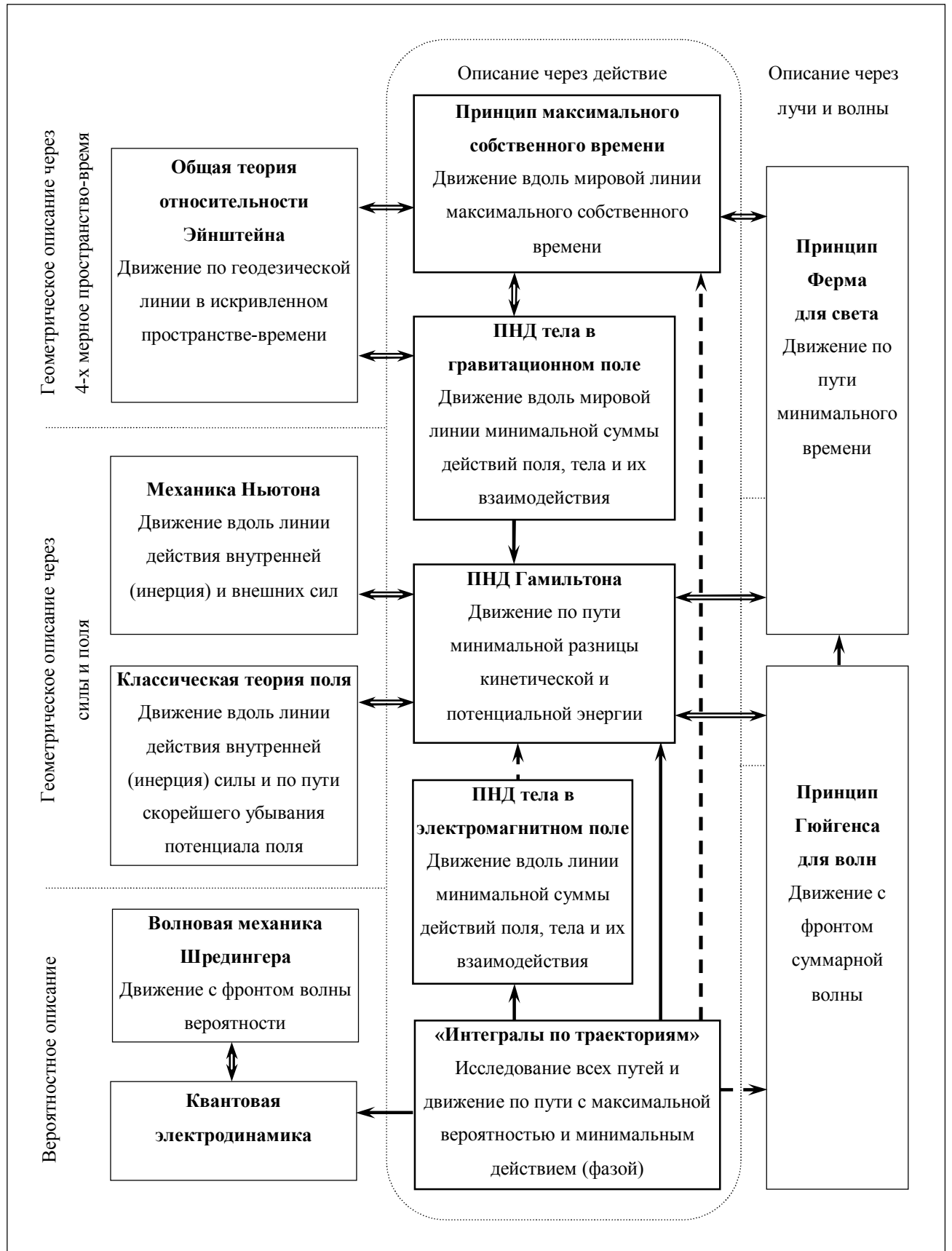


Рисунок – 2 Основные теории и законы движения физических объектов

Примечание – Пять способов (языков) описания движения, и соответствующие им теории и принципы, сгруппированные по общим основаниям. Одинарные стрелки показывают направление выводимости уравнений, двойные стрелки указывают на их математическую эквивалентность, пунктирная стрелка – на возможную связь, предполагаемую в рамках нашего исследования.

Из рисунка 2 видно, что только один способ или язык описания успешно работает на всех трех масштабных уровнях – язык, использующий стационарное действие и объединяющий разные формы ПНД. Метод «интегралов по траекториям» предлагает объяснение ПНД классической и ПНД релятивистской механики, которые в свою очередь эквивалентны дифференциальным уравнениям движения объектов в мега и макромирах. Одновременно метод «интегралов по траекториям» объясняет принципы Гюйгенса и Ферма, лежащие в основе оптико-механической аналогии всей физики. С другой стороны, по выражению С. Вайнберга, метод «интегралов по траекториям» объясняет квантовую электродинамику – самую точную на сегодня физическую теорию, и является фундаментом квантовой теории поля [28, с. 403].

Если описанные здесь связи действительно существуют, то законы квантовой механики можно считать первичными для остальных теорий движения. Их связь с уравнениями других теорий осуществляется посредством ПНД в различных формах. Частные формы ПНД можно рассматривать как предельные случаи «интегралов по траекториям» для соответствующих граничных условий. Именно в этом может заключаться ответ на вопрос, почему и классические, и релятивистские объекты подчиняются единым принципам.

Однако, пока наши выводы являются лишь гипотезой, опирающейся на связи уравнений движения из различных теорий, а также на оптико-механическую аналогию. Но этого недостаточно, для обоснования гипотезы необходимо объяснить, почему происходит переход от одной теории к другой. Остается неясным сам механизм преобразования волновых функций в классические

траектории и релятивистские мировые линии. И как конкретно возможные траектории квантовых объектов преобразуются в действительные траектории макрообъектов?

3.2 Концепция «суммирования сосуществующих возможностей» – переход из возможности в действительность

Чтобы прояснить сущность механизма, по которому возможные движения преобразуются в действительные, рассмотрим эти понятия подробнее. Затем используя философские основания нескольких интерпретаций квантовой механики и метода «интегралов по траекториям», опишем возможный механизм суммирования сосуществующих альтернативных возможностей, по которому волновые функции квантовых объектов преобразуются в классические траектории и релятивистские мировые линии.

В первой главе мы выяснили, что почти все частные формы ПНД и вообще экстремальные принципы можно свести к единой форме: действительное состояние, процесс или движение системы отличаются от всех возможных при данных граничных условиях тем, что некий функционал, характеризующий систему в целом, стационарен и принимает экстремальное значение. К понятиям «действительное» и «возможное» в экстремальных принципах принято относиться как к метафорам. Обычно в них не вкладывается никакого физического содержания, тем более не предполагается никакая философская сущность. Однако, по нашему мнению, именно эти понятия играют ключевую роль в понимании механизма указанных принципов.

3.2.1 Философская идея возможного и действительного модусов существования

Объем философской литературы, посвященной категории *возможного*, довольно обширен. Аристотель ввел пару понятий: *динамис* – возможность и *энергейя* – действительность или то, что обрело форму, вид, эйдос, и указал: «все изменяется из существующего в возможности в существующее в действительности» [3, с. 385]. По выражению П.П. Гайденко, понятием «бытия в возможности» Аристотель опосредовал центральную онтологическую противоположность бытие-небытие [38, с. 282]. Позднее учение Аристотеля о модусах бытия развил Плотин. По учению Будды, всякое возможное проявление должно существовать потенциально, а значение понятия *небытие* можно понимать как *бытие потенциальное* [139, с. 144]. В статье «Буддийская философия» «Новой философской энциклопедии» отмечается, что согласно буддийской школе вайбхашика все, что мы наблюдаем, и мы сами – это поток мгновенно вспыхивающих элементов существования – дхарм, сменяющих друг друга настолько быстро, что кажется, будто мы и вещи неизменны. Дхармы настоящего существуют как проявленные, дхармы прошлого и будущего – как не проявленные. Дхармы в действительности не возникают и не исчезают, а лишь переходят с одной ступеньки существования на другую [112].

В средневековой схоластике *динамис* и *энергейя* были переведены на латынь как *потенция* и *акт*. Согласно Ф. Аквинскому мы видим, как все, что есть в мире, переходит из потенции в акт, но того, что есть в потенции, еще нет [Цит. по: 4, с. 859]. Н. Кузанский писал о движении: «В его сущности я прежде всего вижу возможность и вижу, что из последней происходит действительность, а из того и другого появляется движение, являющееся связью возможности и действительности» [81, с. 167]. Именно в единстве возможности, реализованной возможности и связующего их движения Кузанский видел троичность мира.

Позднее Г.В. Лейбниц выдвигает метафизическую гипотезу – «все возможное стремится к существованию», однако, так как иное с иным бывает

несовместимо, то иное возможное не доходит до осуществления. При этом из столкновения всех возможностей проистекает, что осуществляется тот ряд вещей, который содержит наибольший ряд возможностей. Этот ряд вместе с тем единственный определенный, как среди линий прямая, среди углов прямой, среди фигур наиболее вместительная, а именно окружность или шар [93, с. 235]. Лейбниц постулирует принцип наибольшего количества существования, объясняющий, почему если нужно пройти от одной точки к другой, причем направление линии не определено, то выбирается самый легкий и кратчайший путь. Если же от возможности следует перейти к действительности, то количество существования должно быть «наивозможно большим при данном возможном порядке существования» [Там же, с. 284]. Далее мы увидим, что эта идея Лейбница принципиально важна для нашей гипотезы.

Критическая философия И. Канта трактовала возможность и действительность в качестве априорных категорий модальности: что согласуется с формальными условиями опыта, то возможно, а что согласно с материальными условиями опыта, то действительно. Г. Гегель говорил о возможности и случайности как о моментах действительности, причем возможность – это внутреннее, а случайность – внешнее действительности [42, с. 318]. Для Гегеля реализованная возможность обретает все параметры существования в качестве действительности.

Н. Гартман в своей работе «Возможность и действительность» центральным модусом идеального бытия называет не действительность, как в реальном мире, а возможность. Первый основной модальный закон сферы реального бытия, по Гартману, таков: реально возможным является только то, все условия чего действительны. Причем возможность нового явления предшествует во времени его действительности [Цит. по: 50]. Гартман считал, что каждая из многих возможностей сама по себе является совершенно определенной. Неопределенной является лишь судьба каждой отдельной возможности, ее реализация. Прошлое определяет характер возможностей, но оно не может полностью определить, какая именно из возможностей осуществится: ведь реальные условия еще окончательно не созрели. Неопределенность свойственна не каждой отдельной

возможности и не их множеству, а только «выбору» одной возможности при отпадении всех других. Однако согласно концепции Гартмана, представление о множестве возможностей возникает не в силу их существования, а в силу ограниченности нашего познания.

Исторический анализ возможностей был также проведен в работе А.Ф. Лосева [96]. Категорию возможного с точки зрения философии исследовали Ж.-П. Сартр, Ж. Бодрийар, Ж. Делез. В середине XX в. в логике интенсивно разрабатывалась концепция логического негеоцентризма (Р. Монтегю, Д. Скотт, К. Донелан, С. Крипке, Х. Патнем, Я. Хинтикка и др.), где действительный мир постулируется лишь как один из возможных. Д. Льюис развил теорию «модального реализма», согласно которой возможные миры – это конкретные вселенные наряду с нашей, имеющие статус онтологической действительности. В концепциях Р. Адамса и А. Плантинга возможные миры провозглашаются аналогами платоновскому миру, построенному из абстрактных понятий и имеющему абстрактные свойства [См.: 258; 272]. В статье «Возможность и действительность» «Новейшего философского словаря» действительность в целом определяется как совокупность всех реализовавшихся возможностей, предметно совпадающую с феноменом наличного бытия [113].

В.П. Бранский и В.В. Ильин, проводя онтологический анализ категорий возможности и действительности, указывают, что действительность отдельного конкретного объекта – это его актуальное бытие в конкретных качественных и количественных, пространственных и временных характеристиках [21, с. 201–205]. В то же время возможность – это будущее объекта в его настоящем. Возможности «вызревают» в данной действительности, они – ростки нового, определенные тенденции, направления развития. Однако возможность не существует отдельно от действительности, а является одним из ее моментов, существует не рядом с действительностью, а в ней самой. Действительность в общем случае содержит в себе некоторый набор возможностей, а ее изменению присуща некоторая неопределенность. Каждая конкретная возможность вполне определена, но относительно неопределенной является судьба каждой отдельной возможности, ее реализации. Таким образом, изменение объекта – это

объективный «выбор» определенных возможностей из некоторого их множества. Возможность превращается в действительность, и для обозначения меры возможности следует использовать категорию вероятности в философском смысле как меру осуществимости некоторой возможности. Бранский и Ильин считают, что в единстве возможности и действительности именно последняя играет определяющую роль. Возможность существует на базе определенной действительности, в то время, как одна и та же действительность в общем случае содержит в себе многие возможности, одна и та же возможность не может одновременно быть источником многих действительностей.

По мнению В.П. Визгина, «в мире, где есть одна «действительность», где «возможности» не существует, не существует и времени, время есть создание и исчезновение, переоформление «пакета возможностей» того или иного существования» [34, с. 157]. Особую популярность в последние десятилетия приобрела тема виртуальной реальности, непосредственно связанная с рассматриваемой проблемой [См.: 5; 19; 36; 79; 163]. Например, центральный вывод С.С. Хоружего: виртуальная реальность – это недо-выступившее, недо-рожденное бытие [184]. По сути, онтологизируются два модуса бытия – недо-рожденное и рожденное. В статье «Виртуальность» (от лат. *virtualis* – возможный) «Новой философской энциклопедии» есть такие слова: «При частотной интерпретации вероятности виртуальность выступает как предрасположенность или диспозиция, физических систем к появлению частот наблюдаемых случайных событий. Все это показывает, что виртуальные частицы, состояния и диспозиции являются определенными аспектами становления реального бытия» [112]. Н.М. Солодухо исследует онтологическую концепцию небытия, где заложен заряд миллиардов возможностей, из которых реализуется в бытии всегда лишь одна [158]. Н.А. Носов развивает полионтический подход к виртуальной реальности [114].

3.2.2 Возможность и действительность в квантовой механике

Представление о категориях *возможное* и *действительное* будет неполным, если ограничиваться только их философским анализом. Такой же анализ, в большей или меньшей степени, производит каждая область научного знания. Ученые неоднократно подчеркивали важность решения философских проблем физики. М. Борн считал, что «философские вопросы об истинном значении наших слов так же важны, как и математический формализм» [14, с. 253], а «физика нуждается в обобщающей философии, ведь слово «реальность» – как и большинство слов – не имеет однозначного смысла» [16, с. 269]. Э. Шредингер очень удивлялся равнодушию физиков, принимающих современную интерпретацию квантовой механики просто потому, что она работает, не беспокоясь об обосновании [14, с. 255]. В.А. Фок писал: «Развитие новых идей, внесенных атомной физикой, требует разработки ряда философских вопросов... Вопросы эти возникают в связи с ... необходимостью рассматривать вероятность как фундаментальное понятие и отличать потенциально возможное от осуществившегося, с чем в свою очередь связана новая формулировка принципа причинности» [176]. Р. Пенроуз считает, что «онтология имеет для квантовой механики решающее значение, хотя в настоящее время она ставит вопросы, далекие от разрешения» [118, с. 656]. В.Л. Гинзбург писал о трех великих проблемах науки: интерпретация квантовой механики, возможность редукции (сведения) феномена жизни к физике, возрастание энтропии и необратимость [46].

Для решения одной из философских проблем квантовой механики, проблемы реальности и измерения, было создано несколько интерпретаций, так или иначе использующих понятия возможность и действительность. В. Гейзенберг считал, что квантовая механика возвращает нас к аристотелевскому понятию бытию в возможности, которое в момент измерения становится бытием действительным [43, с. 223]. По Шредингеру истинные законы квантовой механики «связывают в действительности с помощью уравнений все многообразие траекторий некоторой системы» [189, с. 691]. Единственной

реальностью в физическом мире для Шредингера являлись волны, и нет никаких частиц и квантов энергии, которые суть иллюзии, основанные на неправильной интерпретации явления резонанса интерферирующих волн в многомерном пространстве [14, с. 253–255].

Д. Бом развивал холистскую или голодинамическую интерпретацию, по которой только в момент извлечения из неопределенного или запутанного состояния целостного единства мы воспринимаем объект как реальный, хотя он существовал и до измерения. Как только измерение или взаимодействие прекращается, объект возвращается в имплицативное состояние мирового целого. Бом рассматривал не вещи, а многоуровневую иерархию этого мирового целого, одновременно содержащую статистическое описание систем нижнего уровня и однозначное динамическое описание систем верхнего уровня [13; 207]. Понятию «имплицативное запутанное состояние» здесь можно сопоставить понятие «состояние возможное».

Х. Эверетт в 1957 году предположил, что уравнение Шредингера однозначно предсказывает поведение частицы не только до измерения, но и после [218]. При этом все вероятности реализуются, но в разных «мирах». Это не означает, что существует множество разных реальных миров, имеются в виду разные проекции или образы одного мира, сосуществующие в виде квантовой суперпозиции Вселенной. Каждая проекция включает в себя объекты, окружающую их среду и экспериментаторов, в «соотнесенных состояниях». Во время измерения никакого коллапса волновой функции не происходит, все альтернативные состояния продолжают сосуществовать реально. Но поскольку отдельные состояния сознания экспериментатора перепутаны (соотносятся или коррелируют) с результатами измерения, то для каждого из возможных результатов измерения существует своя «проекция» экспериментатора в своем «мире». Каждая проекция экспериментатора получает свой результат, полагая, что лишь один этот результат и существует [См.: 118, с. 655].

Модификацией идей Боба, но без скрытых параметров, и идей Эверетта, но без размножения миров можно считать концепцию декогеренции [См., например: 105; 282], согласно которой система не рассматривается вне отношений с

окружающей средой, так как их состояния перепутаны. До измерения одновременно сосуществуют (находятся в суперпозиции) альтернативные состояния системы, волновые функции которых находятся в состоянии интерференции. В момент измерения система взаимодействует с окружающей средой в виде прибора и наблюдателя, в результате чего волновая функция одного из состояний изменяется так, что перестает интерферировать с остальными. В результате суперпозиция распадается, одно из альтернативных состояний выходит из перепутанного и неопределенного статуса в наблюдаемую реальность. По выражению П. Эткинза критерием выбора состояния является его устойчивость. Вместо коллапса следует говорить о декогеренции или рассогласовании альтернативных состояний системы за счет множества взаимодействий с другими объектами [199, с. 249]. Концепция декогеренции широко распространена в современной квантовой механике, причем ее сторонники, к которым, по мнению Р. Пенроуза, принадлежит известный физик С. Хокинг, обычно представляют себя как «позитивисты», которые не размениваются на «болтовню» относительно онтологии и заявляют, что не касаются вопроса о том, что «реально», а что «нереально» [118, с. 656].

Концепции многомировая, холистская и декогеренции используют понятия «миры», «запутанные состояния» и «альтернативы», но существуют концепции, которые с той же целью используют понятие «возможность». Например, В.А. Фок вслед за В. Гейзенбергом говорит о потенциальных возможностях и «осуществившемся» в результате измерения. Состояние, описываемое волновой функцией (его вероятность), отражает объективно существующие при данных условиях (независящие от наблюдателя) потенциальные возможности [177]. В опыте осуществляется один из потенциально возможных результатов, предусмотренных первоначальной волновой функцией, и этому результату соответствует новая волновая функция, а вероятность того или иного поведения объекта в данных условиях есть численная оценка потенциальных возможностей этого поведения [176]. По Фоку, дуализм волна-частица – одно из проявлений различных потенциальных возможностей. Однозначной причинностью можно связывать или только возможные состояния – через уравнение Шредингера, или

только действительные состояния – через однозначные уравнения. В итоге Фок делает принципиальный вывод о том, что вероятностная форма законов природы – объективна, а детерминистическая форма – наше упрощение.

К. Поппер, первоначально, будучи приверженцем ансамблевой интерпретации, в 50-е годы XX века перешел к пропензитивной интерпретации и стал исходить из «объективного» понятия вероятности как возможности или потенции в смысле философии Аристотеля [См.: 119]. По Попперу, волновая функция описывает не свойства объектов, а их диспозиции (потенции, предрасположенности) проявлять те или иные свойства в процессе измерения. Квантовая реальность – это реальность не актуальных, всегда имеющихся свойств объектов, а реальность их предрасположенностей к некоторому поведению, причем: «предрасположенности так же реальны как силы или силовые поля» [130, с. 17]. Переход из возможного в реальное у Поппера – процесс индетерминистичный, но его индетерминизм – не синоним полной случайности, отрицающей свободу как неотъемлемую часть причинности в наблюдаемой эволюции жизни. Развитие по Попперу – в целом неосознанный процесс управления с обратной связью, осуществляемый методом проб и ошибок путем вариаций различных конкурирующих проблем, целей и решений [131, с. 234–247].

Теорию пропензитивности как реализации предрасположенностей рассматривают Д. Джилис [223], Л.Б. Баженов [9], Н.Ф. Овчинников [116]. А. Брессан путем логических рассуждений обосновал необходимость введения в физику понятия реальной возможности [209]. Аналогичные идеи высказывали Д. Льюис [240] и С. Маккол [244]. Опираясь на эти представления, Н. Белнап описал варианты причинности в модели ветвящегося пространства-времени [205]. Он указывает, что причинная связь может иметь место между настоящим событием и двумя возможными будущими событиями, представляющими взаимоисключающие возможности занятия одного и того же «места» в пространстве-времени. Белнап формулирует принцип причинности: если нечто возможное становится существующим, то в его прошлом можно обнаружить определенную точку выбора из нескольких возможностей. Белнап предлагает рассматривать возможные исходы как объективно существующие. Из

теории «возможных миров» он заимствует идею о том, что элементарную возможность можно представить как множество историй. В других работах М. Вейнера, Н. Белнапа, Т. Мюллера рассматривается связь объективных возможностей с вероятностью [206; 248; 280] и с квантовой механикой [249; 250].

У интерпретаций волновой функции как перехода из состояния возможного в действительное остаются два существенных недостатка. Во-первых, неясен сам механизм перехода из возможности в действительность, во-вторых, непонятна связь предлагаемых моделей с уже известными законами других разделов физики. Для преодоления этих недостатков мы используем метод «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана, уже описанный в предыдущих разделах, объединив его с несколькими интерпретациями квантовой механики, а также с философской концепцией двух модусов существования – действительного и возможного.

3.2.3 Основные понятия механизма интерференции траекторий квантовых объектов

Дадим основные определения, основанные на идеях Э. Шредингера, В.А. Фока, Д. Бома, Р. Фейнмана, Р. Пенроуза [118], В. Зурека [67], а также Дж. Гринштейна и А. Зайонца [53, с. 178].

Состояние объекта – совокупность характеристик объекта (координата, импульс, спин и др.) в n -мерном конфигурационном пространстве

Траектория объекта – совокупность состояний объекта в n -мерном конфигурационном пространстве в разные моменты времени.

Волновая функция или амплитуда вероятности – описывает одно из возможных альтернативных состояний (траекторию или эволюцию во времени) квантового объекта и выражается комплексным числом. Вероятность действительного состояния или обнаружения объекта в конкретной точке n -мерного конфигурационного пространства равна квадрату модуля амплитуды вероятности этого состояния.

Суперпозиция – совместное одновременное существование возможных альтернативных, не зависящих друг от друга, состояний (траекторий) объекта, несовместимых в наблюдаемой действительности. Квантовый объект является суперпозицией всех его возможных альтернативных состояний (траекторий), который описывается как «пакет» волновых функций.

Когеренция – согласованность возможных альтернативных состояний (траекторий) квантового объекта, находящихся в суперпозиции. Согласованность означает постоянство разности фаз волновых функций, описывающих альтернативные состояния (траектории), для этого фазы должны быть зависимыми друг от друга. Согласованные или когерентные альтернативные состояния (траектории) интерферируют друг с другом.

Интерференция – суммирование когерентных возможных альтернативных состояний (траекторий) путем сложения фаз волновых функций их описывающих.

Смешанное состояние – совокупность совместно существующих действительных состояний разных объектов. Такие действительные состояния не когерентны, а значит, не интерферируют друг с другом.

Перепутанные состояния (траектории) – альтернативные состояния (траектории) разных объектов, зависящие друг от друга так, что невозможно выделить одно из них, не изменив все остальные. Каждое из альтернативных состояний (траекторий) каждого объекта всегда перепутано с альтернативными состояниями (траекториями) других объектов (окружающей средой). Когда альтернативные состояния (траектории) одного объекта интерферируют друг с другом и образуют действительное состояние (траекторию) этого объекта, одновременно (с бесконечной скоростью, то есть нелокально) изменяются альтернативные состояния (траектории) других объектов, которые были перепутаны с интерферирующими альтернативными состояниями (траекториями) этого объекта.

Декогеренция – процесс нарушения когеренции возможных альтернативных состояний (траекторий) одного объекта за счет взаимодействий с состояниями (траекториями) других объектов, которые являются перепутанными с этими альтернативными состояниями (траекториями). Нарушения когеренции

происходит из-за непрерывного и случайного изменения разности фаз волновых функций перепутанных состояний (траекторий). Рассогласование приводит к распаду суперпозиции альтернативных состояний (траекторий) системы. На русском языке этот процесс подробно описан в книге М.Б. Менского [105].

Опишем процесс, происходящий с траекторией квантовой частицы, в соответствии с моделью «интегралов по траекториям» [См.: 169], используя определения, введенные выше. Предположим, что частица движется из начальной точки в конечную одновременно по всем альтернативным траекториям, возможным в данных граничных условиях. Возможные траектории находятся в суперпозиции, то есть являются когерентными, а значит, их волновые функции интерферируют между собой. В результате интерференции или сложения фаз волновые функции гасятся в конечной точке так, что траектория с максимальной вероятностью и есть действительная или, точнее, наблюдаемая траектория. Все остальные альтернативные траектории продолжают существовать, но поскольку их вклад в результирующую траекторию относительно мал, они остаются для нас ненаблюдаемыми. Для свободной частицы наблюдаемая траектория – прямая линия, точнее, геодезическая, и в конечном пункте траектории она будет регистрироваться как точка.

Если, как в эксперименте с двумя щелями, на пути движения частицы поставить непроницаемую перегородку с двумя отверстиями, то частица продолжит двигаться одновременно по всем альтернативным траекториям, возможным в данных условиях. Но теперь условия изменились, а значит, возможные альтернативные траектории частицы изменились под влиянием перепутанных с ними состояний частиц перегородки. Часть альтернативных траекторий перестали быть когерентными с другими альтернативными траекториями – произошла их декогеренция, а их волновые функции вышли из «пакета» волновых функций, описывающего траекторию частицы. Изменилась суперпозиция альтернативных траекторий, а значит, и результат их интерференции – действительные траектории. Последние имеют максимальную вероятность или, точнее, локальные максимумы в распределении плотности

вероятности. Совокупность таких действительных траекторий в конечном пункте будет регистрироваться как набор полос разной интенсивности.

Если теперь мы захотим узнать, через какое из отверстий в перегородке проходит действительная траектория частицы, мы должны рядом с отверстиями расположить детектор. Как только мы путем измерения обнаруживаем отверстие, через которое проходит частица, интерференционная картина в конечном пункте исчезает. В момент измерения, то есть взаимодействия с прибором возможные альтернативные траектории частицы изменяются под влиянием перепутанных с ними состояний частиц прибора. Часть альтернативных траекторий перестает быть когерентными с другими альтернативными траекториями, происходит следующий этап декогеренции. Снова изменяется суперпозиция альтернативных траекторий, изменяется и результат их интерференции – действительная траектория.

Действительная траектория является максимально устойчивой в данных граничных условиях. Математически она описывается максимальной вероятностью или распределением максимальных вероятностей в n -мерном конфигурационном пространстве. Если каждую альтернативную траекторию из точки a в точку b описать волновой функцией или амплитудой вероятности со своей фазой, то вероятность действительной траектории будет равна квадрату модуля суммы фаз или вкладов волновых функций (амплитуд вероятности) каждой из альтернативных траекторий, в результате интерференции которых возникла эта действительная траектория.

Таким образом, совокупность механизмов декогеренции и интерференции является способом отбора одной из возможных сосуществующих альтернативных траекторий, которая в результате и станет действительной. Мы имеем следующую цепочку:

а) в результате интерференции волновых функций возможных альтернативных траекторий возникает траектория с максимальной вероятностью или действительная траектория, которая может быть наблюдаема;

б) состояния частиц других объектов (перегородки, прибора, наблюдателя и т.д.), перепутанные с некоторыми возможными альтернативными траекториями частицы, изменяют эти траектории;

в) часть альтернативных траекторий частицы перестает быть когерентными с другими альтернативными траекториями – происходит их декогеренция;

г) в результате интерференции (сложения фаз) нового измененного «пакета» возможных альтернативных траекторий возникает новая траектория с максимальной вероятностью или новая действительная траектория.

3.2.4 Механизм «суммирования возможностей»

Сформулируем основную гипотезу, лежащую в основе концепции «суммирования сосуществующих возможностей». Каждая возможная альтернативная траектория (или состояние) объекта, описываемая волновой функцией или амплитудой вероятности, отражает объективно существующую в данных граничных условиях возможность движения (состояния) объекта. Это не метафора, не фигуральное выражение, не плод воображения, а возможная траектория и возможное состояние в онтологическом смысле, то есть имеющие определенную степень существования. Под граничными условиями здесь подразумеваются любые внешние объекты – другие частицы, поля, приборы или наблюдатели.

Другая часть гипотезы состоит в том, что действительная траектория (состояние) – это одна из возможных траекторий (состояний). Именно эта действительная траектория воспринимается как реальная другими действительными объектами, в т.ч. приборами и наблюдателями. Переход от многих возможных траекторий (состояний) к одной действительной или от многих потенциальных к единственной осуществившейся происходит при каждом

взаимодействии объекта с другими объектами. Эту траекторию (состояние) можно называть «реализованной», все остальные объекта следует называть «возможными». Между ними есть принципиальная разница. Объект находится сразу или одновременно на всех возможных траекториях (во всех возможных состояниях), но может находиться только на одной действительной траектории (в одном действительном состоянии).

Переформулируем описанный ранее процесс образования действительной траектории, заменив понятие *альтернативная траектория* на понятие *возможное движение* или *возможность*, как модус существования. Тогда можно сказать, что объект находится во всех возможных в данных условиях движениях или использует все возможности для движения. Все возможности объекта находятся в суперпозиции, то есть являются согласованными, а значит, суммируются между собой путем интерференции. В результате часть возможностей гасятся так, что результирующая возможность с максимальной вероятностью становится действительным движением объекта. Все остальные возможности продолжают существовать и участвовать в суперпозиции, но поскольку их вклад в результирующую возможность относительно мал, они остаются не наблюдаемыми.

Что произойдет, если действительные движения двух объектов пересекутся в одной точке пространства-времени? Движение каждого объекта есть суперпозиция или «пакет» всех его возможностей движения. При взаимодействии (столкновении) возможности каждого объекта изменятся. Часть из них перестанет быть когерентными (декогеренция), а часть, ранее не когерентных, наоборот, станет когерентными (когеренция). Как следствие изменятся «пакеты» суммирующихся возможностей, изменятся соотношения их вкладов (фаз амплитуд вероятностей). Одновременно с этим изменятся действительные движения обоих объектов, причем опять так, что новые действительные движения будут обладать максимальной вероятностью.

Обобщая можно предположить, что совокупность действительных движений (состояний) образует действительную реальность, а совокупность возможностей или возможных движений (состояний) образует реальность

возможную. И та, и другая сосуществуют «параллельно» в каждой точке n -мерного пространства любой топологии. Параллельность – это не только одновременность во времени, связанным с трехмерным пространством, но и одновременность во всех возможных временах всех возможных пространств.

Описанная выше модель согласуется не только с философскими концепциями возможного и действительного модусов существования, но и с современными исследованиями в области философии физики. Например, А.Ю. Севальников указывает, что точку зрения на результат измерения как «осуществившееся потенциальные возможности» разделяет достаточно большое число физиков и философов как у нас, так и за рубежом» [154, с. 75]. Севальников обосновывает полионтичную или многомодусную модель квантовой механики, которая, по его мнению, является не «метафорой», а отображает действительные черты реальности [Там же, с. 181]. Он рассматривает понятие «сосуществующие возможности», означающее, что одна возможность может пересекаться с другой или включать ее в себя [Там же, с. 98]. Динамическое, непрерывное изменение волновой функции, описываемое уравнением Шредингера, описывает происходящее на уровне «потенциальных возможностей», или то, что еще реально, действительно не существует, не актуализировалось. Только во время измерения, когда вмешивается «иное», скажем прибор, экспериментальная установка, происходит о-существование, актуализация возможного. Севальников считает, что уравнение Шредингера описывает грань между уровнем бытия возможного и бытия действительного, аппарат, описывающий классический мир, то есть мир актуальный, явленный – это аппарат классической физики. В то время, как математический формализм квантовой механики описывает становление [Там же, с. 143].

М.Б. Менский, отстаивая многомировую интерпретацию квантовой механики, упоминает о фейнмановских интегралах по путям как о наглядном образе и математически точном понятии. Он соглашается с тем, что квантовая система движется «одновременно» по всем возможным путям, но выбор – какую из возможных реальностей для себя реализует взаимодействующий субъект, делает, по мнению Менского, только этот субъект с помощью своего сознания

[106, с. 174]. Ю.В. Сачков указывает, что обычно обращают внимание на то, как вероятность содействует пониманию трактовке квантовых процессов и практически не обращается внимания на обратные связи, как квантовая теория воздействует на понимание самой вероятности [149]. В этой же работе Сачков приводит высказывание Ф. Дайсона: «Материя, согласно квантовой механике не есть инертная субстанция, но является активным агентом, постоянно делающим выбор между альтернативными возможностями согласно вероятностным законам» [214, р. 5]. М.Э. Омеляновский пишет, что волновая функция описывает не частицу «саму по себе», а потенциальные возможности взаимодействия ее с прибором [117, с. 11]. Ю.Н. Малашенко отмечает, что формула измерительного акта является математическим выражением процесса разрешения диалектического противоречия между возможным и действительным, а в уравнении Шредингера описывается процесс изменения самих возможностей. Малашенко выдвигает онтологическое предположение, что электрон в эксперименте на двух щелях не просто обнаруживается в той или иной щели, а создается, возникает как действительное, локализованное в щели квази-макрообразование. До этого существуют онтологические возможности его возникновения или становления, эти возможности актуализируются в форме бытия микрообъектов [99].

М. Редхед различает три интерпретации квантовой механики, обеспечивающих ее понимание. Интерпретацию в рамках программы скрытых переменных, интерпретацию диспозиций и потенциальных возможностей и ортодоксальную копенгагенскую интерпретацию [142]. Р. Пенроуз, говоря об ожидаемых революционных изменениях во взглядах на онтологию квантовых явлений, указывает, что в них должно быть проявлено уважение к высокоорганизованной лагранжево-гамильтоново геометрической структуре ньютоновской теории [118, с. 661]. По мнению В. Зурека принцип суперпозиции, бывший источником трудностей для интерпретации квантовой теории, стал главной опорой научного подхода к обработке квантовой информации [67].

Небольшое число исследований посвящено проблеме реальности возможных траекторий в методе «интегралов по траекториям», а также

реальности виртуальных частиц в диаграммах Фейнмана. Например, В.В. Афанасьева считает, что для квантовой физики виртуальные микрообъекты вовсе не являются умозрительной абстракцией, а существуют физически, хотя и обладают, в отличие от реальных аналогов, особыми свойствами: их существование не регистрируется приборами, а наблюдается опосредованно при взаимодействии реальных частиц. Каждая реальная частица движется по реально наблюдаемой траектории, образующейся в результате суперпозиции (наложения) виртуальных или ненаблюдаемых [8, с. 104].

М. Шарлов рассматривает так называемую реалистическую интерпретацию «интегралов по траекториям», согласно которой частицы действительно следуют по всем возможным траекториям, вносящим вклад в интеграл. Он отмечает: «вопрос, действительно ли частицы следуют по всем путям, считается бессмысленным и нефизическим... однако с философской точки зрения было бы интересно спросить, – А что означает в действительности «интеграл по траекториям»? Это реальные траектории или удобный формализм для вычисления? [264]. Шарлов указывает, что главный аргумент против реалистической трактовки «интеграла по траекториям» – очевидный конфликт с принятыми представлениями о пространстве-времени. Однако этот конфликт снимается, если мы предположим «ветвление» структуры пространства-времени, напоминающее разветвления истории в многомировой интерпретации квантовой механики. Ветвление пространства-времени было использовано в интерпретации квантовой механики и в философском анализе индетерминизма (Н. Белнап [205], С. МакКолл [245], Р. Дуглас [213]). Основное реальное возражение против такого ветвления, так же как и против многомировой интерпретации, является философским, и основывается на угрозе бесконечного умножения объектов или наблюдателей из-за разветвления траектории. Шарлов особо обращает внимание, что большинство приложений ветвления пространства-времени в квантовой механике – это философские интерпретации, а не эмпирические гипотезы, так что оценка этих интерпретаций является задачей философии, а не физики.

М. Валенте отмечает, что в философских исследованиях квантовой теории поля принят взгляд на диаграммы Фейнмана и используемые в них виртуальные

частицы, как на формальные инструменты для расчетов [275]. Например, М. Бунге называет виртуальные частицы фикциями, которые не имеют законного места в физической теории [211], а Ф. Рорлих считает, что виртуальные частицы – это артефакт теории возмущений в свободном состоянии частицы [262, р. 363]. Для Т. Фокса, виртуальные частицы служат лишь символом взаимодействия, и являются просто живописным описанием приближенного математического метода [221]. Б. Фалкенбург говорит о виртуальных частицах как о формальных расчетных инструментах [219]. Сам же М. Валенте рассматривает альтернативную точку зрения о том, что виртуальные частицы отражают реальные процессы взаимодействия частиц. Чтобы избежать противоречий с наблюдаемой действительностью, достаточно не рассматривать взаимодействие квантовых частиц как процесс в классическом пространстве-времени. В этом он следует Р. Фейнману, который считал, что именно виртуальные частицы отражают реальную картину физического процесса.

Важной роли механизма декогеренции в решении проблем квантовой механики посвящена статья «Стенфордской энциклопедии философии» [203]. Дж. Гринштейн и А. Зайонц считают, что за миром объектов, кажущихся независимыми, скрывается царство перепутанных состояний, в котором простые понятия причинности и локальности больше не применимы. События, которые кажутся нам случайными, в действительности, могут быть связанными с другими событиями, происходящими в другом месте [53, с. 201]. Если суперпозиция – это сосуществование возможностей, при котором возможна интерференция, то смешанное состояние – это совокупность действительных состояний, при которых из-за декогеренции интерференции невозможна [Там же, с. 205–217]. Авторы отмечают, что не все исследователи согласны с тем, что концепция декогеренции решает проблему измерения, о чем в настоящее время ведутся интенсивные дебаты. Есть минимум два аргумента против – процесс декогеренции может быть обратимым и когерентность может быть восстановлена. Кроме того, по словам М. Каку, теория декогеренции не решает вопрос, беспокоивший Эйнштейна: каким образом природа «выбирает» финальное

состояние? В ответ на этот вопрос теория декогеренции просто хранит молчание [70].

Следующий этап нашего исследования заключается в выяснении, каким образом концепция «суммирования сосуществующих возможностей» и вероятностная интерпретация ПНД способна помочь в решении некоторых философских и методологических проблем ПНД, перечисленных во второй главе.

3.3 Объединение частных форм ПНД на основе их вероятностной интерпретации

Выше мы изложили гипотезу «суммирования сосуществующих альтернативных возможностей», как возможные движения квантовых объектов становятся движениями действительными. Еще ранее было показано, что законы квантовой механики, выраженные с помощью «интегралов по траекториям», являются первичными для остальных теорий движения, а их связь с уравнениями этих теорий осуществляется посредством различных форм ПНД. Теперь попытаемся применить концепцию «суммирования сосуществующих возможностей» к макрообъектам. Для этого сформулируем обобщенную форму ПНД на языке квантовой вероятности с использованием возможного и действительного модусов существования. Начнем с того, что кратко повторим изложенные ранее аргументы, почему такие обобщения можно считать обоснованным.

Аргумент первый. Есть основание полагать, что ПНД, как и все экстремальные принципы, напрямую связаны с понятием вероятности. Об этом писали К. Гаусс, А. Эддингтон, Э. Шредингер, Р. Фейнман и др.

Аргумент второй. В научном сообществе существует тенденция считать вероятностный подход самым фундаментальным для описания любых процессов

в природе. Эта тенденция особенно усилилась с развитием квантовой механики и наук о сложных саморазвивающихся системах. Вероятностное описание лежит в основе парадигмы постнеклассической науки.

Аргумент третий. Метод «интегралов по траекториям» квантовой механики может объяснить ПНД классической и релятивистской механики, которые в свою очередь эквивалентны соответствующим дифференциальным уравнениям движения. Одновременно этот метод объясняет принципы Гюйгенса и Ферма, лежащие в основе оптико-механической аналогии. С другой стороны, метод «интегралов по траекториям» объясняет квантовую электродинамику, являясь фундаментом квантовой теории поля. Таким образом, связь законов квантовой механики с уравнениями других теорий движения осуществляется посредством ПНД в его различных формах, которые можно рассматривать как предельные случаи «интегралов по траекториям» для соответствующих граничных условий. «Интегралы по траекториям» объединяют геометрический и вероятностный языки описания природы, а значит, дают возможность описать переход от вероятностной причинности к причинности однозначной.

Аргумент четвертый. Законы симметрии и сохранения различных физических величин применимы для объектов любых масштабов. Существует тесная связь между этими законами и вариационными принципами. Она сформулирована в теореме Э. Нетер.

Аргумент пятый. Вариационные и экстремальные принципы широко используются не только в механике, но также в термодинамике, космологии, теории информации и биологии. При этом все они строятся по единой схеме, все используют понятия «действительные» и «возможные» траектории, а условием отбора одной действительной траектории из всех возможных при данных граничных условиях является экстремальность некоего функционала, характеризующего систему в целом.

Аргумент шестой. Общемировая философская традиция рассматривать возможное и действительное как модусы существования объектов постепенно распространяется на объекты любой природы и любого масштаба. Идея двух модусов существования стала особенно актуальна в связи с проблемой измерения

квантовых объектов, и в разной степени включена в популярные интерпретации квантовой механики.

Аргумент седьмой. Несколько современных философских теорий описывают вероятностную причинность и объясняют соотношение виртуальной и наблюдаемой реальностей через возможный и действительный модусы существования. Этот подход разделяют и некоторые ученые.

Аргумент восьмой. Согласно последним научным экспериментам явления интерференции и декогеренции объектов, находящихся в суперпозиции, наблюдаются не только для квантовых объектов, но и для систем, которые можно считать макрообъектами [См.: 53, с. 32].

Аргумент девятый. Обобщенная вероятностная интерпретация ПНД соответствует вероятностной форме представления экстремальных принципов неравновесной термодинамики, теории информации и биологии.

3.3.1 «Суммирование возможностей» для классических объектов

Опираясь на перечисленные аргументы, перенесем логику суммирования сосуществующих альтернативных возможностей на макрообъекты. Как было показано выше, метод «интегралов по траекториям» в классическом пределе трансформируется в ПНД, гласящий, что из всех возможных траекторий объект следует по траектории, вдоль которой действие минимально (стационарно). В релятивистском случае это правило соответствует принципу максимального собственного времени. Обобщим в таблице 1 описание перехода от возможных альтернативных траекторий квантового объекта к действительным траекториям объекта классического.

Таблица – 1 Переход от возможных траекторий квантовых объектов к действительной траектории классического объекта

	«Интегралы по траекториям» Фейнмана	Классическая механика Гамильтона
Возможная траектория	Одна из возможных в данных условиях траекторий с собственной волновой функцией и фазой (квантовое действие / постоянная Планка)	Одна из возможных в данных условиях траекторий в 4-мерном пространстве-времени со своим классическим действием
Все возможные траектории	«Пакет» всех возможных в данных условиях альтернативных траекторий в суперпозиции	Сумма всех траекторий, возможных в данных условиях
Действительная траектория	Суммарная траектория с максимальной амплитудой вероятности и минимальным изменением фазы (квантового действия), полученная путем интерференции «пакета» возможных траекторий в суперпозиции	Классическая траектория (геодезическая линия) с экстремумом классического действия

Следующим шагом используем термины возможного движения или возможности как одного из модусов существования. Под возможным движением будем подразумевать возможные траектории, объединяющие последовательность отдельных возможных состояний. Вклад каждой возможности объекта в его действительное движение пропорционален классическому действию этой конкретной возможности. Каждому возможному движению соответствует волновая функция или амплитуда вероятности этого движения. Когда объект становится не квантовым, а классическим, то есть размер объекта становится существенно больше длины волновых функций его возможных движений, то «пакет» возможностей, вносящих значительный вклад в вероятность действительного движения такого объекта, сокращается до узкого пучка. Чем

больше размер объекта, тем это действительное движение ближе к движению, предсказанному одной из форм ПНД. Мы имеем следующую последовательность:

- квантовый размер объекта → макроскопический размер объекта
- квантовое действие → классическое действие
- максимальная вероятность → минимум или максимум одной из функций
- «интегралы по траекториям» → одна из форм ПНД
- «пакет» всех возможных траекторий в суперпозиции → действительная классическая траектория
- возможное существование → действительное существование
- квантовая реальность → классическая реальность

Предположим, что принципиальной онтологической разницы между квантовой и классической реальностью не существует, поскольку, по сути, такое предположение излишне. Теперь предположим, что механизмы декогеренции и интерференции происходят одинаково как на квантовом, так и на классическом и релятивистском масштабах. Это значит, что на всех масштабах размеров объектов возможные движения или состояния переходят в действительные. Разница лишь в том, что с точки зрения классических объектов, которыми являемся и мы сами, и наши приборы, классическая реальность состоит только из смешанных (не интерферирующих друг с другом) состояний. Причина в том, что на суперпозицию возможностей классического объекта влияет огромное число перепутанных движений (состояний) окружающих объектов. Из-за этого влияния в результате декогеренции из суперпозиции постоянно выпадает большая часть возможностей, которая не реализуется в классическую реальность.

В переходе от квантового состояния к классическому особую роль играет устойчивость. Например, П. Эткинз подчеркивает, что суперпозиция (интерференция) возможных состояний означает то, что ни одно из них не устойчиво. Малые локальные отклонения происходят постоянно, но если ни одно из них не подкрепляется взаимодействием с другими объектами (их волновыми

функциями), то все они сосуществуют одновременно. Как только одно из возможных состояний (локальных отклонений) вступает во взаимодействие с другой волновой функцией другого объекта, они образуют новую волновую функцию, теперь действительную. Иначе говоря, объект «выбирает» один из вариантов движения, и этот новый вариант является более устойчивым, чем суперпозиция возможных состояний. Таким образом, классическое состояние есть устойчивый вариант вероятностного состояния (одного из его возможных составляющих), обладающий максимальной вероятностью. А разница между квантовым и классическим описанием не в том, что там действуют разные законы – классические и Шредингера, а в том, что сложная система за счет многих взаимодействий делает устойчивым одно из своих возможных состояний [199, с. 249].

Действительное движение, в отличие от всех возможных движений, наиболее устойчиво, что проявляется в стационарности или неизменности во времени его характеристик. Можно предположить, что устойчивость и стационарность – результат сложения двух типов возможностей объекта. С одной стороны, это возможности сохранить движение объекта при данных граничных условиях, иначе говоря, сохранить свободу объекта от влияния данной окружающей среды (других объектов). С другой стороны, это возможности изменить движение объекта в данных граничных условиях под влиянием окружающей среды (других объектов). Пока граничные условия не меняются, устойчивость и стационарность действительного движения сохраняются. При каждом изменении граничных условий изменяются возможности сохранения и изменения движения, результатом их сложения становится новое действительное движение – устойчивое и стационарное в новых граничных условиях.

Возможные движения, не ставшие действительными или нереализованные в действительности, продолжают существовать в возможном модусе. Каждый из существующих в действительности объектов любого размера вносит свой уникальный вклад в формирование как классической, так и квантовой реальности. И чем больше таких объектов, тем меньше влияние отдельного объекта. Поэтому может создаться впечатление, что реальность вокруг нас является «объективной»,

то есть независимой от конкретного объекта или субъекта. Но как мы уже отмечали, с онтологической точки зрения такая объективность мира – лишь конструкция, удобная для познания. По выражению Г.Я. Мякишева «нам лишь кажется, что природа выбирает однозначный классический путь. На самом деле участвуют все возможные пути... Классическая траектория просто наиболее вероятна» [109, с. 159]. Другими словами, окружение индуцирует правило суперотбора, которое приводит к наблюдаемости некоторых суперпозиций. Только состояния, которые выживают в этом процессе, могут стать классическими [См.: 67].

Проиллюстрируем в таблице 2 процесс, аналогичный переходу, описанному в таблице 1, но уже в терминах суммирования сосуществующих альтернативных возможностей. Для наглядности добавим между возможным и действительным модусами существования промежуточную ступень – «пакет» возможностей, находящихся в суперпозиции.

Теперь проследим, что происходит с действительным движением двух классических объектов при их взаимодействии. Имеются в виду не только механические столкновения, это могут быть взаимодействия посредством любых физических сил и полей. Рассмотрим на рисунке 3 два классических объекта A и B до и после их взаимодействия. Обозначим через A_{P-S} и B_{P-S} – «пакеты» когерентных возможных альтернативных (в состоянии суперпозиции) движений каждого объекта до взаимодействия. В результате интерференции (сложения фаз) «пакетов» образуются действительные движения – A_R и B_R . При любом взаимодействии объектов часть возможных альтернативных движений соответствующих «пакетов» каждого объекта перестает быть когерентными – происходит их декогеренция. И, наоборот, часть, ранее некогерентных возможных альтернативных движений, таковыми становится. В результате после взаимодействия образуются новые «пакеты» когерентных возможных альтернативных движений в состоянии суперпозиции – A'_{P-S} и B'_{P-S} , которые путем интерференции образуют действительные движения A'_R и B'_R . Другая часть возможных движений – A'_P и B'_P – после взаимодействия остаются в возможном модусе существования.

Таблица – 2 Переход от возможных траекторий к единственной действительной траектории в терминах суммирования сосуществующих альтернативных возможностей

Модус существования	Квантовый объект	Классический объект
Возможность	Одно из альтернативных возможных движений в n-мерном пространстве со своей фазой	Одно из возможных в данных условиях движений в 4-мерном пространстве-времени со своим классическим действием
«Пакет» возможностей	«Пакет» когерентных альтернативных возможных движений, сосуществующих в суперпозиции	«Пакет» всех возможных, но несовместимых в данных условиях движений в 4-мерном пространстве-времени
Действительность	Действительное движение, результирующее всех возможных движений путем интерференции (сложения фаз). Обладает максимальной амплитудой вероятности и минимальным изменением фазы (квантового действия)	Классическая геодезическая траектория с экстремумом стационарного классического действия. Является наиболее устойчивой, обладает максимальной вероятностью по сравнению с остальными возможными движениями

Интересно, что для каждого модуса существования одно и тоже взаимодействие двух объектов описывается разными способами. С точки зрения возможных движений, взаимодействие описывается на языке «интегралов по траекториям» через амплитуды вероятности и сложение их фаз. С точки зрения действительных движений взаимодействие описывается на языке геометрии 4-мерного пространства-времени через ПНД или эквивалентные ему дифференциальные уравнения движения.

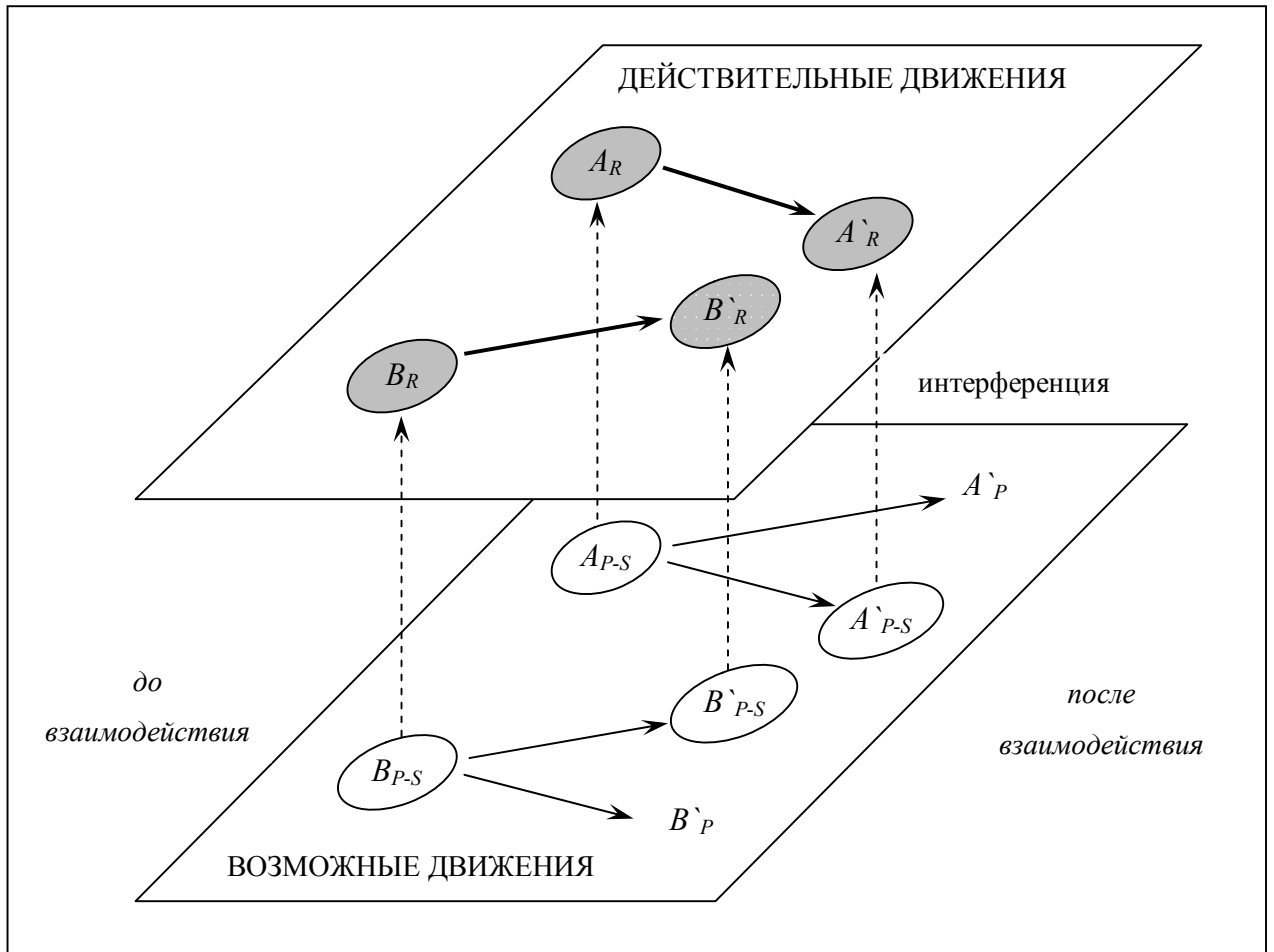


Рисунок – 3 Изменение «пакета» возможных движений двух классических объектов после их взаимодействия

Чтобы на бытовом языке представить, как фейнмановские интегралы могут быть применимы к обычным объектам, приведем выдержку из книги М. Каку. «Представим, что вы хотите пройти через комнату. По Ньютону, вы просто-напросто выберете кратчайший путь от точки А к точке Б, называемый классическим. Но по Фейнману, прежде всего вы должны учесть все возможные пути, соединяющие точки А и Б. Это означает, что вы должны принять во внимание пути, которые приведут вас на Марс, Юпитер, к ближайшей звезде, даже те пути, которые ведут назад во времени, к моменту Большого Взрыва. Не имеет значения, насколько сумасшедшими и причудливыми будут эти пути, — вы все равно должны их учитывать. Фейнман приписал каждому пути определенную

величину. Самым чудесным образом, сложив эти величины всех возможных путей, вы находите вероятность перехода из точки А в точку Б, которая дается обычной квантовой механикой. Фейнман обнаружил, что избранный на основе здравого смысла ньютоновский путь обладал максимальной итоговой величиной — это был путь с наибольшей вероятностью. Таким образом, наше представление о физической вселенной, основанное на здравом смысле, является просто-напросто наиболее вероятным состоянием из бесконечного количества возможных. Иными словами, как бы странно это ни выглядело, каждый раз, как вы идете через комнату, ваше тело заблаговременно «обнюхивает» все возможные пути, даже те, что ведут к далеким квазарам, а затем все их складывает» [70, с. 190].

3.3.2 Вероятностная формулировка экстремальных принципов

Используем концепцию «суммирования сосуществующих возможностей» для формулировки ПНД в вероятностной форме с использованием категорий возможность и действительность. В первой главе мы перечислили несколько обобщенных формулировок экстремальных принципов. Вспомним, что все они делятся на два типа: дифференциальные принципы рассматривают состояние системы в отдельные моменты времени, а интегральные принципы рассматривают весь путь системы целиком между конкретными состояниями за конкретный промежуток времени. Оба типа принципов применимы для движений, траекторий или процессов в любом n -мерном пространстве. В качестве функционала может выступать действие, принуждение, время, длина геодезической линии, разница термодинамических потенциалов, разница форм энергий, кривизна, изменение фазы, взаимная информация, вероятность и т.д. Рассмотрим интегральные принципы, хотя аналогичные рассуждения применимы и для дифференциальных принципов.

Обычная формулировка интегрального экстремального принципа, в том числе ПНД: действительная траектория системы (процесса в системе) из начального состояния в состояние конечное отличается от всех возможных при данных граничных условиях траекторий тем, что вдоль нее некий функционал, характеризующий систему в целом, стационарен и принимает минимальное (в т.ч. локально) или максимальное значение.

Краткая вероятностная формулировка экстремального принципа, применимая ко всем частным формам ПНД, может быть такой: система находится сразу во всех возможных при данных граничных условиях движениях. Все такие альтернативные движения сосуществуют в квантовой суперпозиции со своими амплитудами вероятности, определяемыми квантовой фазой (действием). Действительное движение является суммой возможных альтернативных движений (и суммой их фаз), отличаясь от них максимальной вероятностью, стационарностью или экстремальностью других функционалов системы (в т.ч. действия).

Полная вероятностная формулировка экстремального принципа, в том числе ПНД, может выглядеть так:

1) Все возможные движения системы сосуществуют в возможности, образуя «пакет» возможностей. Действительное движение системы существует в действительности. Возможные движения в действительности несовместимы.

2) Система одновременно использует все имеющиеся у нее возможности для движения: (а) возможности сохранить движение при данных граничных условиях или сохранить свою свободу от влияния окружающей среды (других объектов) и (б) возможности изменить свое движение в данных граничных условиях. Иначе говоря, система движется сразу по всем возможным направлениям и траекториям, сосуществующим в данных граничных условиях, в соответствии с данными степенями свободы. Используются движения во всех возможных размерностях n -мерного пространства-времени любой топологии.

3) Все эти возможные движения находятся в суперпозиции, образуя «пакет» возможностей. В результате сложения или интерференции «пакета» возможностей, одно из возможных движений становится результирующим, в

конкретных граничных условиях оно отличается от прочих возможностей максимальной вероятностью, устойчивостью, стационарностью и экстремальными значениями одного или нескольких функционалов системы.

4) Результирующее движение проявляется для других объектов как действительное. Все остальные альтернативные возможные движения, участвующие в интерференции, продолжают существовать в возможности вплоть до изменения граничных условий.

Таким образом, используя концепцию «суммирования сосуществующих возможностей» и вероятностную интерпретацию ПНД, мы можем описать механизм, по которому возможные движения классических систем становятся их действительными движениями.

3.4. Вероятностная интерпретация ПНД и проблемы причинности

Во второй главе мы рассмотрели некоторые проблемы причинности, связанные с ПНД. Одна из них касается возможности совмещения в ПНД причинного (через действующие причины) и целевого (через конечные причины) объяснения движения объектов. С этой проблемой связан ответ на вопрос, какое из двух описаний является первичным – детерминистическое или телеологическое. Другая проблема касается соотношения однозначной и вероятностной причинности, особенно в момент перехода с квантового уровня описания на уровни классический и релятивистский. Рассмотрим варианты решения данных проблем с точки зрения концепции «суммирования сосуществующих возможностей».

3.4.1 Действующие и целевые причины в вероятностной интерпретации ПНД

Как уже было отмечено, на сегодня не существует общепризнанного подхода, снимающего противоречия между детерминистическим описанием неживых объектов через действующие причины и описанием сложных саморазвивающихся систем (в т.ч. биологических) через целевые или конечные причины. Поскольку ПНД, как и все экстремальные принципы, одновременно оперирует понятиями действующих и целевых причин, не отдавая предпочтения ни тем, ни другим, мы предположили, что этот принцип может послужить ключом к решению указанной проблемы. Опишем вариант такого решения на основе вероятностной формулировки ПНД. Начнем с того, что перечислим четыре возможных варианта соотношения действующих и конечных причин.

1) Действующие причины первичны, описание движения через конечные причины – лишь удобная форма, не отражающая сущность этого движения.

2) Конечные причины первичны, описание движения через действующие причины – лишь удобная форма, не отражающая сущность этого движения.

3) В движении одних систем (классические тела и т.п.) первичны действующие причины, в движении других (сложные саморазвивающиеся системы с обратной связью, живые организмы, люди) первичны конечные причины.

4) Описание через действующие и конечные причины равноправно по сущности, при этом движение одних систем удобнее описывать через конечные причины, а других – через причины действующие.

Мы уже приводили аргументы, высказанные Г. Лейбницем, И. Кантом, Л. Эйлером, Г. Вейлем и другими, в пользу последней точки зрения. По нашему мнению, именно ее следует предпочесть, хотя бы потому, что она проще остальных и не требует дополнительных аксиом или ограничений. Например, о том, что источник движения существует только вне объектов или о том, что существует резкая граница между двумя типами систем, одни из которых

подчиняются действующим причинам, а другие – конечным. Но если действующие и конечные причины равноправны, в чем тогда их отличие?

Рассмотрим простейший случай – движение камня в поле тяготения Земли. Для описания этого движения существует, как минимум, три варианта: а) только через действующие причины; б) одновременно через действующие и конечные причины, в т.ч. с использованием ПНД; в) только через конечные причины, в т.ч. с использованием ПНД. Обычно отдают предпочтение варианту (а), в основном потому, что он использует простой язык классической механики. Однако с философской точки зрения есть проблема, на которую в свое время указывал Г. Лейбниц. Непонятно, каким образом камень узнает о том, что на него действует Земля, если они не касаются друг друга? Введенное позже понятие «поле тяготения», казалось бы, снимает проблему действия на расстоянии. Но возникает другая философская проблема. Камень как будто «прощупывает» пространство вокруг себя и устремляется туда, где потенциал поля тяготения является наименьшим. Чем быстрее убывает потенциал, тем быстрее камень туда стремится (обычно говорят – тем больше действующая на тело сила). Получается, подобное виртуальное «прощупывание» пространства не происходит во времени, камень заранее «узнает» величину потенциала в соседних точках, еще не побывав там.

Вариант (б) используется в общей теории относительности. Но и здесь не совсем ясно, как камень или Земля «выбирают» мировую линию с минимальной кривизной. Вариант (в) на основе ПНД, по сути, эквивалентен вариантам (а) и (б), отличаясь от них лишь граничными условиями. Но и у него, как у любого экстремального принципа, есть свои философские проблемы. Например, как камень может заранее знать, какой путь из точки А в точку Р обладает минимальным значением разницы кинетической и потенциальной энергии? На аналогичный вопрос, касающийся луча света или движения фотонов, будто бы «выбирающих» путь с минимальным временем, Р. Фейнман дал свой ответ. «Фотон не знает заранее: он исследует все пути. Однако только пути близкие к самому быстрому делают значительный вклад в результирующий вектор и соответственно в квадратичную величину вероятности того, что фотон достигнет

пункта Р» [256]. Но ответ Фейнмана касался не только фотонов. Не прибегая к понятию «сила», мы можем сказать, что нашему камню достаточно одновременно «пройти» все возможные пути из одной точки в другую и «выбрать» путь, для которого величина действия минимальна [171, с. 111]. Классическая траектория отбирается не самим телом, а правилом сложения фаз волновых функций всех возможных траекторий этого тела.

В соответствии с вероятностной формулировкой ПНД в рамках концепции «суммирования сосуществующих возможностей» существует еще один вариант описания движения системы Земля-камень. И Земля, и камень используют все имеющиеся у них возможности для сохранения и изменения движения в данных граничных условиях (импульсы тел, степени свободы, свойства пространства-времени и т.д.). Это возможности сохранить свою траекторию, сохранив свою свободу от влияния друг друга, и одновременно возможности изменить свою траекторию под влиянием друг друга. Все эти возможности находятся в суперпозиции, образуя «пакет» возможностей для движения. В результате суммирования путем интерференции «пакета» возможностей, одна из возможностей становится результирующей, которая в данных граничных условиях отличается от прочих возможностей минимальной величиной суммы действий (действия Земли, действия камня, действия их взаимодействия с полями друг друга), а также максимальной вероятностью, устойчивостью и стационарностью. Эта результирующая возможность с точки зрения других объектов является действительным движением системы Земля-камень.

Движение камня по «пакету» возможных траекторий или по одной действительной траектории невозможно оградить от влияния со стороны Земли и других объектов (окружающей среды), входящих в состав граничных условий. С одной стороны, для Земли и камня существуют внешние действующие причины, ограничивающие их возможности для сохранения и изменения своего движения. С другой стороны, для каждого из них существует действующая и она же конечная внутренняя причина, выраженная в стремлении использовать максимум возможностей или степеней свободы для сохранения и изменения движения при существующих ограничениях. Одновременно, Земля и камень являются одной из

действующих причин (граничным условием) друг для друга и для других объектов. Иначе говоря, внутренняя причинность одного объекта одновременно является внешней причинностью для другого.

Ни один объект не «знает» заранее своего конечного состояния, которое он достигнет в результате движения. В каждом промежуточном состоянии все взаимодействующие объекты просто стремятся использовать все имеющиеся у них в данном состоянии возможности для сохранения и изменения своего движения. То, что мы наблюдаем как целенаправленное движение – результат интерференции всех возможных движений всех взаимодействующих в данных условиях объектов. Таким образом, концепция «суммирования сосуществующих возможностей» уравнивает в правах действующие и конечные причины. Действительное движение с точки зрения объекта – это движение с максимальным в данных граничных условиях использованием возможностей, а с точки зрения других объектов – это движение с максимальной в данных граничных условиях вероятностью. Для различных объектов, точнее для различных граничных условий, максимальная вероятность проявляется через экстремумы (минимумы или максимумы) одной или нескольких характеристик объекта, что находит свое выражение в частных формах ПНД и других экстремальных принципах.

Привычные формулировки законов движения не объясняют, почему системы двигаются именно так, а не иначе. Законы описывают только действительное, наблюдаемое направление или траекторию движения. Объяснения типа «действительное положение тела – это положение, где сумма всех сил или сумма элементарных работ равна нулю» или «действительное движение тела – это движение, для которого действие (кривизна, время, длина, разность энергий и т.д.) экстремально» не объясняют, почему собственно тело должно рассчитывать все эти математические величины, и тем более, не объясняют, как оно это делает.

Объяснение, что тела стремятся прийти в состояние равновесия, когда все силы уравновешены, не объясняет, что это за силы, и почему тело «хочет» чтобы их сумма была равна нулю. Не проясняет поведение тел и теория устойчивости,

согласно которой система стремится прийти в состояние устойчивого равновесия, когда малые отклонения не выводят систему слишком далеко из окрестности этого состояния. Все это похоже на тавтологию. Почему для системы предпочтительнее находится в устойчивом равновесии, чем в неустойчивом? Потому что система стремится к состоянию, малые отклонения от которого не выводят систему далеко от такого состояния, а это для системы предпочтительнее. Но это скорее не объяснение, а возврат к определению устойчивого состояния.

Вероятностная формулировка ПНД предлагает другой вариант ответа. Система ничего не рассчитывает и никуда конкретно не стремится, она просто использует все возможности для своего движения. Устойчивость и стационарность – результат сложения (интерференции) двух типов возможностей объекта. Пока граничные условия не меняются, устойчивость и стационарность действительного движения сохраняются. При каждом изменении граничных условий меняются возможности сохранения и изменения движения, результатом их нового сложения становится новое действительное движение – устойчивое и стационарное в новых граничных условиях. Устойчивость и стационарность действительного состояния или движения вовсе не являются целью системы, они – необходимое следствие правила сложения (интерференции) «пакета» ее возможностей.

В научной практике используются различные типы причинности, в которых движение объектов объясняется их стремлением подчиниться какой-то силе, стремлением достигнуть состояния равновесия, стремлением минимизировать или максимизировать какую-то величину и т.д. Вероятностная интерпретация ПНД заменяет все эти объяснения одним внутренним стремлением системы использовать все возможности для сохранения и изменения своего движения. Вместо множества причин действующих или конечных, внешних или внутренних остается одна внутренняя причина каждой системы, независимо ни от ее типа, ни от ее размера. Все остальные причины становятся частными случаями и относительными проявлениями одной фундаментальной причины.

Как известно, идея имманентной внутренней активности любых объектов имеет богатую философскую традицию. Лукреций в I веке до н.э. изложил эпикурейский взгляд на причину возникновения вещей с помощью явления «клинамена» или внезапного отклонения атомов от движения по прямой с постоянной скоростью. Клинамен не детерминирован никакой внешней причиной, а возникает в силу присущих атому свойств. Г. Лейбниц считал, что существуют только атомы-субстанции (монады), которым присущи внутренние стремления, составляющие принципы изменений [93, с. 404], таким образом, активная сила или способность действовать присуща всякой телесной субстанции [Там же, с. 246]. Внутреннюю свободную активность или волю природных объектов в разных интерпретациях рассматривали И. Фихте, Ф. Шеллинг, Г. Гегель, А. Шопенгауэр, А. Бергсон, В. С. Соловьев и многие другие. Н. А. Бердяев утверждал, что если мир не есть иерархия личных субстанций, обладающих свободной и оригинальной мощью, то творчество в мире невозможно [11, с. 165]. К. Э. Циолковский был уверен, что все атомы всегда живые, а значит, и весь космос всегда жив в абсолютном смысле [188, с. 305]. М. Планк, наблюдая за фотонами, сделал вывод, что они ведут себя как разумные существа [См.: 6, с. 185].

В последние десятилетия идея всеобщей внутренней активности приобретает все больше сторонников. М. Бунге пишет: «Материальные предметы на всех уровнях организации все более и более рассматриваются как сущности, имеющие собственную активность, обусловленную, но не полностью детерминированную окружающей их средой». Далее он предлагает рассматривать внутренние причины – «самодетерминированность» объектов, тогда в ходе синтеза самодетерминации и внешней детерминации внешние причины следует понимать как развязывающие внутренние процессы, а не как факторы, формирующие пассивные куски глины [26, с. 201–228].

Ф. Дайсон отмечает, что Вселенная образована согласно принципу максимального разнообразия [214, р. 5]. Материя, согласно квантовой механике не есть инертная субстанция, но является активным агентом, постоянно делающим выбор между альтернативными возможностями согласно

вероятностным законам. Каждый квантовый эксперимент заставляет природу делать выбор. Кажется, что разум, как выражающий способность делать выбор, некоторым образом присущ каждому электрону [Ibid, p. 297].

Б.Б. Кадомцев считает, что очень трудно представить себе рубеж появления свободы воли на границе между неодушевленным миром и жизнью. Гораздо более естественным является допущение о том, что свобода воли является имманентным, то есть внутренне присущим свойством мира. Только на основе этого исходного положения можно уйти от бессмысленного, полностью детерминированного механистического мира к миру живому и развивающемуся [69, с. 333]. Ю.В. Сачков критикует подход классической механики, где силы рассматривались как причины: «Доктрина внешних причин фактически рассматривает материальные объекты и тела как пассивные, т.е. не имеющие активного начала в самих себе» [148]. По мнению Сачкова, обобщение модели идеального газа говорит о том, что статистические (вероятностные) системы суть системы, образованные из независимых или квазинезависимых сущностей, а поведение их в той степени независимо, в какой оно определяется внутренними основаниями, внутренними «мотивами» и «интересами» [150, с. 24].

Е.А. Мамчур предлагает делить телеономические системы на две категории: системы первого рода, которые действуют по заранее «заданной» программе, где цель запрограммирована, и саморегулирующиеся и самоорганизующиеся системы второго рода, которые действуют без всякой программы. Для последних, по мнению Мамчур, концепция «внутреннего финализма» «лучше» и «ближе» к научному реализму, чем концепция «внешнего» финализма, которая предполагает существование внешних целей и внешнего сознания, формулирующего эти цели. Последняя теологична, а последовательно мыслящий научный реалист не может ее принять. Мамчур признает право на внутренний финализм только за «телеономическими системами второго рода», и тут же оговаривается, что природа факторов этого «внутреннего» финализма остается невыясненной, загадочной и даже мистической [101, с. 248].

Подведем итог. Согласно концепции «суммирования сосуществующих возможностей» и вероятностной формулировке ПНД, ни одна система не знает

заранее своего конечного состояния, которое она достигнет в результате движения. В каждом промежуточном состоянии все взаимодействующие системы просто стремятся использовать максимум имеющихся у них при данных граничных условиях возможностей по сохранению и изменению своего движения. То, что мы наблюдаем как целенаправленное движение, есть необходимый результат суммирования путем интерференции всех возможных движений всех взаимодействующих в данных условиях систем.

3.4.2 Вероятностная и однозначная причинность в вероятностной интерпретации ПНД

В многочисленных физических теориях используют разные типы причинности, описывающие связь событий друг с другом. Основные типы были перечислены во второй главе. Экстремальные принципы, в том числе ПНД, с успехом описывают движение совершенно разных систем, независимо от того, какой тип причинности для них обычно используется – динамический, полевой, равновесный, статистический или вероятностный. Согласно концепции «суммирования сосуществующих возможностей» и вероятностной формулировке ПНД в основе всех частных форм ПНД и вообще экстремальных принципов лежит вероятностная причинность. Покажем, что вероятностная интерпретация ПНД является удобной моделью для перевода с языка однозначной причинности на язык вероятностной причинности и обратно. Тем самым мы подкрепим известную точку зрения, что вероятностные законы квантовой механики являются фундаментальными, а однозначные законы других областей физики – их частными случаями.

Важно отметить, что деление причинно-следственных связей на однозначные и вероятностные всегда производится с точки зрения конкретного наблюдателя или группы наблюдателей. Это следует из определения термина

«однозначность», который относится к глаголу «предсказывать» или «рассчитывать» значение некоторой величины с точностью, устраивающей того, кто предсказывает или рассчитывает. Причинные связи, в которых люди могут предсказывать с относительно высокой точностью единственное следствие для конкретной причины в конкретных граничных условиях, принято называть «однозначными». Точность измеряют частотой или вероятностью совпадений предсказанного и наблюдаемого следствия. Там, где точность предсказания меньше определенной величины (она отличается для разных процессов), говорят о статистической или вероятностной причинности. В первом случае считается, что неточность определяется сложностью измерения большого числа параметров, во втором случае – принципиальной невозможностью точного измерения. Причинные связи, следствие в которых люди могут предсказывать с очень низкой точностью, принято называть «случайными».

В истории науки параллельно существуют три взгляда на соотношение однозначной и вероятностной причинности. Согласно первому однозначная причинность считается первичной, а вероятностная – вынужденным усреднением и приближением для большого числа объектов. Согласно второму взгляду однозначная и вероятностная причинности равноправны, существуют параллельно, являясь первичными каждая для своих типов объектов, для своего масштаба или уровня сложности природы. Третья точка зрения считает первичной вероятностную причинность, а однозначную – частным случаем или приближением для некоторых макроскопических объектов. Несколько аргументов в пользу третьего взгляда были приведены во второй главе.

Ранее в таблице 2 мы описали переход от возможных альтернативных траекторий квантовых объектов к единственной траектории классических объектов путем суммирования сосуществующих возможностей. Используем тот же подход в таблице 3 для описания перехода от вероятностной причинности к причинности равновесной, а затем к причинности динамической.

Таблица – 3 Связь вероятностного, равновесного и динамического типов причинности с точки зрения концепции «суммирования сосуществующих возможностей»

Тип причинности	Способ описания	«Пакет» возможностей	Действительность
Вероятностная	Механика Шредингера	«Пакет» волновых функций в суперпозиции. Каждая однозначно определяет вероятность одной из возможных траекторий	Волновая функция, результирующая «пакета» волновых функций путем их интерференции, однозначно определяет вероятность действительного положения объекта
	Интегралы по траекториям	«Пакет» всех возможных траекторий	Траектория с максимальной амплитудой вероятности и минимальным изменением фазы (квантового действия) путем сложения фаз определяет положение объекта с максимальной вероятностью
Экстремальная (равновесная)	Классическая механика	Сумма всех возможных траекторий в гладком 3-х мерном пространстве	Классическая траектория (геодезическая) с минимумом разницы кинетической и потенциальной энергии (классическое действие). Путем вариации действия однозначно определяется положение объекта
			Классическая траектория через соотношение импульсов и координат однозначно определяет положение объекта
Действующая			

Для понимания смысла описанного перехода, необходимо вспомнить основные понятия концепции «суммирования сосуществующих альтернативных возможностей». *Суперпозиция* – это совместное одновременное существование

возможных альтернативных, не зависящих друг от друга, состояний (траекторий) объекта, несовместимых в наблюдаемой действительности. Объект является суперпозицией всех его возможных альтернативных состояний (траекторий), которая описывается как «пакет волновых функций». *Когеренция* – это тип согласованности возможных альтернативных состояний (траекторий) объекта, находящихся в суперпозиции. Такая согласованность означает постоянство разности фаз волновых функций (или постоянство скорости их изменения), описывающих возможные альтернативные состояния (траектории), для этого фазы должны быть зависимыми друг от друга. Согласованные возможные альтернативные состояния (траектории) интерферируют друг с другом. *Интерференция* – это суммирование согласованных возможных альтернативных состояний (траекторий) путем сложения фаз волновых функций их описывающих. *Смешанное состояние (траектория)* – это совокупность совместно существующих действительных состояний (траекторий) разных объектов. Такие действительные состояния (траектории) не согласованы, а значит, не интерферируют друг с другом.

Рассмотрим три типа сложных систем, состоящих из объектов. Системы первого типа обладают только одним возможным состоянием (траекторией), которое может вызвать только одно, однозначно предсказуемое действительное состояние (траекторию). Сложные системы второго типа обладают не меняющимся во времени (стационарным) «пакетом» когерентных возможных состояний (траекторий). Система второго типа или «пакет» ее возможностей изолированы от других систем или взаимодействует с «пакетом» возможностей другой системы второго типа. Состояние (траектория) такой системы может быть предсказано с большой степенью точности, поскольку правило интерференции возможностей (сложения фаз волновых функций) дает в этом случае результат близкий к однозначному (с учетом граничных условий), который можно рассчитать. При фазах много больше единицы это правило можно заменить одной из форм ПНД или соответствующими дифференциальными уравнениями движения. Например, траекторию бильярдного шара после столкновения с ровной стенкой можно точно предсказать, если пренебречь неровностями поверхностей

шара, стенки и стола, а также вращением шара и Земли, сопротивлением и движением воздуха и т.д. Но поскольку полностью изолированных систем первого и второго типа не существует, точно предсказать результат столкновения нескольких бильярдных шаров – невозможно. Системы первого и второго типов следует рассматривать как идеализацию, удобную для случаев, когда взаимодействием с другими системами временно можно пренебречь. Д. Бом отмечал: «каждый механический закон применим лишь к изолированной системе, потому что ее поведение зависит от граничных условий, которые определены в существенно независимых системах, внешних по отношению к рассматриваемой» [13, с. 98].

Степень когерентности «пакета» возможностей систем третьего типа периодически изменяется, полностью или частично. Это происходит из-за непрерывного взаимодействия их «пакетов» возможностей с «пакетами» возможностей окружающих систем. С каждым таким взаимодействием правило интерференции возможностей (сложения фаз волновых функций) дает новый результат. Чем больше и чаще происходят нарушения одной когеренции (декогеренция) и возникновение другой, тем меньше вероятность предсказания результата интерференции, а значит и очередного действительного состояния (траектории) системы. Кроме того, любая попытка измерить «пакет» возможностей сама его тут же изменяет. Неопределимость причины ведет к невозможности однозначной определимости следствий – действительных состояний (траекторий). Если «пакет» возможных состояний изменяется по какому-то правилу, то следствие может быть определено на основе распределения его вероятностей, в свою очередь, тоже меняющегося. Важно отметить, что каждая возможность в отдельности остается однозначной, но их суперпозиция в разных сочетаниях в составе «пакета» возможностей порождает неоднозначную действительность. Результат взаимодействия каждой отдельной возможности с каждой изолированной системой остается однозначным в возможности, но сумма всех взаимодействий со всеми непрерывно изменяющимися системами всегда неоднозначна в действительности.

Если исключить любые идеализации, действительная траектория бильярдного шара после столкновения со стенкой будет зависеть от того, какие именно возможности шара и стенки станут когерентными в момент удара. И те и другие непрерывно изменяются под влиянием окружающих систем (стола, воздуха, теплового излучения, колебаний Земли и т.д.). И хотя правило интерференции возможных траекторий однозначно, учесть все возможности, которые будут составлять «пакет» возможных траекторий можно только через их вероятность. На основании изложенных соображений можно сделать несколько выводов.

Первый вывод относится к общему пониманию детерминизма. Следует различать детерминизм как всеобщий принцип, гласящий, что все явления связаны друг с другом определенным, необходимо повторяющимся образом при одних и тех же граничных условиях, и детерминизм как модель феноменологического описания связи наблюдаемых явлений в конкретной области природы. В последнем случае детерминизм связан со стремлением человека найти однозначную связь между наблюдаемыми связями и состояниями систем, чтобы предсказывать их будущие связи и состояния. Но однозначность принципов не эквивалентна однозначности состояний систем, и тем более не эквивалентна однозначности наблюдаемых явлений. Из однозначного принципа, гласящего, что состояние системы стремится к состоянию с максимальной в данных условиях вероятностью (или устойчивостью, или экстремумом другой характеристики), не следует однозначность этого состояния, ведь таких состояний может быть несколько. Из однозначного принципа, гласящего, что возможные состояния (волновые функции) системы интерферируют по однозначным правилам сложения фаз, не следует однозначность результата интерференции – действительного состояния. Учесть все постоянно изменяющиеся возможные состояния, участвующие в интерференции, невозможно в принципе, и это не зависит от способностей нашего мозга. Как уже было отмечено, однозначность – понятие относительное, поскольку имеет смысл только для того, кто хочет что-то предсказать.

Второй вывод относится к пониманию причинно-следственной связи. Если суперпозицию «пакета» возможных состояний системы рассматривать как причину, то действительное состояние в результате суммирования через интерференцию будет являться следствием. Попытка связать причинной связью только действительные состояния или только следствия заранее является идеализацией. Такая идеализация будет иметь практический смысл тем больше, чем полнее известны причины, вызвавшие конкретные следствия.

Поясним это на примере взаимодействия камня и Земли на рисунке 4. Начальный «пакет» возможных движений камня (причина №1) образует начальное действительное движение камня (следствие №1). В результате взаимодействия «пакета» возможностей камня с «пакетом» возможных движений Земли возникает новый «пакет» возможных движений камня (причина №2). Путем интерференции этого нового «пакета» образуется новое действительное движение камня (следствие №2).

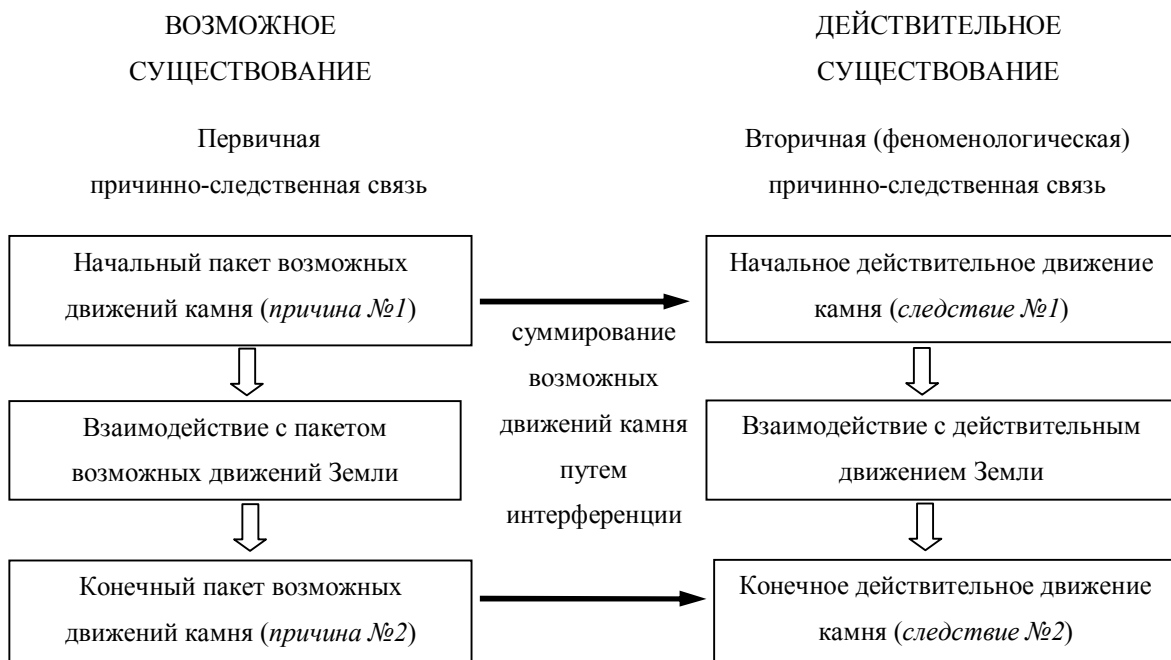


Рисунок – 4 Первичная и вторичная причинно-следственные связи

Примечание – Первичной причиной изменения движений камня и Земли является взаимодействие их пакетов возможных движений. Взаимодействие действительных движений вторично и относительно.

Следует различать первичную причинно-следственную связь между «пакетами» возможных движений и вторичную или феноменологическую причинно-следственную связь между действительными движениями, в том числе наблюдаемую конкретными «наблюдателями». Несмотря на то, что взаимодействие действительного движения камня с действительным движением Земли предшествует во времени новому действительному движению камня (следствие №2), оно не является его непосредственной причиной. При рассмотрении причинно-следственных связей только между действительными движениями или состояниями неизбежно возникают противоречия, что выражается в проблемах причинности. Нельзя забывать, что в создании любого действительного движения или состояния участвует «пакет» возможных состояний наблюдателя и систем, с помощью которых он наблюдает. Это не только приборы, но и привычная для нас пара «фотоны света плюс клетки зрительных органов». Оговоримся, что понятие «наблюдатель» мы используем здесь максимально широко, безотносительно к тому, обладает ли он сознанием или свободной волей. Поскольку изолированных систем не существует, любая система в действительном состоянии взаимодействует с другими системами, можно сказать, наблюдается ими. Исходя из этого, известную странную фразу Дж. Уиллера о том, что объекты не существуют, если их никто не наблюдает, можно трактовать в том смысле, что необходимым (но не достаточным) условием нахождения объектов в действительном состоянии является их взаимодействие с другими объектами.

Третий вывод относится к пониманию случайности и необходимости. Подобно тому, как однозначность не является прямой противоположностью неоднозначности, случайность не является прямой противоположностью необходимости. Так же как из однозначности механизма интерференции не следует однозначность получаемых состояний, из необходимости интерференции

по определенным правилам не следует необходимость конкретного результата этой интерференции. Случайность и необходимость, наблюдаемые в феноменологических причинно-следственных связях, являются проявлением необходимости и однозначности принципов взаимодействия «пакетов» возможных движений или состояний в первичных причинно-следственных связях. В частных идеализированных случаях для систем первого и второго типа феноменологические причинно-следственные связи приближенно могут считаться необходимыми и однозначными. Для реальных систем третьего типа такое приближение не обосновано.

Еще Н. Гартман указывал на то, что каждая из многих возможностей сама по себе является совершенно определенной, именно такой, а не иной возможностью. Неопределенной является лишь судьба каждой отдельной возможности, ее реализация. Неопределенность свойственна не каждой отдельной возможности и не их множеству, а только «выбору» одной возможности при отпадении всех других [Цит. по: 50]. М. Борн считал, что статистические законы, как и любые законы природы, выражают необходимые связи в природе, а флуктуация выступает как форма проявления необходимости [16, с. 177]. В.П. Бранский и В.В. Ильин указывали на два случая в процессе превращения возможности в действительность. Первый случай, когда в объекте при данных условиях имеется лишь одна возможность, которая может превратиться в действительность, они называют необходимостью. Второй случай, когда реализуется одна из нескольких возможностей, имеющих у объекта при определенных условиях, они называют случайностью [22, с. 210].

Изложенное выше понимание причинности может быть полезно для раскрытия смысла понятия «закон природы», как правила суммирования сосуществующих альтернативных возможностей. Действительные системы следуют предписаниям законов не потому, что они «хотят» этого или «вынуждены подчиниться», а потому, что сами действительные системы образовались в результате суммирования возможностей по однозначным правилам. Феноменологические законы взаимодействия действительных систем являются проявлением правил интерференции на уровне возможностей. Другими

словами, «закон является тем критерием, который ограничивает сферу возможного, отделяя его от невозможного» [21, с. 202]. Конечно, понятие «закон» полностью этим не раскрывается.

Четвертый вывод касается внутренней и внешней причинности. Если источник любых, а не только случайных движений находится в самопроизвольных внутренних изменениях системы, то причиной таких изменений является внутренняя активность самой системы. Эта же причина вызывает и неоднозначность состояний. Бранский и Ильин считают, что однозначная детерминированность «противодействия» связана с пассивностью взаимодействующих объектов (или элементов объекта). Однако в реальности каждый материальный объект, по их мнению, в той или иной степени обладает собственной активностью. Сущность причинности заключается в зависимости переходов возможного в действительное в одном объекте от переходов возможного в действительное в другом. Если внешняя причинность заключается в воздействии одного объекта на другой, то внутренняя причинность заключается в воздействии объекта на самого себя. Таким образом, противоречие между самопроизвольным изменением и принципом причинности является кажущимся: самопроизвольные изменения не беспричинны, а обусловлены особым типом причинности [20, с. 222–225].

Гипотеза о внутренней активности любых систем уже была использована нами для объяснения соотношения действующих и конечных причин. Эта внутренняя активность выражается во внутреннем стремлении систем использовать все возможности, имеющиеся у них в данных условиях, для сохранения и изменения своего движения или состояния. Причем каждая внутренняя причина одной системы является внешней причиной для других. Внутренняя активность, сформулированная таким образом, содержит в себе, с одной стороны, необходимость и однозначность внутреннего стремления в целом, с другой, случайность и неоднозначность суммарного использования каждой отдельной возможности.

3.5 Критический анализ вероятностной интерпретации ПНД

Каждая новая теория вступает в конкуренцию с теориями существующими. Нет какого-то простого способа оценить, насколько хороша та или иная теория. Только многократное сравнение с другими теориями, только всесторонняя критика и проверка через наблюдения фактов способны оценить жизнеспособность новой теории. В литературе рассматриваются разные критерии сравнения теорий [См., например: 84; 86]. К. Поппер под удовлетворительной подразумевал новую теорию, способную выполнить несколько условий. Во-первых, объяснить факты двоякого рода: те, с которыми успешно справлялись прежние теории, и те факты, которых не смогли объяснить эти теории; во-вторых, найти удовлетворительное истолкование тем опытными данным, согласно которым были фальсифицированы (опровергнуты опытом) существовавшие теории; в-третьих, интегрировать в одну целостность проблемы – гипотезы, несвязанные между собой; в-четвертых, новая теория должна содержать проверяемые следствия; в-пятых, сама теория так же должна быть способной выдержать процедуру строгой проверки [129, с. 35].

Философ науки М. Бунге предлагал оценивать теории путем четырехступенчатой проверки: метатеоретической, интертеоретической, философской и эмпирической [27, с. 299]. Метатеоретическая проверка состоит в выяснении того, является ли теория непротиворечивой, имеет ли она фактуальное содержание и проверяема ли опытным путем при использовании дополнительных рабочих теоретических понятий и гипотез, которые связывают ненаблюдаемые сущности с наблюдаемыми. Интертеоретическая проверка предназначена выявить совместимость данной теории с другими, ранее принятыми теориями. Философская проверка является исследованием общефилософских и теоретико-познавательных достоинств, понятий и предположений теории в свете той или иной философской концепции.

У философских объяснительных теорий есть особенность, их объекты – не непосредственно наблюдаемые явления, а теории и законы, описывающие наблюдаемые явления, предметом философской теории становятся связь и смысл этих теорий и законов. Поэтому при сравнении философских объяснительных теорий особое внимание следует уделять, по классификации Бунге, интертеоретической и философской проверке. И хотя формулировок критериев сравнения теорий возможно несколько, они обязательно должны соответствовать методологическим принципам научного познания [См., например: 68, с. 142–145].

Один из вариантов такой системы критериев может быть следующим: из двух теорий предпочтительнее та, которая отвечает большему числу из семи критериев.

а) Теория подтверждается бóльшим числом опытов, предсказывает больше новых фактов – *критерий верификации*.

б) Можно сформулировать бóльшее число способов проверки и опровержения теории – *критерий фальсификации*.

в) Теория справедлива для бóльшего числа типов объектов, изучаемых в разных областях науки, меньше зависит от изменения граничных условий, точек отсчета и т.п. – *критерий инвариантности* или *симметрии*.

г) Теория включает в себя бóльшее число ранее принятых теорий и их законов в качестве предельных случаев – *критерий соответствия*.

д) Теория опирается на меньшее число понятий, допущений и аксиом, проще в определениях и математической записи, обладает бóльшей эстетической красотой – *критерий простоты*.

е) Теория имеет меньше противоречий с ранее принятыми теориями и их законами – *критерий согласованности* или *системности*.

ж) Теория опирается на понятия и принципы одной из общепризнанных философских концепций – *философский критерий*.

По нашему мнению, вероятностная интерпретация ПНД и концепция «суммирования сосуществующих возможностей» по всем перечисленным критериям имеет преимущества перед конкурирующими теориями, объясняющими движение физических систем. Частично такое утверждение

подкрепляется данным исследованием, однако, несомненно, оно требует отдельной проверки. Одновременно существует и немало возражений против такого утверждения. Перечислим некоторые возражения, а также возникающие трудности и нерешенные проблемы.

3.5.1 Основные возражения против вероятностной интерпретации ПНД

В процессе обсуждения идей, излагаемых в данной работе, автор обнаружил большое количество возражений, ответы на некоторые из которых приведены ниже.

Возражение № 1. Неправильно употреблять понятие «языки разделов физики», правильнее говорить не о языках, а о моделях, используемых в разных разделах физики. К моделям следует отнести понятия, имеющие ясный физический смысл и четкие процедуры измерения. Это пространство, время, и связанные с ними симметрии и интегралы движения [См.: 94].

В своем понимании языка науки мы опираемся на идеи В. Гумбольдта, В. Гейзенберга, Т. Куна, В.А. Штоффа. По Гумбольдту «разные языки — это не различные обозначения одного и того же предмета, а разные видения его... Путем многообразия языков непосредственно обогащается наше знание о мире» [Цит. по: 140, с. 9]. Для Гейзенберга язык науки (в т.ч. разделов физики) есть совокупность понятий, логики, аксиом и онтологии, причем «самая трудная проблема в отношении применения языка возникает в квантовой теории» [44, с. 181]. Кун говорит о языках, используемых в науках, которые включают «множество предположений относительно природы и отказываются функционировать в тот момент, когда эти предположения не оправдываются» [84, с. 192]. Штофф считал, что модельное объяснение основано на применении метода аналогии и является объяснением неоднозначным, так как не исключает других возможных объяснений, основанных на других аналогиях. Принцип

модельного объяснения основан на том, что теория, содержащая причинное, закономерное, структурное и другие объяснения одной области фактов посредством модели, применяется к другой области фактов, которые требуется объяснить [191, с. 197]. На ключевую роль философских и научных языков указывал В.В. Налимов, подчеркивая важность вероятностного языка [110, с. 18]. Таким образом, модели описания тоже должны иметь свои совокупности понятий, свою логику, свои аксиомы, свой математический аппарат и свою онтологию. Если все это имеют модели (языки) классической механики, теории поля, квантовой механики, то метод (язык или модель) «интегралов по траекториям», уже имеющий свои понятия, математический аппарат и логику, тоже заслуживает иметь и свои аксиомы, и свою онтологию.

Возражение №2. Квантовая механика не дает нам никакой картины «реальности». Формализм квантовой механики, с точки зрения многих физиков, следует рассматривать лишь как математический формализм, позволяющий вычислять вероятности альтернативных реальностей, которые могли бы возникнуть [См.: 118, с. 654]. Большинство физиков вообще мало обеспокоено проблемой «редукции волновой функции», зачастую даже не зная о ней вовсе [См.: 95]. ПНД – это математическая форма в рамках вариационного исчисления, а действие, в отличие от энергии, не физическая величина, а математический объект. То же самое относится к интегралам по траекториям в квантовой механике, которые вместе с волновой механикой Шредингера – лишь разные эквивалентные математические представления [См.: 94]. Считается, что математический формализм квантовой механики «угадан», он ниоткуда не выводится [См.: 154, с. 143]. Отсюда делается вывод о том, что переносить модель «интегралов по траекториям», которая успешно работает на квантовом уровне, на другие области физики неправомерно. Особенно это касается применения квантовых законов для понимания причинности. Как пишет Р.А. Смородинов: «учитывая вероятностный характер квантовой механики и неразрешимость проблем тождества и индукции, мы ни в коем случае не имеем права сциентически онтологизировать квантовую механику, и делать какие-либо выводы относительно концепций детерминизма или индетерминизма» [156].

Во-первых, формализм квантовой механики был не угадан, а выведен Л. Де Бройлем, М. Борном и Э. Шредингером на основании оптико-механической аналогии, в том числе с использованием принципов Ферма, Гюйгенса и Гамильтона. Во-вторых, в науке конкурируют между собой не только теории, но и модели. Чем больший круг явлений способна охватить модель, чем меньше у нее ограничений, тем шире ее следует использовать для создания новых теорий там, где старые теории уже недостаточны. Ссылка на изначальную ограниченность какой-то модели или на то, что модель не имеет отношения к реальности, не может являться препятствием. Как известно, все принципиально новые теории в науке возникали тогда, когда модель, успешно работающую в одной области, без каких-то, казалось бы, видимых оснований переносили на другую область. Так было и с законом всемирного тяготения, и с геометрическим взглядом на пространство, и с оптико-механической аналогией.

Возражение №3. Понятия «возможность», «выбор», «сосуществование возможностей», «внутренняя активность», «команда природы» и т.д., используемые в методе «интегралов по траекториям» и концепции «суммирования сосуществующих возможностей», частично заимствованные из работ В. Гейзенберга, Э. Шредингера, Л. Де Бройля, Р. Фейнмана, Э. Тэйлора и др., являются метафорами и не имеют отношения к реальности.

Физика вряд ли возможна без использования метафор и аналогий, особенно на этапе осмысления явлений. В свое время физические понятия «сила», «энергия», «материя», «эволюция», «поле», «время» – тоже были философскими метафорами и аналогиями. Научный язык вынужден использовать понятия, заимствованные из быденного языка и нагруженные смыслами этого языка. Это касается и вариационных принципов, говорить о которых без метафор, в том числе философских, просто невозможно. Не случайно на это особо указывает К. Ланцош [91, с. 21].

Возражение №4. В законы Ньютона входят неконсервативные силы, например трение, а ПНД справедлив только для консервативных систем, таких, где все силы могут быть получены из потенциальной функции, таким образом,

силы типа трения, не имеющие силовой функции, оказываются вне области применимости вариационных принципов [См.: 94].

Во-первых, еще М.В. Остроградский показал, что можно распространить ПНД на неконсервативные системы, где закон сохранения энергии не имеет места. Во-вторых, сам Р. Фейнман отвечает на это: «на микроскопическом уровне неконсервативных сил не существует», они появляются только от того, что мы пренебрегаем микроскопическими сложными эффектами [171, с. 108]. Таким образом, сила становится вторичным понятием, необходимым для анализа трения и диссипативных сил. Создание такой вторичной силы очищает сцену для принципа наименьшего количества действия, чтобы предсказать движения огромного разнообразия простых и сложных систем [270].

Возражение №5. Попытки всерьез использовать категории «возможного» и «действительного» существования, а также идею всеобщей внутренней активности возвращает науку обратно к натурфилософии.

Следует отметить, что использование идей древних греков или Г. Лейбница сейчас уже не считается признаком «непонимания» физики. В. Гейзенберг много раз писал, что квантовая физика требует возврата к идеям Пифагора, Платона, Аристотеля и Лейбница [См.: 44]. Об этом же применительно к общей теории относительности писал К. Ланцош [91, с. 23]. Современная теория суперструн полностью основана на натурфилософской идее онтологической первичности числовых соотношений. С таким же основанием можно считать натурфилософской любую идею об универсальности математического описания или о желании найти единую теорию для всех физических, биологических и психологических явлений.

Возражение №6. Возражая против универсальности экстремальных принципов, И. Пригожин пишет, что природа не может быть всемогущим калькулятором [132, с. 185].

Но ведь, так можно сказать и о других законах. Как природа, точнее ее объекты, рассчитывают дифференциальные уравнения, чтобы следовать им? Именно в соответствии с вероятностной интерпретацией ПНД ни природа, ни объекты ничего не рассчитывают, они просто используют все имеющиеся у них

возможности, а результат проявляется в результате работы механизмов интерференции и декогеренции. И если математические результаты дифференциального и вариационного исчисления эквивалентны, то к сущности происходящего ближе как раз вариационная форма.

Возражение №7. Другое возражение И. Пригожина против экстремальных принципов связано с тем, что в природе не существует упорядоченной истории и неукоснительного прогресса, история не определена, и возможны неожиданные события [Там же, с. 185].

Вероятностная интерпретация ПНД не вводит никакой упорядоченности в движении или в развитии. Упорядоченность существует только в механизме суммирования возможностей, сами возможности и их суперпозиция образуются в результате активности каждой системы. Причем чем сложнее объект, чем больше у него степеней свободы, тем менее упорядочена его история. Но независимо от степени сложности правила сложения остаются одними и теми же. Если Пригожин описывает принципы отбора состояний через понятия бифуркации и аттрактора [Там же, с. 231], то концепция «суммирования сосуществующих альтернативных возможностей» делает это же самое через понятие вероятностного отбора путем сложения фаз каждой из возможностей, находящейся в суперпозиции с другими возможностями.

Возражение №8. Метод «интегралов по траекториям» пригоден только для одной частицы, и его нельзя распространять на макрообъекты.

Как показано ранее, модель, предложенная Р. Фейнманом, работает во всех областях квантовой электродинамики для любого электромагнитного, а также гравитационного поля. Поскольку любой квантовый объект можно рассматривать как соответствующее квантовое поле, метод «интегралов по траекториям» не ограничивается одиночной частицей.

Возражение №9. Со времен Л. Эйлера известно, что для нахождения выражения, которое должно являться максимумом или минимумом для каждой частной задачи можно только тогда, когда уже известно решение этой задачи, проведенное исходя из обычных общих законов физики с использованием

дифференциальных уравнений. Отсюда делается вывод о вторичности экстремальных принципов.

В качестве возражения заметим, что сложившаяся практика научного исследования, в которой функционал подбирается под уже известный закон движения, не является доказательством его онтологической вторичности. Точно так же как объяснительная теория, подобранная под уже существующие феноменологические описательные теории, не может только на этом основании считаться вторичной и не имеющей отношения к реальности. Тем более, когда она позволяет предсказывать больше фактов, чем первичная описательная теория.

Возражение №10. Если концепция внутренней активности объектов предлагается как решение метафизических проблем существующих физических теорий, в том числе противоречия между квантовой и макроскопической причинностью, то такое метафизическое «лекарство» страшнее исходной «болезни».

Отметим, что здесь затрагивается вопрос вкуса и философских пристрастий. Как известно из медицины, если не помогают привычные средства, чтобы справиться с хронической болезнью, иногда приходится принимать немного яду.

Возражение №11. Если признать, что ПНД описывает реальные события, то мы сталкиваемся с невозможностью представить, как частица может в один миг сравнивать друг с другом все возможные пути к отдаленной точке и затем выбирать из них самый короткий. Это, по выражению М. Борна, звучит «крайне метафизически» [17, с. 113].

В соответствии с вероятностной интерпретацией ПНД нам нет необходимости прибегать к выражениям «сравнивает» и «выбирает». За частицу все это проделывает механизм интерференции, именно он «сравнивает» и «выбирает». Причем происходит это вне времени, поскольку сложение фаз не является физическим процессом, а происходит сразу для всего «пакета» когерентных возможностей, находящихся в суперпозиции.

Возражение №12. По мнению Ю.С. Владимирова во всех теориях теоретико-полевой парадигмы, представителями которой являются квантовая механика, релятивистская квантовая теория поля и квантовая электродинамика,

«поле амплитуды вероятности вкладывается в априорно заданное 4-мерное классическое пространство-время [37, с. 145]. Это же касается фейнмановских вкладов от путей [Там же, с. 473]. Критикуя фейнмановскую интерпретацию, Владимиров указывает на искусственность ее ключевого постулата и пишет, что поскольку фазовый вклад превращается в классическое действие, которое определяется вдоль одной мировой линии частицы, а отношения задаются между исходным состоянием частицы и всеми другими окружающими частицами, «не остается ничего иного, как дополнить постулат распространения возможностью эволюции вдоль множества траекторий, всеми возможными способами как бы соединяющими исходное состояние частицы со всеми другими» [Там же, с. 492]. По мнению Владимирова фейнмановская формулировка квантовой механики занимает промежуточное положение между теоретико-полевым и реляционным подходами. От теоретико-полевого миропонимания взято априорно заданное классическое пространство-время, а от реляционного миропонимания — далекодействующий характер физических взаимодействий. Таким образом, Фейнман остановился на полпути [Там же, с. 433]. В качестве альтернативы Владимиров предлагает концепцию бинарной геометрофизики, согласно которой имеются наборы фазовых вкладов в парные отношения между любыми парами объектов. Причем понятие «возможности» в виде комплексных отношений между элементами бинарных систем занимает центральное положение в основаниях бинарной геометрофизики [Там же, с. 488]. Согласно Владимирову система переходит из возможного начального состояния (множество элементов M) в действительное конечное (множество элементов N) через комплексные отношения, задаваемые для каждой пары элементов из двух противоположных множеств [Там же, с. 464].

Частично соглашаясь с тем, что Фейнман остановился на полпути, отметим, что хотя концепция «суммирования сосуществующих возможностей» является продолжением его идей, вместо того, чтобы считать искусственным постулат о возможности эволюции вдоль множества траекторий всеми возможными способами, соединяющими исходное состояние частицы со всеми другими, предполагается, что именно так все и происходит. Сам Владимиров соглашается,

что наиболее близкая к его программе является формулировка Фейнмана, ссылаясь при этом на его учителя Дж. Уилера. Однако, по нашему мнению, Владимиров ошибочно считает, что Фейнман проводит суммирование по классическим траекториям в готовом пространстве-времени [Там же, с. 482]. Классическая траектория с классическим действием для Фейнмана вовсе не задана, а является результатом интерференции всех возможных траекторий, соответственно классическое пространство-время является производным частным случаем n -мерного фазового пространства. Возможная траектория характеризуется комплексной фазой вероятности, и никак не может опираться на абсолютное классическое пространство-время. Сам Владимиров ставит понятие «фаза» во главу угла, причем не отдельную «фазу», а большую совокупность фазовых вкладов, из наложения которых предлагает выводить как понятие расстояния, так и всю классическую геометрию [Там же, с. 480]. Эта же идея суммирования вкладов фаз всех возможных траекторий лежит в основе метода «интегралов по траекториям». И, наконец, бинарная геометрофизика и концепция «суммирования сосуществующих возможностей» совпадают в том, что интерпретируют переход из возможного состояния в действительное через суммирование комплексных фаз (отношений).

Возражение №13. Как отмечает М.Б. Менский, за последние десятилетия стало понятно, как когерентная суперпозиция при измерении переходит в смесь, но в физических терминах не может быть объяснено, как происходит выбор одного из многих элементов этой смеси (или одного из членов исходной суперпозиции) [105, с. 20]. В фейнмановском интеграле для изолированной системы интегрирование проводится по всем возможным путям, но для реальной, непрерывно измеряемой системы, интеграл, выражающий пропагатор (оператор эволюции), по мнению Менского, должен быть ограничен подмножеством путей, совместимых с результатом измерения, таким образом, учитывается информация обо всех взаимодействиях системы с окружающими объектами [Там же, с. 107]. И, поскольку цепочка измерений (декогеренций) порождает все новые и новые альтернативы, одной декогеренции недостаточно для объяснения механизма выбора единственной классической альтернативы. Есть точка, в которой есть

только одна альтернатива, эта точка – сознание, которое Менский рассматривает как окно в квантовый мир, позволяющее видеть только одну из возможных альтернатив или, в терминах многомировой интерпретации Х. Эверетта, один из многих миров [Там же, с. 199].

Во-первых, ссылка на сознание, как на фактор выбора физических состояний, имеет право на существование, но пока она недостаточно обоснована, поскольку не сопровождается описанием физического механизма работы этого «окна». Во-вторых, не понятно, образуются ли классические состояния в отсутствии сознания, какие объекты имеются в виду под «сознающими», и почему выбор сознания в одних областях природы подчиняется однозначным классическим законам, а в других – законам вероятностным. С точки зрения концепции «суммирования сосуществующих возможностей» альтернативные возможности в суперпозиции описывают возможные траектории или состояния системы не вообще, а в данных граничных условиях, так как система предполагается открытой. Как отмечает В. Зурек, окружение объекта индуцирует правило суперотбора, которое приводит к наблюдаемости некоторых суперпозиций [67]. Наблюдатель или система с сознанием не имеют принципиального преимущества перед остальными объектами, поскольку каждая система во Вселенной вносит в качестве граничных условий свой уникальный вклад в формирование «пакета» возможностей других систем, соответственно меняется их устойчивое стационарное движение или состояние. Одна из возможностей имеет преимущество перед остальными потому, что ее вероятность максимальна или, что то же самое, реальность, соответствующая этой возможности, и образуемая путем интерференции остальных возможностей, более устойчива, чем другие возможные реальности. Именно эта реальность «наблюдается» другими системами, независимо от наличия у них сознания. Все другие возможности в результате сложения (интерференции фаз) взаимно компенсируются, продолжая существовать как возможные. Так отпадает необходимость во множестве других миров, достаточно мира возможного и производного от него – мира действительного.

3.5.2 Трудности и нерешенные проблемы предлагаемого решения

Ни одна новая теория не способна ответить на все вопросы. Мало того, хорошая теория взамен решенных проблем ставит новые. Концепция «суммирования сосуществующих возможностей» и вероятностная интерпретация ПНД, как любая теория имеют свои недостатки и ограничения. Перечислим часть из них.

1) Поскольку основная часть предложенного решения опирается на квантовый метод «интегралов по траекториям» и механизм декогеренции, каждое открытие, каждое новое решение в этой области, может внести в него существенные коррективы. Известно, что метод «интегралов по траекториям» встречает некоторые трудности в квантовой теории поля. Об этом говорил и сам Фейнман. Например, о том, что «полуцелый спин электронов не имеет простого и ясного представления в нашем методе» [169, с. 377]. Или о том, что «фактически интегрирование по траекториям ни тогда, ни впоследствии не стало удовлетворительным способом устранения расходимостей квантовой электродинамики» [Там же, с. 12]. Особо Фейнман подчеркивал: «у нас нет совершенно удовлетворительной модели релятивистской квантовой механики, которая согласовалась бы если не с явлениями природы, то, по крайней мере, с элементарной логикой, требующей, чтобы сумма вероятностей всех альтернатив составляла 100 процентов» [172, с. 228]. Еще одна трудность связана с тем, что у электронов и у фотонов взаимодействие отличается. Электроны принадлежат к группе фермионов, которые избегают занимать одно и то же состояние, фотоны принадлежат к группе бозонов, и имеют тенденцию группироваться в одном и том же состоянии. Поэтому для бозонов фазы необходимо складывать, удваивая амплитуду вероятности, а для фермионов фазы аннулируют друг друга [256].

2) Остается невыясненным, почему формы ПНД для отдельных областей физики так сильно отличаются. Не понятно, какова непосредственная связь между разными формами действия – разностью кинетической и потенциальной энергии в

классической механике, собственным временем и кривизной в общей теории относительности, амплитудой вероятности и фазой волновой функции в квантовой механике. Почему действие связано с переходом одной формы энергии в другую. Существуют проблемы и в решении вариационных задач физики и математики [См., например: 173].

3) До тех пор, пока мы не выясним, каким образом действие или изменение фазы волновой функции связано с энергией и пространством-временем, мы не сможем полностью переформулировать известные законы в терминах суммирования сосуществующих альтернативных возможностей. Пока не найден ответ на вопрос, почему любая форма действия инвариантна относительно преобразований пространства-времени, до тех пор, вряд ли прояснится онтологическая связь трех ключевых понятий – вероятности, симметрии и сохранения.

4) Если интерференция возможностей происходит с бесконечной скоростью, необходимо показать, как это соотносится с общей теорией относительности.

5) Помещая источник любой активности и причину любых изменений внутрь объектов, концепция «суммирования сосуществующих возможностей» ничего не говорит о природе этой активности, о ее свойствах и влиянии на механизм интерференции. Не рассмотрено также, каким образом внутренняя активность отдельных объектов преобразуется во внутреннюю активность систем, состоящих из этих объектов. Ничего не говорится о том, что происходит с «пакетами» возможностей частей, когда они объединяются в целое, каков механизм одновременного использования своих возможностей частями и целым, и как они интерферируют друг с другом.

6) Если в результате взаимодействия объектов возникают новые возможности, что происходит с возможностями не реализованными? Если они сохраняются, то, как и где? С другой стороны, неясен механизм сохранения информации о реализованных возможностях.

7) И, наконец, самая актуальная проблема связана с развитием. В предлагаемой концепции пока ничего не сказано о том, как процесс реализации

возможностей связан с направлением стрелы времени и каким образом суммирование возможностей связано с эволюцией сложных саморазвивающихся систем.

Как уже было отмечено, критика и возражения – это лучший способ проверить на прочность любую новую гипотезу. Только многократные сравнения с другими теориями способны оценить ее жизнеспособность. И, как показывает история любых идей, основная трудность заключается в необходимости подвергнуть сомнению философские и методологические основания привычных парадигм, как философских, так и научных.

Заключение

Исследования, выполненные в диссертационной работе, посвящены задачам философского обобщения экстремальных принципов на основе вероятностной интерпретации принципа наименьшего действия (ПНД). Научная задача, которая решается в данной работе, заключается в систематизации философских и методологических проблем ПНД, а также в анализе вариантов их решения в философском, научном и историческом контексте.

В диссертации проведен исторический анализ возникновения экстремальных принципов в основных областях естествознания. Сформулированы и классифицированы нерешенные философские и методологические проблемы, возникающие при использовании этих принципов. Рассмотрена связь ПНД с философскими категориями «возможного» и «действительного». Исследовано место ПНД в системе физических законов и возможные связи между частными формами ПНД в разных разделах физики. Исследованы возможные решения проблем причинности в ПНД. Таким образом, задачи исследования, сформулированные во Введении, решены. К основным результатам диссертационной работы относится следующее.

Выявлены общие закономерности создания экстремальных принципов, описана их ключевая роль в развитии научных теорий XIX и XX веков. Показано, что решение философских и методологических проблем этих принципов возможно только путем синтеза опыта их научного использования, осмысления последних достижений квантовой физики и философского анализа категорий реальности, возможности, пространства, причинности, вероятности, случайности.

Показано, что экстремальные принципы, связанные с ПНД, обладают рядом общих свойств. Двадцать таких принципов из разных областей естествознания приведены к общей модельной схеме. Сформулирована гипотеза, что уникальная роль ПНД в развитии естествознания связана не только с его эвристическими свойствами, но и с его онтологическим содержанием. ПНД и другие

экстремальные принципы можно рассматривать как физическую модель философской идеи перехода возможного существования в наблюдаемую действительность. Для этого достаточно возможные или виртуальные движения физических объектов рассматривать не просто как математическую абстракцию или удобную модель, а как реальные движения «в возможности», имеющие определенную степень существования вне обычного пространства-времени.

На основе механизма суммирования и отбора возможных альтернативных траекторий на квантовом уровне в действительные классические траектории и релятивистские мировые линии предложена обобщенная вероятностная интерпретация ПНД. Показано, что вариационные принципы классической и релятивистской механики являются частными случаями законов квантовой механики, а их физический смысл может быть объяснен с помощью метода «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана. Так же объясняются принципы Гюйгенса и Ферма, лежащие в основе оптико-механической аналогии физики. Показано, что все экстремальные принципы выражают максимальную вероятность того или иного движения или состояния.

В соответствии с предложенной концепцией «суммирования сосуществующих возможностей» все возможные альтернативные движения физической системы сосуществуют в суперпозиции. Иначе говоря, физическая система находится сразу во всех движениях, возможных при данных граничных условиях в соответствии с данными степенями свободы. В результате сложения всех возможных движений, одно из них становится результирующим, и его вероятность всегда максимальна. Для различных типов систем максимум вероятности проявляется через минимумы или максимумы одной или нескольких характеристик системы (действие, оптическая длина, разность кинетической и потенциальной энергии, принуждение, собственное время, кривизна и т.д.), что находит свое выражение в частных формах ПНД. Результирующее движение системы становится действительным, и может быть наблюдаемо в 4-х мерном пространстве-времени. Все остальные возможные движения продолжают сосуществовать, участвуя в суперпозиции, но остаются не реализованными и не

наблюдаемыми вплоть до изменения граничных условий. Величина действия в ПНД становится мерой реализации конкретного возможного движения системы.

В вероятностной интерпретации ПНД действительное движение рассматривается, как следствие имманентного свойства физических систем и их частей реализовывать максимальное число своих возможных движений при одновременном сохранении максимальной степени своей свободы. Каждая отдельная возможность системы однозначна, а процесс использования системой максимума своих возможностей – необходим и однозначен. Суммарный результат использования системами всех возможностей необходим, но не однозначен, а мерой неоднозначности является вероятность. Таким образом, взаимодействие систем характеризуется, с одной стороны, случайностью и неоднозначностью результатов изменения их возможностей, с другой, необходимостью и однозначностью механизмов взаимодействия этих возможностей.

В качестве основы физических явлений рассматривается не устойчивость или экстремальность, а мера вероятности осуществления одного из возможных движений или состояний. Вместо целевой причинности каждой системы достичь конкретного конечного состояния, предлагается опираться на внутреннюю причинность всех систем. То, что мы наблюдаем как целенаправленное движение конкретной физической системы, является результатом суммирования всех возможных движений всех взаимодействующих в данных условиях систем. Ни одна система не «знает» заранее своего действительного конечного состояния и ничего не «выбирает». Целью или конечной причиной любой системы является не конкретное состояние, и даже не устойчивое равновесие, а максимальная реализация всех имеющихся в данных условиях возможностей системы по сохранению и изменению ее движения. Выбор, точнее, отбор производится механизмом сложения возможностей.

Суммирование сосуществующих возможностей обосновано с точки зрения физики. Возможные движения находятся в квантовой суперпозиции, и происходят сразу во всех размерностях n -мерного пространства любой топологии. Суперпозиция возможных квантовых траекторий путем совместного действия механизмов декогеренции и интерференции преобразуется в макроскопическом

масштабе в действительную классическую траекторию или релятивистскую мировую линию. Таким образом, классическая реальность может рассматриваться как предельное и относительное проявление квантовой реальности, а их разделение происходит через физические механизмы декогеренции и интерференции.

Выводы исследования согласуются с основными методологическими принципами научного познания – принципами соответствия, симметрии, простоты и согласованности.

Следует признать существование целого ряда серьезных возражений против вероятностной интерпретации ПНД, их критическому анализу посвящен отдельный параграф. Там же перечислены новые проблемы и вопросы, оставшиеся нерешенными.

Выводы диссертации обладают некоторой *теоретической и практической значимостью*.

1) За счет модификации сетки категорий реальности и причинности результаты исследования позволяют по-новому взглянуть на онтологические постулаты физики, что может способствовать эвристике нового научного поиска и решению философских проблем естествознания. Создается основа для логического и философского обоснования универсальной эффективности экстремальных принципов.

2) Для решения проблемы телеологии, вместо отдельного изучения множества причин – действующих или конечных, внешних или внутренних, может рассматриваться единая онтологически значимая внутренняя причина каждой системы, независимо от ее типа, размера и сложности.

3) Вероятностную интерпретацию ПНД можно использовать для обобщения экстремальных принципов необратимых процессов в сложных саморазвивающихся системах, как физических, так и биологических.

У концепции «суммирования сосуществующих возможностей» и вероятностной интерпретации ПНД возможно несколько направлений развития.

В философии физики. Во-первых, вероятностная интерпретация ПНД, как способ решения проблемы соотношения однозначной и вероятностной

причинности, может быть полезна для описания связи статистических законов термодинамики и вероятностных законов квантовой механики. Во-вторых, известный космолог С. Хокинг отмечает два главных свойства, которыми должна обладать будущая квантовая теория гравитации. Она должна включать в себя фейнмановскую схему, представляющую квантовую теорию в терминах интегралов по траекториям. Другой ее частью должна быть идея Эйнштейна о том, что в искривленном пространстве частицы стремятся следовать по пути, наиболее приближенному к прямой линии, но поскольку пространство-время не является плоским, их траектории выглядят изогнутыми, как если бы на них действовало гравитационное поле [183, с. 117]. С точки зрения вероятностной интерпретации ПНД, оба условия – это частные случаи одной общей идеи. В-третьих, вероятностная трактовка ПНД может оказаться полезной для развития суперструнных теорий, поскольку она не ограничивает число размерностей пространства-времени, а метод «интегралов по траекториям» уже используется для расчетов характеристик струн.

В философии сложных саморазвивающихся систем и биологии, в том числе в синергетике. С одной стороны, возможность уравнивания в правах действующих и конечных причин снимает остроту проблемы соотношения целесообразного и «целеподобного» поведения, имеющей в синергетике большое значение [См.: 75]. С другой стороны, для саморазвивающихся систем приходится вводить понятие целевой причинности, поскольку «аттрактор всегда втягивает систему в определенное русло развития, меняя вероятности первоначальных сценариев как возможных направлений эволюции системы» [162]. С помощью концепции «суммирования сосуществующих возможностей» можно по-новому описать механизм отбора состояний диссипативных систем в точках бифуркации. Вместо «поиска устойчивости» [См.: 112, с. 89] можно использовать понятие суммирования или интерференции всех возможных состояний, ведущих к состоянию с максимальной вероятностью. Результатом такого отбора, по словам В.П. Бранского, является «флуктуация, т.е. реализация (превращение возможной бифуркационной структуры в действительную) одной из бифуркационных структур» [23, с. 73]. Предложенная концепция может быть использована и в

описании эволюции биологических систем. Не случайно, принцип максимума биологической информации [См.: 48] использует понятие вероятности, обобщая ряд экстремальных принципов теории информации, а большинство экстремальных принципов современной биологии [См.: 180] опираются на экстремальные принципы неравновесных термодинамических и химических систем.

В философии и методологии науки. Концепция «суммирования сосуществующих возможностей» позволяет по-новому взглянуть на такие проблемы науки, как причинность, единство и иерархия физических законов из разных областей знания, связи понятий и аксиом, используемых для описания различных типов явлений. Закладываются основы для рационального объяснения «непостижимой» эффективности не только аналитической механики, но и математики в целом. Концепция дает новые аргументы для опровержения распространенного субъективистского понимания вероятности, как результата неполноты наших знаний (К. Поппер).

В философии в целом. Для других специалистов в области философии концепция «суммирования сосуществующих возможностей» может быть полезна в понимании категорий случайности и необходимости. Пригодится она и в анализе соотношения возможного и действительного модусов существования систем. Дальнейшее развитие могут получить решения философских проблем всеобщей внутренней активности объектов, независимо от их типа и сложности.

Список литературы

- 1 Аквинский Ф. Сумма теологии. Часть I. Вопросы 1-43. – Киев : Ника-Центр, Эльга; – СПб. : Алетейя, 2007. – 560 с.
- 2 Акчурин И. А. Причины телеономические и формообразующие: первые шаги в рациональном понимании // Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме / Отв. ред. Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков. – М. : Наука, 2002.
- 3 Аристотель. Метафизика // Аристотель. Сочинения. – Калининград : Янт. сказ, 2002. – 544 с.
- 4 Антология мировой философии. В 4 т. – М. : Мысль, 1969. – Т. 1. Ч. 2. – 361 с.
- 5 Архитектура виртуальных миров / Под науч. ред. М. Б. Игнатьева, А. В. Никитина, А. Е. Войскунского. – СПб. : ГУАП, 2009. – 238 с.
- 6 Ассеев В. А. Экстремальные принципы в естествознании и их философское содержание. – Л. : ЛГУ, 1977. – 232 с.
- 7 Ассеев В. А. : 1) Синергетика и проблемы редукции биологии к физике. // Вестник СПбГУ. Сер. 6. – Вып. 2. – 1996 ; 2) Возможность оптимального развития ноосферы // Космизм и новое мышление на Западе и Востоке. – СПб., 1999 ; 3) Возможности интеграции современной науки, философии и культуры // Реальность и субъект. – Т.2. № 1. – СПб., 1998. – 43 с. ; 4) Синергетика и проблема соотношения эволюции в физике и биологии // Синергетика методы науки / Под ред. Басина М. А. – СПб. : Наука, 1998. – 438 с.
- 8 Афанасьева В. В. Тотальность виртуального. – Саратов: Научная книга, 2005. – 100 с.
- 9 Баженов Л. Б. Вероятностная причинность и теория пропензитивности К. Поппера // Спонтанность и детерминизм / В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др.; Ин-т философии РАН. – М. : Наука, 2006.

- 10 Бердичевский В. Л. Вариационные принципы механики сплошной среды. – М. : Наука, 1983. – 448 с.
- 11 Бердяев Н. А. Смысл творчества. – М. : АСТ, 2006. – 316 с.
- 12 Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена. – М. : Энергия, 1975. – 209 с.
- 13 Бом Д. Причинность и случайность в современной физике. – М. : изд-во Иностранная литература, 1959. – 249 с.
- 14 Борн М. Интерпретация квантовой механики // Физика в жизни моего поколения. Сборник. – М. : изд-во Иностранная литература, 1963. – 265 с.
- 15 Борн М. Причина, цель и экономия в законах природы (Минимальные принципы в физике) // Физика в жизни моего поколения. Сборник. – М. : изд-во Иностранная литература, 1963. – 265 с.
- 16 Борн М. Физика в жизни моего поколения. Сборник. – М. : изд-во Иностранная литература, 1963. – 265 с.
- 17 Борн М. Физика и метафизика // Физика в жизни моего поколения. Сборник. – М. : изд-во Иностранная литература, 1963. – 265 с.
- 18 Борн М. Атомная физика. – М. : Мир, 1965. – 492 с.
- 19 Борчиков С. А. Метафизика виртуальности // Труды лаборатории виртуалистики. Вып. 8. – М., 2000. – 49 с.
- 20 Бранский В. П., Ильин В. В. Взаимодействие // Диалектика материального мира. Онтологическая функция материалистической диалектики / Под ред. В. В. Ильина и Д. А. Гущина. – Л. : изд-во ЛГУ, 1985. – 146 с.
- 21 Бранский В. П., Ильин В. В. Возможность и действительность // Диалектика материального мира. Онтологическая функция материалистической диалектики / Под ред. В. В. Ильина и Д. А. Гущина. – Л. : изд-во ЛГУ, 1985. – 146 с.
- 22 Бранский В. П., Ильин В. В. Необходимость и случайность // Диалектика материального мира. Онтологическая функция материалистической диалектики / Под ред. В. В. Ильина и Д. А. Гущина. – Л. : изд-во ЛГУ, 1985. – 146 с.

- 23 Бранский В. П. Философия физики XX века. Итоги и перспективы. – СПб. : Политехника, 2003. – 253 с.
- 24 Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. – М.: Мир, 1996.
- 25 Бруно Дж. Философские диалоги: О Причине, Начале и Едином; О бесконечности, вселенной и мирах. – М. : Алетейа, 2000. – 320 с.
- 26 Бунге М. Причинность: Место принципа причинности в современной науке. – М. : изд-во Иностранная литература, 1962. – 504 с.
- 27 Бунге М. Философия физики. – М. : Прогресс, 1975. – 349 с.
- 28 Вайнберг С. Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. – М. : Едиториал УРСС. 2004. – 256 с.
- 29 Ванько В. И., Ермошина О. В., Кувыркин Г. Н. Вариационное исчисление и оптимальное управление. – М. : изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 488 с.
- 30 Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959. – 932 с.
- 31 Вейль Г. Гравитация и электричество // Эйнштейн и теория гравитации: Сборник статей / Под ред. Е. Куранского. – М. : Мир, 1979. – 592 с.
- 32 Визгин В. П. Развитие взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения в классической физике. – М. : Наука, 1972. – 241 с.
- 33 Визгин В. П. Принципы симметрии // Методологические принципы физики / Под ред. Б. М. Кедрова и Н. Ф. Овчинникова. – М. : Наука. 1975. – С. 268–342.
- 34 Визгин В. П. Этюд времени // Философские исследования. – 1999. – № 3.
- 35 Визгин В. П. : 1) Непостижимая эффективность аналитической механики в физике // Философия физики: Актуальные проблемы. Материалы научной конференции 17–18 июня 2010 года. – М. : ЛЕНАНД, 2010. – С. 17–20 ; 2) Непостижимая эффективность аналитической механики в физике // Метафизика. Век XXI. Альманах. Вып. 4 : метафизика и математика / Под. ред. Ю. С. Владимирова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – С. 275–290.
- 36 Виртуалистика: экзистенциальные и эпистемологические аспекты / Отв. ред. И. А. Акчурин. – М. : Прогресс-Традиция, 2004. – 384 с.

- 37 Владимиров Ю. С. Метафизика. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 568 с.
- 38 Гайденко П. П. Эволюция понятия науки: Становление и развитие первых научных программ. – М. : Наука, 1980. – 566 с.
- 39 Гайденко П. П. Научная рациональность и философский разум. – М. : Прогресс-Традиция, 2003. – 528 с.
- 40 Галеев Э. М., Тихомиров В. М. Оптимизация: теория, примеры, задачи. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 320 с.
- 41 Гаусс К. Об одном новом общем принципе механики // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, – 1959.
- 42 Гегель Г. В. Ф. Наука логики // Энциклопедия философских наук в 3-х Т. – М. : Мысль, 1975. – Т. 1.
- 43 Гейзенберг В. Шаги за горизонт. – М.: Прогресс, 1987. – 368 с.
- 44 Гейзенберг В. У истоков квантовой теории. – М.: Тайдекс Ко, 2004. – 400 с.
- 45 Гельмгольц Г. О физическом значении принципа наименьшего действия // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.
- 46 Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века? // В. Л. Гинзбург. О науке, о себе и о других: статьи и выступления. – М. : Физматлит, 2003.
- 47 Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 432 с.
- 48 Голицин Г. А., Левич А. П. Вариационные принципы в научном знании // Философские науки. – 2004. – №1. – С. 105–136.
- 49 Горбатенко М. В. Принцип наименьшего действия в общей теории относительности // Теоретическая и математическая физика. – Т. 115. – №2. 1998. – С. 305–311.
- 50 Горнштейн Т. Н. Философия Николая Гартмана. – Л. : Наука, 1969. – 278 с.

51 Горобей Н. Н. Физика. Квантовый принцип наименьшего действия в теории гравитации: учебное пособие / Н. Н. Горобей, А. С. Лукьяненко. Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. – СПб. : изд-во Политехнического ун-та, 2010.

52 Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. – М. : Едиториал УРСС, 2005. – 288 с.

53 Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. – Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 384 с.

54 Гросс Д. Грядущие революции в фундаментальной физике. Вторые публичные лекции по физике, ФИАН, 13.05.2006. Элементы. [Электронный ресурс]. – URL: <http://elementy.ru/lib/430177> (дата обращения 30.03.2013).

55 Д'Аламбер Ж. Космология // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.

56 Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора. – СПб. : Наука, 2001. – 565 с.

57 Де Бройль Л. Революция в физике. – М. : Атомиздат, 1965. – 234 с.

58 Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. – М. : Мир, 1974. – 234 с.

59 Евсеевичев Н. И. Новое в прочтение "Математических начал натуральной философии" Ньютона. Принцип наименьшего действия, которым владел автор "Начал" // Физическое образование в вузах. – М. : МФО, 2005. – Т.11. – № 4.

60 Зарипов Р. Г. Информация различия и переходы беспорядок-порядок. – Казань : изд-во КГТУ, 1999. – 153 с.

61 Зарипов Р. Г. Самоорганизация и необратимость в неэкстенсивных системах. – Казань : ФЭН, 2002. – 251 с.

62 Захаров В. Е., Кузнецов В. А. Гамильтоновский формализм для нелинейных волн // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167. – №11.

63 Зверев Г. Я. Физика без механики Ньютона, без теории Эйнштейна и без принципа наименьшего действия. – М. : ЛКИ, 2007. – 137 с.

- 64 Зинн-Жюстен Ж. Континуальный интеграл в квантовой механике. – М.: Физматлит, 2010. – 360 с.
- 65 Зеликин М. И. Оптимальное управление и вариационное исчисление. – М.: Эдиториал УРСС, 2004. – 160 с.
- 66 Зоммерфельд А. Квант действия Планка и его всеобщее значение для молекулярной физики // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М.: Физматгиз, 1959.
- 67 Зурек В. Декогеренция и переход от квантового мира к классическому. Los Alamos Science, – N. 27. – 2002. [Электронный ресурс] – URL: <http://quantum3000.narod.ru/> (дата обращения 30.03.2013).
- 68 Илларионов С. В. Теория познания и философия науки. – М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2007. – 536 с.
- 69 Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. – М.: УФН, 1997. – 396 с.
- 70 Каку М. Параллельные миры. Об устройстве мироздания, высших измерениях и будущем Космоса. – М.: София, 2008. – 416 с.
- 71 Кант И. Соч. в 6 т. – М.: Мысль, 1966. – Т. 3.
- 72 Кант И. Соч. в 6 т. – М.: Мысль, 1966. – Т. 5.
- 73 Киятина М. Н., Разумовский О. С. Принципы оптимизации человеческой деятельности. Философско-методологические аспекты. – Красноярск: изд-во КГТЭИ, 2004. – 263 с.
- 74 Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. – М.: Янус, 1995. – 624 с.
- 75 Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Основания синергетики. – СПб.: Алетейя, 2002. – 414 с.
- 76 Козлов В. В. Принцип Гаусса и реализация связей // Нелинейная динамика. – 2008. – № 4 (3). – С. 281–285.
- 77 Козлов В. В. Вариационный принцип для периодических траекторий обратимых уравнений динамики // ДАН. – 2010. – 430 (5). – С. 603–605.
- 78 Концепция виртуальных миров и научное познание. – СПб.: РХГИ, 2000. – 320 с.

- 79 Коротков Н. А. Феномен виртуальной реальности как объект научного анализа и философской рефлексии : Дисс. ... канд. фил. наук. СПб., – 2010.
- 80 Кротов В. Ф. Вариационный принцип упругого равновесия пространственно-временного континуума. – Иркутск: ИрГУ, 1987. – 111 с.
- 81 Кузанский Н. Соч.: в 2-х т. – М. : Мысль, 1980. – Т. 2.
- 82 Кузанский Н. Об ученом незнании. – СПб. : Азбука, 2001. – 305 с.
- 83 Кульбак С. Теория информации и статистика. – М.: Наука. 1967. – 408 с.
- 84 Кун Т. Структура научных революций. – М. : АСТ, 2003. – 365 с.
- 85 Лагранж Ж. Аналитическая механика. В 2-х т. – М.-Л. : Гостехиздат, 1950. – Т. 1. – 594 с.
- 86 Лакатос И. Избранные произведения по философии и методологии науки. – М. : Акад. Проект; Трикта, 2008. – 475 с.
- 87 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. – Т. V. Статистическая физика. Часть 1. – М. : Наука, 1964. – 568 с.
- 88 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. – Т. VI. Гидродинамика. – М. : Наука, 1988. – 736 с.
- 89 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. – Т. V. Статистическая физика. Часть 1. – М. : Наука, 1995.
- 90 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. – Т. II. Теория поля. – М. : Физматлит, 2003. – 534 с.
- 91 Ланцош К. Вариационные принципы механики. – М. : Физматгиз, 1965. – 408 с.
- 92 Лейбниц Г. В. Начала природы и благодати, основанные на разуме / Сочинения в 4-х т. – М. : Мысль, 1982. – 636 с. – Т. 1.
- 93 Лейбниц Г. В. Сочинения в 4 т., – М. : Мысль, 1982. – Т. 1.
- 94 Липкин А. И. Место понятий и принципов «парящих над» отдельными разделами физики // Актуальные вопросы современного естествознания. – Вып. 8. – 2010. – С. 51–58.
- 95 Липкин А. И. Две методологические революции в физике – ключ к пониманию оснований квантовой механики // Вопросы философии. – 2010. – Вып. 4. – С. 74–90.

96 Лосев А. Ф. Античный космос и современная наука / А. Ф. Лосев. Бытие. Имя. Космос. – М. : Мысль, 1993. – 958 с.

97 Луценко Е. В. Универсальный информационный вариационный принцип развития систем // Квантовая Магия. – Т. 5. Вып. 4. – 2008. – С. 4201–4267. [Электронный журнал] URL: <http://www.quantmagic.narod.ru/volumes/VOL542008/cont54.html> (дата обращения 29.03.2013).

98 Максимов Г. А. Обобщенный вариационный принцип для диссипативной гидродинамики и механики сплошной среды // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2. – № 4. – С. 92–104.

99 Малашенко Ю. Н. Онтология квантовомеханического объекта в свете диалектики возникновения нового // Материалы международной научной конференции «Современная онтология – IV: Проблемы метода» 28-30 июня 2010 г., Санкт-Петербург, Россия. – СПб. : СПбГУ, – 010. – Т. 2. – С. 298–315.

100 Мамчур Е. А. Причинность и рационализм // Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме / Отв. ред. Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков. – М. : Наука, 2002.

101 Мамчур Е. А. Спонтанность и телеологизм // Спонтанность и детерминизм / В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др.; Ин-т философии РАН. – М. : Наука, 2006.

102 Маркеев А. П. О принципе наименьшего принуждения // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №1, – С. 113–121.

103 Мартюшев Л. М., Сальникова Е. М. Развитие экосистем и современная термодинамика. – М.-Ижевск : ИКИ, 2004. – 80 с.

104 Мах Э. Механика. – СПб, 1909. – 405 с.

105 Менский М. Б. Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология. – М. : Физматлит, 2001. – 232 с.

106 Менский М. Б. Человек и квантовый мир. – Фрязино : Век2, 2005. – 320 с.

107 Мопертюи П. Законы движения и покоя, выведенные из общего метафизического принципа // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.

108 Мопертюи П. Согласование различных законов природы, которые до сих пор казались несовместимыми // Вариационные принципы механики Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.

109 Мякишев Г. Я. Динамические и статистические закономерности в физике. – М. : Наука, 1973. – 285 с.

110 Налимов В. В. Спонтанность сознания. Вероятностная теория смыслов и смысловая архитектура личности. – М. : Прометей, 2011. – 288 с.

111 Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. – М. : Едиториал УРСС, 1990. – 344 с.

112 Новая философская энциклопедия в 4 т. / Ин-т философии РАН; Нац. обществ.-науч. фонд; Предс. научно-ред. совета В. С. Степин. – М. : Мысль, 2000–2001.

113 Новейший философский словарь / Сост. и гл. н. ред. А. А. Грицанов. – Минск : Книжный Дом, 2003. – 1280 с.

114 Носов Н. А. Виртуальная реальность // Вопросы философии. – 1999. – № 10. – С. 152–164.

115 Ньютон И. Математические начала натуральной философии // Собр. трудов А. Н. Крылова. – Т. 7. – М.-Л. : изд-во АН СССР, 1936. – 229 с.

116 Овчинников Н. Ф. Причинность и мир предрасположенностей // Спонтанность и детерминизм / В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др.; Ин-т философии РАН. – М. : Наука, 2006.

117 Омеляновский М. Э. О взаимоотношении детерминизма и принципа причинности в физике // Спонтанность и детерминизм / В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др.; Ин-т философии РАН. – М. : Наука, 2006.

118 Пенроуз Р. Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. – М.–Ижевск : ИКИ, НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2007. – 912 с.

- 119 Печенкин А. А. Удалось ли реабилитировать причинность: Карл Поппер против «редукции волнового пакета» // Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме / Отв. Ред. Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков. – М. : Наука, 2002.
- 120 Планк М. Физические очерки. – М. : ГИЗ, 1925. – 136 с.
- 121 Планк М. Отрывок из «Теоретической физики» // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.
- 122 Планк М. Принцип наименьшего действия // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М., 1959.
- 123 Планк М. Единство физической картины мира. – М. : Наука, 1966. – 285 с.
- 124 Полак Л. С. Гамильтон и принцип стационарности действия. – М.–Л. : изд-во АН СССР, 1936. – 272 с.
- 125 Полак Л. С. Вариационные принципы механики // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.
- 126 Полак Л. С. В. Р. Гамильтон и принцип стационарного действия // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.
- 127 Полак Л. С. Вариационные принципы механики: Их развитие и применение в физике. – М. : ЛИБРОКОМ, 2010. – 610 с.
- 128 Полак Л. С., Визгин В. П. Теоремы Нетер в истории физики // История и методология естественных наук. Серия «Физика». – 1979. – Вып.22.
- 129 Поппер К. Р. Логика и рост научного знания. – М. : Прогресс, 1983. – 605 с.
- 130 Поппер К. Р. Квантовая теория и раскол в физике. – М. : Логос, 1998. – 192 с.
- 131 Поппер К. Р. Объективное знание. Эволюционный подход. – М. : Эдиториал УРСС, 2002. – 384 с.
- 132 Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. – М. : Эдиториал УРСС, 2003. – 240 с.

- 133 Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме / Отв. ред. Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков. – М. : Наука, 2002. – 245 с.
- 134 Разеев Д. Н. Телеологический принцип в науке (трансцендентальный подход) : Дис. ... докт. филос. наук. – СПб, 2009.
- 135 Разумовский О.С. Методологические проблемы экстраполяции и инверсии (вариационные принципы в науке) // Философия науки. – 995. – № 1 (1). – С. 65–75.
- 136 Разумовский О. С. Современный детерминизм и экстремальные принципы в физике. – М. : Наука, 1975. – 248 с.
- 137 Разумовский О. С. Экстремальные закономерности: категории наибольшего и наименьшего. – Новосибирск : Наука, 1988. – 134 с.
- 138 Разумовский О. С. : 1) От конкурирования к альтернативам: экстремальные принципы и проблема единства научного знания. – Новосибирск : Наука, 1983. – 225 с. ; 2) Методологические проблемы оптимизации в науке. – Новосибирск, 1991 ; 3) Оптимология. В 3 Ч. – Новосибирск : Ин-т фил. и права АН, 1999.
- 139 Рамачарака. Религии и тайные учения Востока. – М. : АСТ, 2006. – 429 с.
- 140 Рамишвили Г. В. Вильгельм фон Гумбольдт — основоположник теоретического языкознания // Гумбольдт В. Избранные труды по языкознанию. – М. : Прогресс, 2000. – 400 с.
- 141 Рамон П. Теория поля. Современный вводный курс. – М. : Мир, 1984. – 336 с.
- 142 Редхед М. Неполнота, нелокальность, реализм: пролегомены к философии квантовой механики. Кларендон : – Оксфорд, 1987, 1989 / Обзор. [Электронный ресурс]. Современная философия квантовой механики. – Эл. библиотека. URL: <http://ihst.ru/~aprech/redhed.pdf> (дата обращения: 28.03.2013).
- 143 Резников В. М. Вероятностные концепции: анализ оснований и приложений. – Новосибирск : Ин-т фил. и права АН, 2005. – 157 с.

144 Розенблют А., Винер Н., Бигелоу Дж. Поведение, целенаправленность и телеология // Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. – М. : Наука, 1983. – С. 297–307.

145 Розен Р. Принципы оптимальности в биологии. – М. : Мир, 1969. – 215 с.

146 Руденко А. П. Самоорганизация и прогрессивная эволюция в природных процессах в аспекте концепции эволюционного катализа // Росс. Хим. журн. – 1995. – Т. 39. – № 2. – С. 55–71.

147 Сачков Ю. В. Вероятностная революция в науке: (Вероятность, случайность, независимость, иерархия). Ин-т философии РАН. – М. : Науч. мир, 1999. – 142 с.

148 Сачков Ю. В. Автономность в причинных сетях // Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме / Отв. ред. Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков. – М. : Наука, 2002.

149 Сачков Ю. В. Взаимодействия, вероятность, виртуалистика // Теоретическая виртуалистика: новые проблемы, подходы и решения / Ин-т философии РАН. – М. : Наука, 2008.

150 Сачков Ю. В. Эволюция учения о причинности // Спонтанность и детерминизм / В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др.; Ин-т философии РАН. – М. : Наука, 2006.

151 Свентицкий И. И. Фундаментальные проблемы науки и истоки их решения // Аграрная наука. – 2001, – № 3,4.

152 Свентицкий И. И. Закон электромагнитной инерции Ленца и феноменальные принципы физики // Электричество. – 2003. – № 8. – С. 16–20.

153 Сбитнев В. И. Бомовские траектории и парадигма интегрирования по путям. Комплексная Лагранжева механика // Квантовая Магия. – Т. 5. – Вып. 4. – 2008. – С. 4132-4147. Электронный журнал. URL: <http://www.quantmagic.narod.ru/volumes/VOL542008/cont54.html> (дата обращения 29.03.2013).

154 Севальников А. Ю. Интерпретации квантовой механики. В поисках новой онтологии. – М.: Либроком, 2009. – 192 с.

155 Сергеев Э. В. Самоорганизация переменных механических и биотехнических систем на основе принципа наименьшего действия / Под. ред. О. Н. Боксера. – Шуя : ШПИ, 1995. – 71 с.

156 Смородинов Р. А. Философские проблемы микрофизики // Философия науки. – 2009. – Т. 42. – №3. – С. 68–88.

157 Современный детерминизм и наука. Сб. статей / Под. ред. Г. А. Свечников. – Новосибирск, 1975. – 320 с.

158 Солодухо Н. М. Понимание онтологического статуса небытия // Известия КГАСУ. – 2006. – №1 (5).

159 Спонтанность и детерминизм / В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др.; Ин-т философии РАН. – М. : Наука, 2006. – 323 с.

160 Степин В. С. Теоретическое знание. – М. : Прогресс-Традиция, 2000. – 744 с.

161 Степин В. С. Саморазвивающиеся системы и философия синергетики / Материалы международной конференции "Путь в будущее – наука, глобальные проблемы, мечты и надежды". 26–28 ноября 2007 года. – ИПМ РАН, Москва.

162 Степин В. С. Творчество А. А. Зиновьева и любовь к мудрости. Доклад на международной конференции «Зиновьевские чтения в Московском университете». 6–7 ноября 2008 года. – МГУ, Москва. [Электронный ресурс] URL: <http://www.zinoviev.ru/ru/conference/stepin.html> (дата обращения 28.03.2013).

163 Теоретическая виртуалистика: новые проблемы, подходы и решения – М. : Наука, 2008.

164 Терехович В. Э. Многомерность пространства как новая парадигма науки. Теория суперструн // Труды членов РФО. – М., – 2008. – Вып. 15. – С. 318–326.

165 Томалинцев В. Н. Экстремальные принципы в человекознании: Автореф. дис. ... докт. филос. наук. Санкт-Петерб. гос. ун-т. – СПб., 2001.

166 Уитроу Дж. Естественная философия времени. – М. : Прогресс, 1964. – 431 с.

- 167 Уиттекер Э. Т. Аналитическая динамика. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 504 с.
- 168 Фейнман Р. Характер физических законов. – М. : Наука, 1987. – 160 с.
- 169 Фейнман Р., Хибс А. Квантовые интегралы по траекториям. – М. : Мир, 1968. – 384 с.
- 170 Фейнман Р. Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 3: Излучения. Волны. Кванты. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 240 с.
- 171 Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 6: Электродинамика. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 352 с.
- 172 Фейнман Р. Нобелевская лекция «Разработка квантовой электродинамики в пространственно-временном аспекте» // Сб. Характер физических законов. – М. : Мир. 1968.
- 173 Филиппов В. М., Савчин В. М., Шорохов С. Г. Вариационные принципы для непотенциальных операторов // Итоги науки и техники. Совр. проблемы математики. Нов. достижения. – 1992. – Т. 40.
- 174 Филатов Ю. А. Начала телеологии (основы науки о целях и целесообразности). – М. : АКАЛИС, 2008. – 235 с.
- 175 Философский словарь / Под ред. И. Т. Фролова. – М. : Политиздат, 1981. – 445 с.
- 176 Фок В. А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. – Т. LXII, – Вып. 4. – 1957.
- 177 Фок В. А. Квантовая физика и строение материи // Структура и формы материи. – М., 1967. – С. 179.
- 178 Фролов И. Т. : 1) О причинности и целесообразности в живой природе. – М., 1961 ; 2) Проблема целесообразности в свете современной науки. – М., 1971.
- 179 Фролов И. Т. Детерминизм и телеология / Сост. Г. Л. Белкина. – М. : ЛИБРОКОМ, 2010. – 272 с.
- 180 Фурсова П. В., Левич А. П., Алексеев В. Л. Экстремальные принципы в математической биологии // Успехи современной биологии, – 2003, – Т. 123, – № 2, – С. 115-137.

- 181 Хакен Г. Синергетика: Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 419 с.
- 182 Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. – М. : Мир, 1991. – 240 с.
- 183 Хокинг С., Млодинов Л. Кратчайшая история времени. – СПб. : Амфора, 2006. – 184 с.
- 184 Хоружий С. С. Род или недород? // Вопросы философии. – № 6, – 1997. – С. 53.
- 185 Цехмистро И. З., Штанько В. И. и др. Концепция целостности. – Харьков : Изд-во Харьковского гос. ун-та, 1987.
- 186 Цехмистро Л. Н. Эволюция и методологическое значение понятия действия в физике: Дис. ... канд. филос. наук. Харьковский инженерно - педагогический ин-т. Харьков, 1992.
- 187 Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. – М. : Мир, 1966. – 136 с.
- 188 Циолковский К. Э. Грезы о земле и небе. – Тула : Приок. кн. изд-во, 1986. – 448 с.
- 189 Шредингер Э. Квантование как задача о собственных значениях // Вариационные принципы механики / Под ред. Л.С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.
- 190 Шредингер Э. Что такое жизнь? Точка зрения физика. – М. : Атомиздат, 1972. – 88 с.
- 191 Штофф В. А. Моделирование и философия – М. : Наука, 1966. – 302 с.
- 192 Эддингтон А. Теория относительности. – М.-Л., 1934. – 598 с.
- 193 Эддингтон А. Пространство, время и тяготение. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 216 с.
- 194 Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. – М. : Мир, 1973. – 214 с.
- 195 Эйлер Л. Письмо к Мопертюи от 10 декабря 1745 // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.

- 196 Эйлер Л. Диссертация о принципе наименьшего действия // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.
- 197 Эйнштейн А. Принцип Гамильтона и общая теория относительности // Вариационные принципы механики / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Физматгиз, 1959.
- 198 Эйнштейн А. Собрание научных трудов в 4 Т. – М. : Наука, 1965. – Т. 1.
- 199 Эткинз П. Десять великих идей науки. Как устроен наш мир. – М. : АСТ : Астрель, 2008. – 384.
- 200 Эшби У. Введение в кибернетику. – М. : Иностранная литература, 1959. – 432 с.
- 201 Якоби К. Лекции по динамике, – Л.- М., 1936.
- 202 Янг Л. Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления. – М. : Мир, 1974. – 488 с.
- 203 Vaccigaluppi G. The Role of Decoherence in Quantum Mechanics. The Stanford Encyclopedia of Philosophy / Ed. Edward N. Zalta. – 2008. URL: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-decoherence> (30/03/2013).
- 204 Barrett J. Are our best physical theories (probably and/or approximately) true? // Philosophy of science. East Lansing. – 2003. – Vol. 70. – Is. 6. – P. 1206–1218.
- 205 Belnap N. Branching space-time // Synthese. – 1992. – Vol. 92. – P. 385-434. Postprint. 2003. URL: <http://philsci-archive.pitt.edu/1003/> (30/03/2013).
- 206 Belnap N. Probabilities and propensities // Studies in history and philosophy of modern physics. – 2007. – Vol. 38. – P. 593–625.
- 207 Bohm D. Wholeness and the Implicate Order. – London : Routledge, 1980. – 304 p.
- 208 Bohm, D. A new theory of the relationship of mind and matter // Philosophical Psychology. – 1990. – Vol. 3(2). – P. 271–286.
- 209 Bressan A. On physical possibility // Italian studies in the philosophy of science / Ed. L. D. Chiara, D. Reidel. – Dordrecht : Publishing Company, 1980. – P. 197–210.

210 Brizard A. J. *An Introduction to Lagrangian Mechanics*. – Singapore : World Scientific, 2008. – 259 p.

211 Bunge M. Virtual processes and virtual particles: real or fictitious? // *International Journal of Theoretical Physics*. – 1970. – Vol. 3. – P. 507–508.

212 Choonsuk Oh, Roy Frieden B. Restoration of a Poisson distributed image using a principle of extreme physical information / *Optics Communications*. – 2009. – Vol. 282. – Is. 13-1. – P. 2489–2494.

213 Douglas R. Stochastically branching spacetime topology // *Time's arrows today: Recent physical and philosophical work on the direction of time* / Ed. S. F. Savitt. – Cambridge : Cambridge University Press, 1995.

214 Dyson F. *Infinite in all direction*. – N.Y. : Harper and Row, 1988.

215 Dyson F. *Advanced Quantum Mechanics*. – Singapore : World Scientific, 2007. – 220 p.

216 Edwards A. W. F. Maximisation principles in evolutionary biology // *Philosophy of Biology* / Ed. by: M. Matthen and C. Stephens. 2007. – Elsevier B.V. – P. 335–347.

217 Elitzura S., Rabinovicia E. and Sarkissiana G. On Least Action D-Branes. CERN-TH/98-205RI-7-98 June 1998. – Preprint: arXiv:hep-th/9807161v3 29. Jan 1999.

218 Everett H. Relative State Formulation of Quantum Mechanics // *Reviews of modern physics*. – 1957. – Vol. 29. – Is. 3. – P. 454–462.

219 Falkenburg B. *Particle metaphysics*. – Berlin and New York : Springer-Verlag, 2007. – P. 233.

220 Feynman R. The principle of Least Action in Quantum mechanics // *Feynman's thesis: A new approach to quantum theory* / Ed.: L. M. Brown. Hackensack, – N. J. et al. : World scientific, 2005.

221 Fox T. Haunted by the spectre of virtual particles: a philosophical reconsideration // *Journal for General Philosophy of Science*. – 2008. – Vol. 39. – P. 35–51.

222 Giavalisco M., Mancinelli B., Mancinelli P. J., Yahil A. A generalized Zel'dovich approximation to gravitational instability // *ApJ*. – 1993. – Vol. 411. – Is.. 9. – P. 9–15.

- 223 Gillies D. Varieties of propensity // Brit. J. For the philosophy of science. Aberdeen. – 2000. – Vol. 51. – Is. 4.
- 224 Goldstine H. A History of the Calculus of Variations from the 17th Through the 19th Century. – New York : Springer, 1980. – 410 p.
- 225 Goldstein H., Poole C. and Safko I. Classical Mechanics / 3rd ed. – New York : Addison-Wesley, 2002. – 680 p.
- 226 Gorobey N. N., Lukyanenko A. S. Quantum Action Principle in Relativistic Mechanics. URL : <http://arxiv.org/abs/0812.1336v1>. – 2008 (30/03/2013).
- 227 Gray C. G., Karl G. and Novikov V. A. From Maupertuis to Schrödinger. Quantization of Classical Variational Principles // Am. J. Phys. – 1999. – Vol. 67. – P. 959–961.
- 228 Gray C. G., Karl G. and Novikov V. A. Progress in Classical and Quantum Variational Principles // Rep. Prog. Phys. – 2004. – Vol. 67. – P. 159–208.
- 229 Gray C. G. and Poisson E. When Action is Not least for Orbits in General Relativity // Am. J. Phys. – 2010. – Vol. 78.
- 230 Gray C. G. and Taylor E. F. When Action is Not Least // Am. J. Phys. – 2007. – Vol. 75. – P. 434–458.
- 231 Hanc J., Taylor E. F. From Conservation of Energy to the Principle of Least Action: A Story Line // Am. J. Phys. 2004. Vol. 72. Is. 4. P. 514–521.
- 232 Hanc J., Tuleja S. and Hancova M. Simple derivation of Newtonian mechanics from the principle of least action // Am. J. Phys. – 2003. – Vol. 71. – Is. 4. – P. 386–391.
- 233 Inaba M. Quantum mechanics from a fluctuation in the Cosmos // International Journal of Modern Physics A. – 2001. – Vol. 16. – Is. 17.
- 234 Jammer M. The Philosophy of Quantum Mechanics. – Wiley, 1974. – 536 p.
- 235 Kastrup H. A. Canonical Theories of Lagrangian Dynamical Systems in Physics // Physics Reports. – Vol. 101. – Is. 1–2. – P. 1–167.
- 236 Katzav J. Dispositions and the principle of least action // Analysis. – 2004. – Vol. 64.3. – P. 206–214.
- 237 Koons R. C. Functionalism without Physicalism: Outline of an Emergentist program. PCID // Journal of ISCID. – 2003. – Vol. 2.3. URL :

www.newdualism.org/papers/R.Koons/Koons_NeoFunctionalism_103103.pdf.
(30.03.2013).

238 Lebedev S., Tsui W. H., Gelder P. V. Drawing Movements as an Outcome of the Principle of Least Action // *Journal of Mathematical Psychology*. – 2001. – Vol. 45. – Is. 1. – P. 43–52.

239 Lemons D. S. Perfect form: Variational principle, methods, and applications in elementary physics. – Princeton : Princeton University Press, 1997. – 144 p.

240 Lewis D. On the plurality of worlds. – Oxford and New York : Basil Blackwell, 1986.

241 Lützen J. Mechanistic Images in Geometric Form: Heinrich Hertz's Principles of Mechanics. – Oxford : Oxford U.P., 2005.

242 Marchal C. How the Method of Minimization of Action Avoids Singularities // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 2002. – Vol. 83. , – N. 1–4. – P. 325–353.

243 Mayr E. Teleological and Teleonomic, a New Analysis // *A Portrait of Twenty-five Years*. – Boston : Boston Studies in the Philosophy of Science., 1985. – P. 133-159.

244 McCall S. A model of the universe: time, probability, and decision. – Oxford : Oxford University Press, 1994. – 344 p.

245 McCall S. Time flow, non-locality, and measurement in quantum mechanics // *Time's arrows today: Recent physical and philosophical work on the direction of time* / Ed. S. F. Savitt. – Cambridge : Cambridge University Press, 1995.

246 Moore T. A. in the entry on “least-action principle” in *Macmillan Encyclopedia of Physics*. – New York : Simon & Schuster Macmillan. 1996. – Vol. 2. – P. 840–842.

247 Moore T. A. Getting the most action out of least action: A proposal // *Am. J. Phys.* 2– 004. – Vol. 72. – Is. 4. – P. 522–527.

248 Müller T. Probability theory and causation: A branching space-times analysis // *British Journal for the Philosophy of Science*. – 2005. – Vol. 56. – P. 487–520.

249 Müller T. A branching space-times view on quantum error correction // *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. – 2007. – Vol. 38. – P. 635–652.

250 Müller T. Branch dependence in the "consistent histories" approach to quantum mechanics // *Foundations of physics*. – 2007. – Vol. 37. – P. 253–276.

251 Nesbet R. K. *Variational Principles and Methods in Theoretical Physics and Chemistry*. – Cambridge : Cambridge U.P., 2003.

252 Niven R. K., Andresen B. Jaynes' Maximum Entropy Principle, Riemannian Metrics and Generalised Least Action Bound. Preprint : arXiv:0907.2732v1. 16 Jul 2009.

253 Numrich R. W. A metric space for computer programs and the principle of computational least action // *Journal of Supercomputing*. – 2008. – Vol. 43. – Is. 3. – P. 281–298.

254 Nusser A. and Branchini E. On the least action principle in cosmology // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2000. – Vol. 313. – P. 587–595. Preprint: arXiv:astro-ph/9908167v1. 16 Aug 1999.

255 Ogborn J., Hanc J., Taylor E. F. Action on Stage: Historical Introduction // The Girep conference. 2006. *Modeling in Physics and Physics Education*. – Universiteit van Amsterdam.

256 Ogborn J., Taylor E. F. Quantum physics explains Newton's laws of motion // *Physics Education*. – 2005. – Vol. 40 (1).

257 Plank P. *Religion und Naturwissenschaft*. – Leipzig, 1952.

258 Plantinga A. *The Nature of Necessity*. – Oxford : Clarendon Press, 1974.

259 Ponce de Leon J. The principle of least action for test particles in a four-dimensional spacetime embedded in 5D. Preprint : arXiv:0711.1004v1. – 7 Nov 2007.

260 Reddy J. N. *Energy Principles and Variational Methods in Applied Mechanics*. – New York : Wiley, 2002. – 608 p.

261 Rohrlich F. *Classical Charged Particles*. – World Scientific, 2007. – P. 305.

262 Rohrlich F. On the ontology of QFT // *Conceptual foundations of quantum field theory* / Ed. : T. Y. Cao. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999.

263 Schulman L. S. Techniques and applications of path integration. – Dover Publications, US. 2005. – 416 p.

264 Sharlow M. The Quantum Mechanical Path Integral: Toward a Realistic Interpretation. – 2007. Preprint : <http://philsci-archive.pitt.edu/3780/> (30.03.2013).

265 Siburg K. F. The principle of least action in geometry and dynamics // Series: Lecture Notes in Mathematics. – 2004. – Vol. 1844. – XII.

266 Stávek J., Ipek M., Esták J. The application of the principle of least action to some self-organized chemical reactions // *Thermochimica Acta*. 2002. – Vol. 388. – Is. 1-2. – P. 441–450.

267 Stöltzner M. : 1) The principle of least action as the logical empiricist's Shibboleth // *Studies In History and Philosophy of Science. Part B.* – 2003. – Vol. 34 (2). – P. 285–318 ; 2) Can the Principle of Least Action Be Considered a Relativized A Priori? // *Constituting Objectivity. Transcendental Perspectives on Modern Physics / Ed. : – M. Bitbol et al. Springer Science + Business Media B.V., 2009. – P. 215–228.*

268 Suppes P. Probabilistic metaphysics. – Oxford : Basil Blackwell, 1984. – 251 p.

269 Taylor E. F. Rescuing quantum mechanics from atomic physics. Massachusetts Institute of Technology. – June 2002. URL : <http://www.eftaylor.com/pub/RescuingQM.pdf> (30.03.2013).

270 Taylor E. F. A call to action // *Am. J. Phys.* – 2003. – Vol. 71. – Is. 5.

271 Taylor E. F. and Wheeler J. A. *Spacetime Physics / 2nd ed.* – New York : Freeman, 1992.

272 *The Possible and the Actual: Readings in the Metaphysics of Modality / Ed. : M. J. Loux.* – Cornell University Press, 1979.

273 *The Probabilistic Revolution. Vol. 1 : Ideas in History / Ed. : L. Kruqer, L. J. Daston and M. Heidelberqer. – Vol. 2 : Ideas in the Sciences / Ed. : L. Kruqer, G. Gigerenzer and M. S. Morgan.* – Massachusetts : MIT Press, 1987.

274 Toms D. J. *The Schwinger Action Principle and Effective Action,* – Cambridge : Cambridge U.P., 2007.

275 Valente M. B. Are Virtual Quanta Nothing but Formal Tools? // *International Studies in the Philosophy of Science.* – 2011. – Vol. 25 (1). – P. 39–53.

276 Variational and Extremum Principles in Macroscopic Systems / Ed. : S. Sieniutycz and H. Farkas. – Elsevier Ltd., 2005.

277 Wang Q. A. Maximum entropy change and least action principle for nonequilibrium systems // Astrophysics and Space Science. – 2006. – Vol. 305. – Is. 3. – P. 273–281.

278 Wang Q. A. Maximum path information and the principle of least action for chaotic system // Chaos, Solitons and Fractals. – 2005. – Vol. 23. – P. 1253–1258.

279 Webb J. N. Hamilton's variational principle and ecological models // Ecological Modelling. – 1995. – Vol. 80. – P. 35.

280 Weiner M. and Belnap N. How causal probabilities might fit into our objectively indeterministic world // Synthese. – 2006. – Vol. 149. – P. 1–36.

281 Yourgrau W. and Mandelstam S. Variational principles in dynamics and quantum theory. – London : Pitman, 2000.

282 Zurek W. H. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical // Rev. Mod. Phys. 2003. – Vol. 75. – Is. 3. – P. 715–775. Preprint : <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0105127>;
http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/zurek_dekogerencia.pdf (30.03.2013).