

Воронежский государственный педагогический университет
Кафедра общей физики

В.В. Свиридов

Естественнонаучная картина мира

*Конспективное изложение лекционного материала
(для студентов факультета иностранных языков)*

Воронеж
Версия 2013 г.

Электронный ресурс

[http://phys.vspu.ac.ru/staff/Sviridov/Lectures/ЕНКМ \(Иняз\) Конспект лекций.pdf](http://phys.vspu.ac.ru/staff/Sviridov/Lectures/ЕНКМ (Иняз) Конспект лекций.pdf)

*Вы можете использовать данный материал в образовательном процессе Вашего вуза,
просто запросив на это согласие автора*

Содержание

Тема 1. Понятие и структура научной (натурфилософской) картины мира	4
1.1. Понятие и характерные черты естественнонаучной картины мира	4
1.2. Структура научной картины мира.....	6
1.3. Функции естественнонаучной картины мира	9
Тема 2. Научный метод познания	12
2.1. Элементы научного метода познания.....	13
2.2. Открытие теоретического познания в античности.....	15
2.3. Проблема истинности постулатов	16
2.4. Становление научного метода.....	18
2.5. Возникновение первой науки: ньютоновская механика.....	20
2.6. Первая научная картина мира — механическая	21
Тема 3. Эволюция представлений о материи.....	24
3.1. Атомистическое учение Эпикура-Лукреция	24
3.2. Аристотелево учение.....	26
3.3. Эволюция представлений о материи в научную эпоху	29
Тема 4. Эволюция научных представлений о пространстве и времени	30
4.1. Два подхода к пониманию пространства и времени.....	30
4.2. Основные симметрии пространства и времени	31
4.3. Постулаты Эйнштейна	33
4.4. Основные идеи специальной теории относительности	35
4.5. Дальнейшее развитие представлений о пространстве и времени	37
Тема 5. Эволюция представлений о причинности, закономерности и случайности ..	39
5.1. Античные представления о гармонии и закономерности природы	39
5.2. Молекулярно-кинетическая теория: неизбежность случайности	41
5.3. Динамический хаос.....	43
5.4. Квантовые представления: корпускулярно-волновой дуализм.....	44
5.5. Квантовые представления: соотношения неопределенностей.....	46
5.6. Принцип дополнительности.....	48
5.7. Динамические и статистические теории	48
5.8. Выводы по теме	51
Тема 6. Сущность и история эволюционной концепции в естествознании и культуре	53
6.1. Понятие и атрибуты эволюции.....	53
6.2. Возникновение представлений о развитии науки, общества и природы	53

6.3. Дарвинизм и антидарвинизм	55
6.4. Синтетическая теория эволюции.....	56
6.5. ДНК, гены, белки	59
6.6. Генетический код и эволюция генов	60
6.7. Молекулярная археология	62
Тема 7. Универсальный эволюционизм как исследовательская программа современности	63
7.1. Второй закон термодинамики. Энтропия.....	63
7.2. Основной парадокс эволюционной картины мира.....	68
7.3. Синергетика — теория самоорганизации.....	69
7.4. Необходимые условия самоорганизации.....	72
7.5. Основные закономерности самоорганизации	74
7.6. Универсальный эволюционизм.....	79

Тема 1. Понятие и структура научной (натурфилософской) картины мира

1.1. Понятие и характерные черты естественнонаучной картины мира

Тенденция гуманизации естествознания позволяет надеяться на то, что фундаментальные научные представления о мире, человеке и методах научного познания станут восприниматься как действительно неотъемлемая составляющая духовного богатства, созданного человечеством. Но естествознание как часть культуры не должно и не может представлять перед рядовым членом общества как сумма частных естественнонаучных дисциплин с их специфическим языком и сложным теоретическим аппаратом.

Естествознание присутствует в культуре отнюдь не в виде суммы отдельных естественных наук. Взаимодействуя с социогуманитарной составляющей культуры, оно приобретает оболочку, имеющую такие не свойственные взятым по отдельности физике, биологии, геологии черты, как восприятие мира в его целостности, историчность, наличие ценностной шкалы при оценке тех или иных взглядов или событий. В результате возникает **научная картина мира**, которую можно рассматривать как **образно-философское** обобщение, **внеаучный** синтез научных знаний. Она не принадлежит ни к естествознанию, ни к философии, ни к гуманитарии, но пересекается и с тем, и с другим, и с третьим. Именно формирование научной картины мира является задачей общего образования.

Научная картина мира — это целостная система представлений об общих свойствах и закономерностях природы, возникающая в результате образно-философского обобщения основных естественнонаучных понятий и принципов.

Согласно этому определению, понятия «научная картина мира» и «естественнонаучная картина мира» (ЕКМ) являются синонимами.

Существуют ли другие картины мира, кроме научной? Да, конечно. Более древние и более простые формы освоения и познания реальности предшествовали науке, а затем сопровождали ее на всем протяжении истории. Так возникли *мифологические* и *религиозные* картины мира. В мифологии каждому из основных явлений природы приписывается своя отдельная фантастическая причина и история возникновения. В религиозном миропонимании единственной и конечной причиной всего сущего является бог.

Назовем некоторые важнейшие отличия научной картины мира от религиозного и мифологического мировоззрения.

1) Научная картина мира основывается на **идее естественной обусловленности и естественного порядка в природе** («Природа есть порядок» — сказал Аристотель). Она отказывается от представлений об участии сверхъестественных и потусторонних сил в возникновении, развитии и существовании мира.

«Ученый пронизан ощущением причинной обусловленности всего происходящего... Мораль для него не имеет в себе ничего божественного, она — чисто человеческая проблема. Религиозность ученого состоит в восторженном преклонении перед гармонией законов природы.. Это чувство — лейтмотив жизни и творческих усилий ученого в пределах, где он возвышается над рабством эгоистических желаний».

А. Эйнштейн

2) Краеугольным камнем научной картины мира служит положение о том, что **всё сущее познаваемо человеческим разумом**. В противоположность этому, например, в христианстве познавательные способности разума обычно характеризуются как недостаточные для постижения истины.

«Мудрость мира сего есть безумие пред Богом, как написано: «уловляет мудрых в лукавстве их»».

Апостол Павел, Первое послание к Коринфянам, 3, 19.

«Смотрите, братия, чтобы кто не увлек вас философиею и пустым обольщением, по преданию человеческому, по стихиям мира, а не по Христу...»

Апостол Павел, Послание Колоссянам, 2, 8.

3) Знания, лежащие в основе научной картины мира, получают при соблюдении определенных правил, составляющих в совокупности **научный метод**. Важнейшим из этих правил, выражающим уверенность в том, что мир познаваем рационально, является традиция **рациональной критики**, в отличие от традиции некритической передачи запаса знаний из поколения в поколение. Специалист по философии и методологии науки **Карл Поппер (1902 – 1994)** сформулировал даже **принцип фальсифицируемости: научное утверждение отличается от ненаучного или лженаучного тем, что его можно, в принципе, опровергнуть, оно поддается объективной проверке**. В противоположность этому, практически все религии требуют верить без доказательств, рассматривая сомнение как отступничество — возьмите хотя бы знаменитую формулу Тертуллиана: «Верую, ибо абсурдно!» или евангельскую притчу о Фоме неверующем.

Как иллюстрацию сказанного выше можно рассмотреть книгу одного из наиболее чтимых кришнаитами пророков, Его Божественной Милости А.Ч.Бхактиведанты Свами Прабхупады «Легкое путешествие к другим планетам».

*«Кришна — изначальная причина всего: и созидания, и разрушения... Информацию об антиматериальном мире дает сам Кришна, по своей беспричинной милости нисходя в этот мир. Эти знания передаются по цепи ученической преемственности и записаны в ведической литературе. Других способов подтвердить или опровергнуть эти сведения **нет**. Ученому-материалисту антиматериальный мир недоступен...*

*Для подготовки к легкому путешествию на антиматериальные планеты следует приобрести истинного духовного учителя, всегда и во всем его удовлетворять, изменить свои привычки, вести аскетический образ жизни, оказывать почтение дереву баньян, коровам и брахманам. Нужно не вступать в контакты с неверующими, изучать ведическую литературу **и только ее**, воспевать святое имя Господа, поклоняться установленному дома Божеству».*

Невыгодным, с точки зрения простой этики, оказывается сравнение труда пророка с принятой среди ученых манерой вести дискуссию. Отсутствие аргументов восполняется либо прямой бранью по адресу ученых («упрямые материалисты», «глупцы», «негодяи»), либо обращением к не самым лучшим из человеческих чувств — душевной лени («Не утруждая себя материалистической исследовательской работой и без лишних хлопот трансценденталист в совершенстве постигает истину о материи и антиматерии»), зависти («Американцы родились в Америке потому, что в предыдущих жизнях совершали благочестивые поступки»). Тут же делается реверанс в сторону тогдашней (1990) государственной идеологии: «Никто из живущих на Земле не сможет так же совершенно, как священная книга Шримад-Бхагаватам, описать социализм... Нужно владеть только тем, что необходимо для поддержания тела, тот же, кто пожелает большего..., подвергнется наказанию».

А чем отличается естественнонаучная картина мира от некоей универсальной Теории Всего Сущего? Главное отличие в том, что она отражает результат познания, в то время как научная теория в большей степени представляет собой инструмент, рецепт для решения конкретных задач. Кроме того, в теориях преобладает абстрактно-логическая составляющая, в то время как в картине мира она равноправна с чувственно-образной.

1.2. Структура научной картины мира

Кроме общенаучной картины мира, обобщающей данные всех наук о живой и неживой природе, существуют частные естественнонаучные картины мира, основанные на достижениях отдельных наук, например, физическая и биологическая картины мира. Частные естественнонаучные картины мира входят в общенаучную неравноправным образом. Определяющим элементом в картине мира выступает картина мира той области познания, которая занимает лидирующее положение.

В древности учение о природе существовало в виде единой, не разделенной на специализированные дисциплины, **натурфилософии**. Как следствие, античные картины мира отличаются цельностью, нерасчлененностью, в чем отчасти заключается секрет их очарования. С момента появления науки в современном понимании

этого слова (XVII век) и практически до наших дней лидером естествознания была физика, а физическая картина мира была ведущей в естественнонаучной картине мира. Почему именно физика? Для этого были серьезные основания.

Известно, что основные формы движения материи могут быть выстроены в иерархическом порядке — от наиболее простых, определяющих основные черты нашего мира, до высших, возникающих на более поздних этапах самоорганизации материи. На самом нижнем уровне — *физические* формы движения: механическая, электрическая и т.д. С достижением определенного уровня сложности возникают *химическая* и *биологическая*, а с возникновением общества разумных существ — высшая из известных нам, *социальная* форма движения материи.

Законы, управляющие высшими формами движения, крайне сложны, и многих из них мы еще не знаем. Кроме того, представляется естественным приступить к изучению высоких этажей организации материи, присущих им тонких закономерностей, лишь после выяснения более фундаментальных, глубинных, основополагающих элементов мироздания. Именно эти обстоятельства обусловили ведущую роль именно физической картины мира в общенаучной с XVII века до середины века XX. Однако **в наши дни произошла смена лидера в естествознании**, и на первые роли выходит биология.

В настоящее время *фундаментальные* физические исследования сосредоточились в двух узких секторах: физика высоких энергий (известная раньше как физика элементарных частиц) и космология. Каждый второй физик в мире изучает твердые тела — объект, исключительно важный для технологии, но малозначительный для миропонимания. Химию подобная судьба постигла еще раньше, и сейчас эта наука имеет отчетливо прикладной характер.

На том направлении физических исследований, которое идет в глубь материи — в физике высоких энергий, — уже вырисовываются контуры так называемой Теории Всего Сущего (этот термин рекомендуется воспринимать с некоторой долей юмора), которая, если несколько утрировать, позволит объяснять свойства и предсказывать поведение всех частиц, составляющих материальные объекты, на основе одного-единственного уравнения.

Стивен Вайнберг, получивший Нобелевскую премию за работу, которая существенно продвинула физиков по пути к Теории Всего Сущего, писал «В течение одного-двух поколений будет построена единая теория, объясняющая происхождение и природу массы и энергии. Это положит конец развитию познания вглубь материи».

*Теорию Всего Сущего можно рассматривать как реализацию мечты Эйнштейна о создании **единой теории поля**, которой он посвятил последние тридцать лет своей жизни. Ирония судь-*

бы заключается в том, что создание теории успешно идет по пути, который сам Эйнштейн категорически отвергал.

В противоположном направлении, изучающем свойства больших ансамблей частиц и формирование структур, физики, возглавляемые И.Р. Пригожиным, давно вторглись в область химии и подошли к границе с биологией. Таким образом, физика уже почти полностью освоила отведенное ей жизненное пространство.

В то же самое время биологические исследования (особенно в пограничных областях — биофизике, биохимии, молекулярной биологии) переживают бум, сопровождающийся взрывообразным увеличением числа исследователей и исследований. По данным середины 80-х годов, в науках о живой материи было занято 50% кадров академического сектора в США (в СССР — 34%). Специалисты в области биологии находятся в США на втором месте по численности после специалистов по компьютерам : в 1990 году их было 384 тысячи против 238 тысяч физиков (для сравнения: в СССР на ту же дату биологов было только 9% от всех ученых). Разрыв быстро растет: в 1993 году в Великобритании насчитывалось 50 тысяч биологов и лишь 12 тысяч физиков, геологов и метеорологов вместе взятых. Конгресс США принял решение о прекращении строительства сверхпроводящего суперколлайдера — нового мощного ускорителя элементарных частиц, но без возражений финансирует исследования по международной программе «Геном человека». Авторитетный естественнонаучный журнал «Nature» («Природа») заполнен предложениями рабочих мест, стажировок и стипендий — для ученых, аспирантов и студентов, специализирующихся по биологии, фармакологии и медицине.

Все это и многое другое говорит о **переходе лидирующего положения от физики к биологии** в соответствии с закономерностью, по которой ход познания в определенной степени повторяет эволюцию изучаемого предмета - материи - от сравнительно простого к сложному. Если это так, то XXI век будет веком биологии, а XXII должен стать веком наук об обществе.

А что же с физикой? Она утратит свое положение лидера, переднего края науки; однако ее роль как фундаментального базиса всех естественных наук сохранится. Это позволяет устанавливать рамки принципиально возможного для биологических и социальных систем (например, не воспринимать всерьез утверждение А. Чумака о том, что он способен усилием воли разгонять тучи) еще до выяснения деталей их функционирования.

Помимо деления на частные картины мира, в структуре естественнонаучной картины мира выделяются еще **абстрактно-логическая** и **образная** составляю-

щие. В отличие как от науки, так и от гуманитарной культуры, **эти две компоненты естественнонаучной картины мира равноправны**, поскольку сама она представляет собой амальгаму, сплав двух культур, возникающий на границе их раздела.

Наконец, важным элементом структуры научной картины мира являются междисциплинарные **концепции современного естествознания**, образующие ее каркас. К числу таких концепций можно отнести:

- количественная неизменность движения (закон сохранения энергии) и его постоянное качественное изменение (закон возрастания энтропии);
- эволюционная концепция;
- принципиальная случайность, лежащая в основе природных закономерностей;
- непостижимая эффективность математики;

и некоторые другие, например, принцип дополнительности.

1.3. Функции естественнонаучной картины мира

Естественнонаучная картина мира выполняет, во-первых, функцию **внешнего интерфейса** естественных наук, то есть их представительства в общей культуре.

Термин «интерфейс» пришел из профессионального жаргона специалистов по компьютерам и означает устройство или программу, обеспечивающее взаимодействие других устройств или программ. В более широком смысле интерфейс можно понимать как посредника, дающего возможность согласованно действовать системам, которые не могут взаимодействовать напрямую. В этом смысле интерфейсом является и электрический трансформатор, и переводчик на международных переговорах. Естественнонаучная картина мира служит интерфейсом между естественнонаучной и гуманитарной культурами.

Вторая важнейшая функция научной картины мира — **мировоззренческая**. Необходимость современного научного мировоззрения и основанного на нем стиля мышления обсуждалась в п. 1.1.

Интересно, что научная картина мира обеспечивает взаимодействие естественных наук не только с гуманитарной культурой, но и между собой. Например, в XX веке эволюционные представления, составлявшие основу биологической картины мира, стали популярны и широко используются в физике. Однако при изучении эволюционирующих систем физики вовсе не пытались **непосредственно** применить к ним дарвиновские законы естественного отбора. Нет, из одной науки в другую переносились не конкретные научные результаты, а нечто более тонкое — дух теории, идеология, образы, которые относятся не к самой науке, а к ее образно-философскому осмыслению — картине мира. Таким образом, научная картина мира

выполняет для естествознания функцию не только внешнего, но и **функцию внутреннего интерфейса**.

Образно-эмоциональное богатство картины мира обуславливает ее **эвристическую функцию**, то есть функцию подготовки новых открытий. Уже говорилось, что любая новая идея, продвигающая вперед науку, есть выход за рамки логики существующих теорий. Особенно наглядно это утверждение можно проиллюстрировать на примере математики — вот уж где, казалось бы, царство чистой логики!

Со времен Евклида считалось, что исходя из его постулатов можно доказать или опровергнуть любое осмысленное геометрическое утверждение — например, утверждение «Сумма углов треугольника равна 180° ». Для этого требуется только построить логически безупречную цепочку теорем, первые из которых опираются непосредственно на постулаты, а следующие — на уже доказанные теоремы. Представлялось, что выращиваемое таким образом «дерево теорем» рано или поздно включит в себя любую еще не открытую геометрическую истину.

Эти представления рухнули, когда в **1931** году Курт Гёдель доказал свою знаменитую теорему. Из теоремы следовало, что в любой представляющей интерес теории существуют утверждения, которые логически независимы от постулатов теории и потому не могут быть ни доказаны, ни опровергнуты. Решить, истинны они или ложны, можно, только приняв дополнительные постулаты. А выбор постулатов диктуется не логикой, а, в первую очередь, представлениями исследователя об устройстве мира.

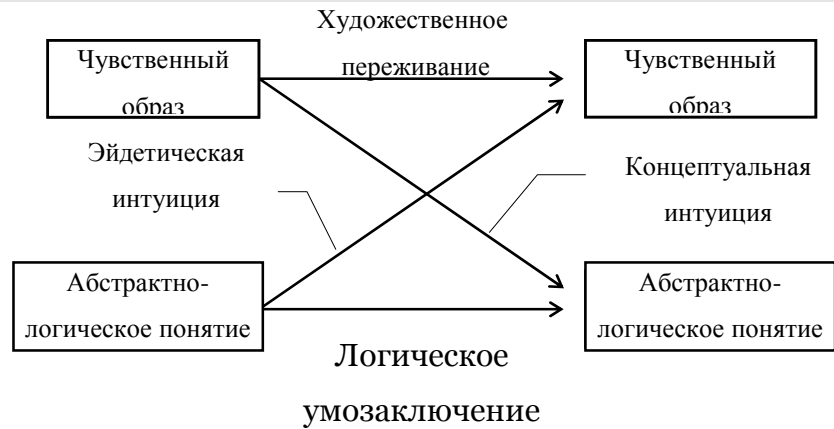
*Если бы у Евклида отсутствовал знаменитый постулат о параллельных («Через данную точку можно провести одну и только одну прямую, параллельную данной»), то теорема о сумме углов треугольника в его геометрии была бы недоказуемой. Принятие постулата о параллельных позволяет ее доказать. Приняв другой постулат, например, что через данную точку нельзя провести **ни одной** прямой, параллельной данной, мы сможем доказать, что сумма углов любого треугольника **больше 180°** . При этом возникает новая логически непротиворечивая геометрия — неевклидова. Евклид выбрал свой вариант постулата о параллельных потому, что он больше соответствовал его представлениям о свойствах окружающего мира. Но сейчас мы знаем, что вблизи массивных тел свойства пространства изменяются и описываются уже неевклидовой геометрией.*

Таким образом, даже в математике чистой логики недостаточно для получения принципиально нового знания. Открытие всегда рождается в акте интуитивного «озарения», знакомом многим ученым и многократно описанном в художественной и научной литературе. Как уже говорилось выше, интуиция — это результат взаимо-

действия абстрактных *понятий* и чувственных *образов*, получаемый в процессе перехода от первых ко вторым и обратно.

Вот такой схемой поясняется работа интуиции в книге А.С. Кармина и Е.П. Хайкина «Творческая интуиция в науке»

Таким образом, если на пути чистой логики возникает непреодолимая пропасть, ее оказывается возможным обойти, перейдя с помощью **эйдетической интуиции** к вспомогательному **образу** («эйдос» и означает «образ»), который, через посредство **концептуальной интуиции**, помогает сформулировать новое абстрактное понятие.



Тема 2. Научный метод познания

Понятие натурфилософии, ее отличия от науки и от религии. Принцип причинности в понимании античных мыслителей, его отличие от современного понимания.

Понятие «метод» означает совокупность правил и приемов их использования, которые позволяют гарантированно и систематически добиваться поставленной цели.

Цель *научного* метода заключается в получении **научного знания** о природных объектах и явлениях. От других видов знания (обыденного, гуманитарно-художественного, религиозного и т. д.) научное отличается систематичностью, объективностью, достоверностью, точностью и практической ценностью.

Систематичность научного знания означает, что данные разных наук не противоречат, а дополняют друг друга. В этом плане научную работу можно сравнить с разгадыванием бесконечного кроссворда, каждое новое слово в котором проверяется пересечением с другими, известными. В научном знании, как и в любой системе, важны не столько свойства его элементов (фактов, законов, гипотез, теорий), сколько взаимоотношения между ними: подтверждают ли факты теорию, согласуется ли новая теория со старой в области ее применимости (*принцип соответствия*) и т.д.

Объективность научного знания означает независимость от личности исследователя, от его индивидуальности. Пропорция, в которой расщепляются родительские признаки у гибридов, в опытах Менделя получалась такой же, как у тех пионеров генетики, которые спустя несколько десятилетий переоткрыли его законы. В отличие от этого, оценка достоинств художественного произведения или значимости политического события во многом зависит от *субъективных* предпочтений и *личных* убеждений эксперта.

Достоверность научного знания обеспечивается принятой в науке традицией рациональной критики. Ничто не принимается на веру, каждый факт, гипотеза, теория проверяются и перепроверяются. И лишь если настойчивые и неоднократные попытки поставить под сомнение факт или опровергнуть теорию оказываются безуспешными, эти факт или теория включаются в корпус научного знания.

Точность научного знания связана с использованием языка терминов и математических формул. Естественные науки не терпят расплывчатых, двусмысленных, не обязывающих утверждений и выводов.

У гражданина сегодняшнего высокотехнологичного общества вряд ли могут быть сомнения в *практической ценности* научного знания. Трудно назвать такое благо ци-

вилизации, создание которого обошлось без опоры на знание законов природы. Практичностью обладают и другие виды знания, но лишь научному знанию свойственна *всеобщая и обязательная* практическая ценность.

Успехи современного естествознания свидетельствуют об эффективности научного метода познания. Он складывался в течение длительного времени и лишь в конце XVII в. приобрел все свои основные черты. *Именно с этого времени начинается история науки в полном смысле этого слова.*

2.1. Элементы научного метода познания

Научное познание начинается с *наблюдения* природы.

Уже этот простейший метод получения знаний требует осмысленной и активной позиции. Наблюдение имеет определенную цель. Место, время и другие обстоятельства наблюдения планируются, а его результаты фиксируются для дальнейшего использования. Часто наблюдение выполняется с помощью технических средств и измерительных приборов. Его результатом является *наблюдательный факт*.

Факты подвергаются *систематизации* и *классификации*.
На этой основе формулируются **эмпирические обобщения**.

Эмпирическим обобщением наблюдений восхода солнца является вывод о том, что солнце восходит в восточной стороне горизонта. Это еще не теоретический вывод, но уже и не отдельный факт. Это — одна из форм эмпирического знания. «Эмпирический» означает: «полученный из опыта, из непосредственных ощущений».

Эмпирическое обобщение возникает с помощью *индукции*.

Индукция — метод познания, основанный на выведении общих следствий из частных посылок.

Так, если в течение нескольких лет наблюдений солнце *каждый день* восходит на востоке, возникает основание считать, что оно восходит на востоке *всегда*.

Эмпирическое обобщение вызывает вопрос о *причинах* установленной закономерности, побуждая к выдвижению *гипотез*.

Гипотеза — это предположение о причине той или иной закономерности, о сущности того или иного объекта или явления

Гипотезы возникают не только в процессе научного познания. Например, в мифологической картине мира для объяснения каждого явления предлагается гипотеза, связывающая его с отдельным духом или божеством. В картинах мира монотеи-

стических религий в качестве универсальной объяснительной причины всего выступает Бог. *Научная* же гипотеза должна отвечать следующим требованиям:

1) *Быть проверяемой*. Крупнейший философ XX века К. Поппер сформулировал это требование парадоксально: научное утверждение отличается от ненаучного или лженаучного тем, что поддается объективной проверке, то есть мыслима такая ситуация, в которой оно несправедливо (*принцип фальсифицируемости*). Первое, что старается сделать если не автор новой гипотезы, то его коллеги — пытаются ее опровергнуть. Лишь если гипотеза успешно выдерживает все атаки, она принимается *научным* сообществом. В противоположность этому, практически все *религии* требуют верить без доказательств, рассматривая сомнение как отступничество — возьмите хотя бы знаменитую формулу Тертуллиана: «Верую, ибо абсурдно!» или евангельскую притчу о Фоме неверующем.

2) *Обладать общностью*, то есть единым образом объяснять как можно больше разрозненных фактов и эмпирических обобщений. То же требование можно сформулировать «от противного»: число научных гипотез, привлекаемых для объяснения известных эмпирических данных, должно быть минимальным. В такой форме требование общности было высказано монахом-францисканцем Уильямом Оккамом на рубеже XIII–XIV веков и известно как «бритва Оккама»: не умножай сущностей сверх необходимого. В переводе на современный язык это звучит так: не следует искать новых причин, если не исчерпаны возможности объяснения, исходящего из причин известных.

3) *Обладать предсказательной силой*. Предсказательная сила гипотезы заключается, во-первых, в *самой возможности* делать конкретные и нетривиальные прогнозы на ее основе, а во-вторых, в совпадении выводов из нее с фактами, установленными *после* выдвижения гипотезы.

4) Научная гипотеза должна быть *логически непротиворечивой*.

Если указанные требования к научной гипотезе выполнены, то на ее базе может быть построена *научная теория*.

<p>Теория — высшая форма организации научного знания, дающая точное и целостное представление о закономерностях определенной области действительности.</p>
--

В рамках научной теории одни из **эмпирических обобщений** получают свое объяснение, а другие трансформируются в *законы природы*.

Закон природы — это выраженная словесно или математически необходимая связь между свойствами материальных объектов и/или обстоятельствами происходящих с ними событий.

Например, закон всемирного тяготения выражает необходимую связь между массами тел и силой их взаимного притяжения; периодический закон Менделеева — связь между атомной массой (точнее, зарядом ядра атома) химического элемента и его химическими свойствами; законы Менделя — связь между признаками родительских организмов и их потомков.

2.2. Открытие теоретического познания в античности

Большой объем эмпирических знаний был накоплен древними цивилизациями Востока. И в Китае, и в Вавилоне, и в Египте были достаточно развиты математика и астрономия, и была подмечена повторяемость, регулярность в небесных и вообще природных явлениях. Однако переход на следующий, *теоретический* уровень знания был осуществлен лишь в Древней Греции.

Известны, например, вавилонские и египетские учебники математики. Они представляют собой сборники задач с конкретными числовыми условиями, и решениями, выполненными по принципу: сначала вычитаем, потом делим, потом прибавляем — вот и ответ. Почему именно так? — никаких общих правил или доказательств нет, да и само понятие доказательства было незнакомо математике Древнего Востока. В этом отношении такие «учебники» мало отличаются от сборника магических заклинаний или поваренной книги.

Первым известным нам человеком, который от решения конкретных вычислительных задач перешел к доказыванию *общих* теоретических утверждений, был древний грек Фалес Милетский (VII–VI вв. до н.э.). Фалес доказывал, что *всякий* круг делится диаметром пополам, а *всякий* угол, опирающийся на диаметр — прямой, что углы при основании *всякого* равнобедренного треугольника равны^{1/4}

Можно нарисовать тысячи разных кругов, и все они будут делиться своими диаметрами строго пополам. Дает ли это уверенность, что диаметр делит пополам *всякий* круг, *круг вообще*? Нет, уверенность может дать только общее доказательство, оперирующее не с конкретными кругами, а с *абстракцией* круга.

Использование абстракций позволяет упрощать картину явления и рассматривать его как бы в «чистом виде». Они возникают в результате *абстрагирования*.

Абстрагирование — метод познания, основанный на том, что не учитываются несущественные стороны и признаки изучаемого предмета или явления.

Основной абстракцией Фалеса и его учеников стало представление о *единой субстанции, лежащей в основе мира, — материи*. Основа миропорядка сводилась к качественным изменениям этой субстанции, которые и объясняли возникновение, развитие и структуру окружающего мира.

Развивая метод абстрагирования, греки стали одну за другой создавать абстракции все более высокого уровня. Дистанция между ними и их корнями в реальности вскоре возросла настолько, что абстракции в представлении некоторых греческих философов приобрели самостоятельную реальность, порой считавшуюся первичной по отношению к реальности чувственного мира. Такой, например, стала абстракция числа в трактате школы Пифагора. «Всё есть число», — утверждал Пифагор. Числа, с его точки зрения, — это самостоятельные сущности, являющиеся первоосновой мира.

Пифагорейцы заложили основы *дедуктивного* метода.

**Дедукция — метод познания, основанный
на выведении частных следствий из общих посылок.**

Греческие мыслители поняли, что соблюдение определенных правил *гарантирует* получение правильных выводов из правильного исходного положения. Совокупность правил мышления оформилась в отдельную философскую дисциплину — логику. Легендарный Аристотель сформулировал основные законы логики, ввел понятие элементарного умозаключения (силлогизма), классифицировал их типы, сформулировал критерии истинности суждений.

2.3. Проблема истинности постулатов

Замечательные результаты, особенно восхитительная мощь аксиоматически-дедуктивного метода, привели, как это регулярно затем происходило в истории науки, к потере гармонии восприятия мира, к увлечению одной стороной дела, логической строгостью, за счет другой — отыскания правильных оснований, аксиом. Наследниками Пифагора стали Парменид и Платон, исповедовавшие совершенно логичные, но столь же совершенно не физичные, не имевшие отношения к реальному миру системы взглядов.

«Рассуждая таким образом, они [Парменид и его сторонники] вышли за границы чувственного восприятия и, пренебрегнув им, поскольку, по их мнению, надо следовать [только] разуму, утверждают, что универсум [= все сущее] один, неподвижен и безграничен, поскольку, мол, граница граничила бы с пустотой... В теории эти утверждения представляются верными, но полагать так о реальных вещах похоже на сумасшествие».

Аристотель. О возникновении и уничтожении

Парменид, ученик Пифагора, родом из Элеи (италийской колонии греков, расположенной недалеко от Кротона), прославился тем, что применил разработанный пифагорейцами дедуктивный метод для решения чисто философских проблем бытия. Он исходил из казавшегося ему очевидным основного положения: «Бытие (то-что-существует) есть, а небытия нет» (кстати, а что вы могли бы возразить?). Отсюда он логически выводит основные свойства бытия:

- бытие не возникло и не подвержено гибели;
- бытие не имеет частей, а, следовательно, протяженности;
- бытие неподвижно;
- бытие совершенно;
- бытие конечно, но безгранично (в этом он уподоблял бытие шару).

Свои взгляды Парменид изложил в поэме с почти обязательным для сочинений такого рода названием «О природе», совместив художественную форму со строгостью доказательств.

*«...то, чего нет, нельзя ни познать (не удастся),
Ни изъяснить... Ибо мыслить — то же, что быть...
Можно лишь то говорить и мыслить, что есть; бытие ведь
Есть, а ничто не есть...*

*Один только путь остается,
«Есть» гласящий; на нем — примет очень много различных,
Что нерожденным должно оно быть и негибнущим также,
Цельм, однородным, бездрожным и совершенным.
И не «было» оно и не «будет», раз ныне все сразу
«Есть» одно сплошное. Не същещь ему ты рожденья.
Как, откуда взросло? Из не-сущего?..*

*Да и что за нужда бы его побудила
Позже скорее, чем раньше, начав с ничего появляться?
Так что иль быть всегда, иль не быть никогда ему должно»*

Парменид. О природе

Явное противоречие между доказанными признаками бытия и наблюдаемыми свойствами окружающего мира, изменчивого, протяженного и несовершенного, Парменид объяснял тем, что вещи, среди которых мы живем, иллюзорны и представляют собой не более, чем ложные «мнения» (докса) смертных людей. Свое завершение такая точка зрения нашла в учении **Платона (428 – 348)**, утверждавшего, что истинным бытием является мир идей, постигаемый человеком в процессе размышления на основе знаний, изначально врожденных его душе; что же касается

предметов окружающего мира, воспринимаемых органами чувств, то они являются, по Платону, всего лишь тенями, отражениями соответствующих идей.

Аргументы Парменида казались его современникам логически неопровержимыми, а логическое доказательство греки ценили выше наглядной очевидности.

У А.С. Пушкина есть стихотворный вариант рассказа о споре двух философов:

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.

Другой смолчал и стал пред ним ходить.

Сильнее он не мог бы возразить...

Менее известно окончание этой истории: когда первый собеседник согласился с наглядным аргументом второго — Диогена Синопского, — тот стал бить его палкой за согласие с видимой достоверностью, а не с логическим доводом.

Следование законам логики гарантировало получение истинных выводов из истинных посылок. Но любая цепочка логических умозаключений должна иметь начало — *аксиомы и постулаты*, которые не доказываются (иначе это не начало), но истинность которых установлена каким-то иным путем.

Мнения античных мыслителей о методе выбора постулатов разделились. Одни (например, Парменид) в качестве постулатов принимали положения, которые казались им не вызывающими сомнений. Другие (Платон) считали, что постулаты должны отражать *первичные абстракции*, обладающие самостоятельным существованием. Третьи, как например, Аристотель придерживались кардинально иных представлений об источнике истинного знания. Известная фраза Аристотеля «Платон мне друг, но истина — больший друг» относится именно к этому спору. Он считал, что постулаты должны выводиться из наблюдений реального мира и отражать его свойства: «...прав тот, кто считает разделенное — разделенным и соединенное — соединенным, а в заблуждении тот, мнение которого противоположно действительным обстоятельствам».

Позиция Аристотеля вполне соответствует требованиям современного научного метода познания. Однако метод Аристотеля все же не был научным. Он полностью отвергал опытную проверку теоретических выводов: да, исходные аксиомы должны опираться на наблюдения природы, но дальше — дело *только* разума, строгих и убедительных рассуждений. Аристотель, да и никто из его современников, не имел понятия о целенаправленном **эксперименте** по проверке теории.

2.4. Становление научного метода

Типичный для Средневековья метод познания демонстрировали *схоласты*, которые пытались вывести ответы на все вопросы чисто умозрительным путем, опира-

ясь на правила логики. Но, в отличие от Аристотеля, исходным пунктом для них служили не усмотренные в природе закономерности, а положения Священного Писания и сочинений отцов церкви. Ни к какому практически эффективному знанию метод схоластов привести не мог. Поэтому уже тогда начались робкие поиски иного пути. В XIII в. монах-францисканец *Роджер Бэкон* писал: «Есть три источника знания: 1) авторитет; 2) разум, то есть силлогистическое знание; 3) опыт. Познанию лучше всякого силлогизма служит опыт... Математика — корень и завершение, ключ всех наук».

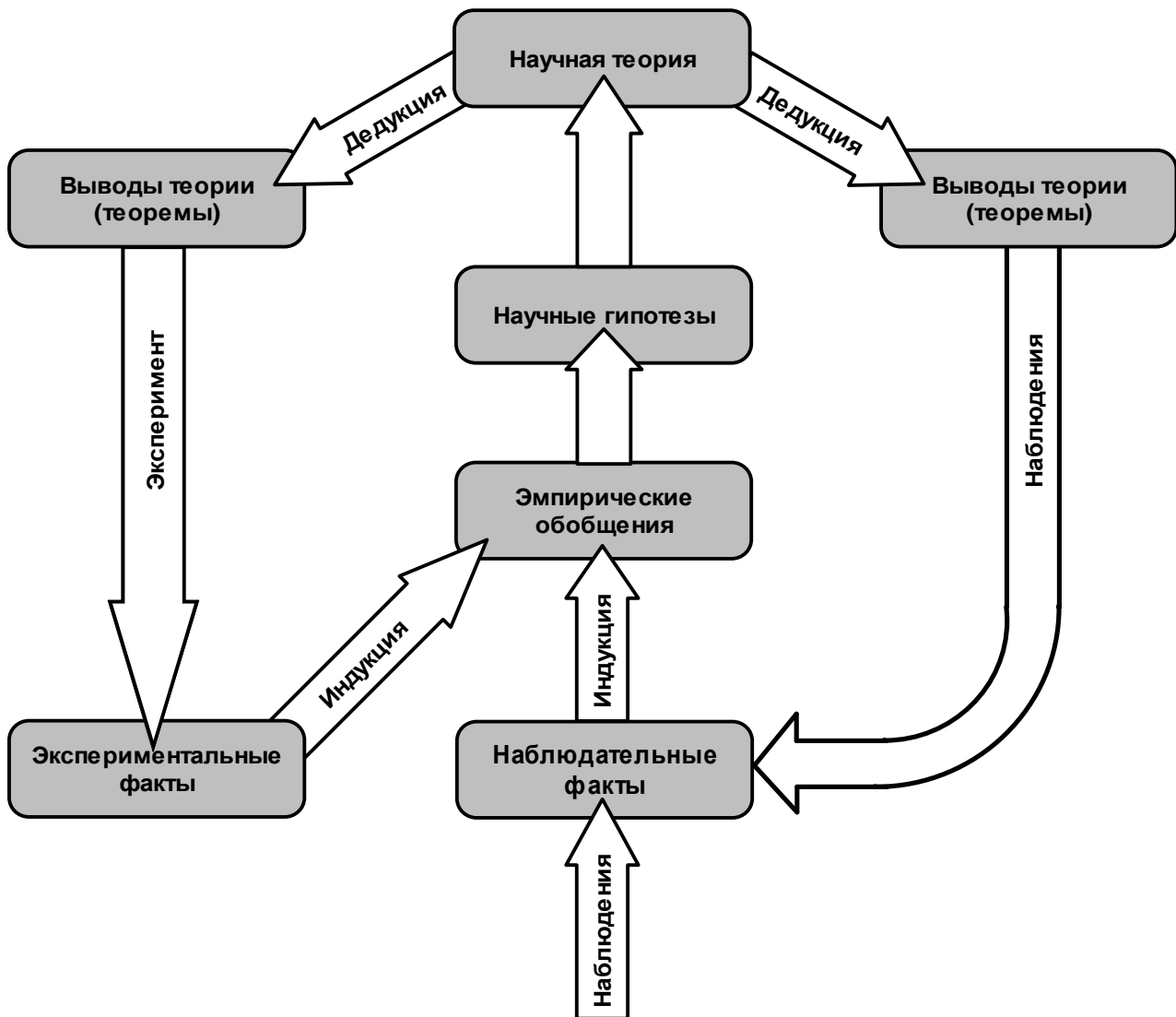
Родоначальниками современной науки считаются *Френсис Бэкон*, *Галилео Галилей* и *Уильям Гарвей*, которые осознали необходимость органического единства опыта и теории, индукции и дедукции.

Ф. Бэкон в своем главном сочинении «Новый органон» (1620) писал: «Наш путь и наш метод состоит в следующем: мы извлекаем не опыты из опытов, а причины и аксиомы из практики и опытов, а из причин и аксиом — снова практику и опыты, как верные истолкователи природы... Лучше же всего продвигается вперед естественное исследование, когда физическое завершается в математическом».

Галилей реализовал экспериментальный метод на практике, придав ему такие современные черты, как создание идеализированной модели реального процесса, абстрагирование от несущественных факторов, многократное повторение опыта... Он экспериментально опроверг утверждение Аристотеля о том, что скорость падения пропорциональна весу тела. Обнаружив с помощью телескопа спутники Юпитера, образующие как бы гелиоцентрическую систему в миниатюре, Галилей окончательно похоронил древнюю геоцентрическую космологию.

Эпоха научной биологии отсчитывается с 1628 г., когда вышла книга Гарвея «Исследование о движении сердца и крови у животных». Гарвей представил экспериментальные доказательства, подкрепленные убедительной теорией того, что артерии и вены являются частями замкнутого круга кровообращения, по которому кровь циркулирует под воздействием сердца. Он же впервые серьезно применил математику в науке о живом, вычислив количество крови, проходящей через сердце за час. Получилась величина, сравнимая с весом человека, что подтверждало идею циркуляции крови по замкнутому кругу.

Итак, в XVII веке научный метод приобрел все свойственные ему основные черты, включая систематическое использование математики и эксперимента. Ход научного познания от первых наблюдений до построения теории иллюстрируется следующим рисунком.



Научный метод.

Стрелки — формы познания, прямоугольники — формы знания.

2.5. Возникновение первой науки: ньютоновская механика

Создание первой настоящей науки связано с именем *И. Ньютона* (1643–1727), который довел до логического завершения развитие метода Галилея. Он отказался от поиска «конечных причин» природных явлений, который до него считался главной задачей ученого, и ограничился изучением *количественных* закономерностей этих явлений, из которых индуктивно выводил общие законы. Вся последующая история науки свидетельствует, что успех в понимании природы приходит, когда размышлению над вопросом «почему?» *предшествует* поиск ответа на вопрос «как? каким образом? подчиняясь каким математическим закономерностям, происходит данный круг явлений?»

Ньютоновская система описания мира покоится на трех китах:

- 1) законы динамики (три закона Ньютона, изучаемые в школе);
- 2) исчисление бесконечно малых (т. е. математический анализ);
- 3) закон всемирного тяготения.

Законы динамики (главным образом, второй закон $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$) позволяют *поставить математическую задачу* о вычислении траектории тела. Закон всемирного тяготения дает возможность *вычислить силу \mathbf{F}* , входящую в уравнения динамики. Математический анализ позволяет *решить эти уравнения*.

Такой подход оказался исключительно плодотворным. Теория Ньютона была уже не общим философским учением, а *точным* инструментом исследования мира. Сам он с помощью этого инструмента показал, что планеты должны двигаться вокруг Солнца в полном соответствии с эмпирически установленными законами Кеплера; что кометы принадлежат Солнечной системе (его последователь Э. Галлей впервые вычислит траекторию и предскажет возвращение одной из комет); что приливы и отливы объясняются притяжением вод океана к Солнцу и Луне; что лишь в бесконечной Вселенной материя может существовать в виде множества небесных тел, ибо в конечной Вселенной все они рано или поздно слились бы в единое тело в центре мира. Так Ньютон заложил основу научной *космологии*.

2.6. Первая научная картина мира — механическая

В результате работ Ньютона и целого ряда блестящих математиков и физиков XVIII века механика выделяется в отдельную развитую науку, обладающую беспрецедентной до тех пор предсказательной силой. На ее основе возникает первая научная картина мира — *механическая*. Перечислим ее основные элементы.

2.6.1. Представления о материи

Материей считалось вещество (материальные тела). Вещество состоит из **дискретных** неделимых частиц — атомов, — вечных и неизменных. Из неизменности атомов следует неизменность таких свойств тел, как, например, масса.

2.6.2. Представления о движении

Мир — это движущаяся материя. Предшественник Ньютона, Рене Декарт, говорил: «Дайте мне материю и движение, и я построю мир». Однако движение понималось лишь в смысле механического перемещения тел и частиц. Все другие виды движения сводились к механическому, их специфика не признавалась. Допускалась возможность перемещения со сколь угодно большой скоростью.

2.6.3. Представления о взаимодействии

Рационалистическое мировоззрение предполагает, что любое событие имеет причину, и эта причина материальна: воздействие со стороны материального тела (тел). Поэтому любая программа рационального объяснения окружающего мира включает представления о механизмах *взаимодействия* материальных объектов.

В античности наиболее разработанные представления о взаимодействии были созданы Аристотелем. Он понимал взаимодействие как *одностороннее* воздействие движущего на движимое. Другая особенность взглядов Аристотеля вытекала из его убежденности в отсутствии пустоты в мире. Раз так, то между любыми двумя телами найдется цепочка тесно прилегающих друг к другу тел, которые передают воздействие друг другу при непосредственном контакте. Четко сформулирована эта *концепция близкодействия* была уже в XVII веке, Декартом.

Концепция близкодействия предполагает, что взаимодействие возможно только при непосредственном контакте взаимодействующих объектов, а любое действие на расстоянии должно происходить с помощью материальных посредников.

Благодаря Ньютону стало ясно, что действие одного тела на другое — это всегда и действие второго на первое, *взаимодействие*. В механической картине мира считалось, что гравитация — единственный тип взаимодействия, которым можно объяснить всё. Известная всем со школьной скамьи формулировка закона всемирного тяготения предполагает, что взаимодействие передается мгновенно и без какого-либо материального посредника. Это — концепция *дальнодействия*.

Концепция дальнодействия предполагает, что взаимодействие материальных тел не требует материального посредника и может передаваться мгновенно.

Сам Ньютон о мгновенном действии на расстоянии высказывался очень осторожно, подчеркивая, что принимает его только за отсутствием фактов, говорящих об обратном. «Причину этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует, действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения движения всех небесных тел и моря» — писал он.

2.6.4. Представления о пространстве и времени

Движение, по Ньютону, можно описывать лишь относительно **инерциальной системы отсчета** (в которой при отсутствии внешних воздействий тело движется равномерно и прямолинейно). Однако любая *реальная* система отсчета не является

инерциальной, что проявляется в возникновении *сил инерции*, для которых невозможно указать порождающий их источник. Например, в системе отсчета, связанной с поверхностью Земли, возникает сила Кориолиса, которая заставляет все реки Северного полушария подмывать свой правый берег и которой в **инерциальной системе отсчета** быть не должно.

В поисках идеальной системы отсчета Ньютон выдвигает идею *Абсолютного пространства* — бесконечной однородной протяженности — и *Абсолютного времени* — бесконечной однородной длительности, — которые находятся вне тел и не зависят от них. По Ньютону, это то, что останется в мире, если удалить из него материю, то есть пустота,местилище материи, и чистая длительность, не связанная ни с какими материальными процессами и телами.

2.6.5. Представления о причинности и закономерности

Согласно принципу причинности, каждое явление имеет предшествующую ему причину. Пример — второй закон Ньютона: причиной изменения движения является сила. Кроме того, уравнения механики говорили, что следствие из причины вытекает *однозначно*. Это дало основание видному представителю *механического детерминизма* П. С. Лапласу заявить: существу, которое в состоянии в один момент схватить положение и скорости всех атомов Вселенной, открылось бы все бесконечное будущее и прошлое Вселенной, в том числе любой поступок любого человека.

2.6.6. Космологические представления

Вселенная бесконечна, заполнена бесконечным числом звезд, вокруг которых вечно кружатся планеты. Позднее появилась гипотеза Канта-Лапласа о *происхождении* Солнечной системы из газопылевого облака. Однако идея *эволюции*, движущая сила которой заключена в самой материи, не была принята. Господствовало ньютоновское представление, что первый толчок Вселенной сообщил бог, предоставивший затем телам двигаться в соответствии с законами механики.

Тема 3. Эволюция представлений о материи

3.1. Атомистическое учение Эпикура-Лукреция

Практически единственной попыткой в послеаристотелевский период античности нарисовать универсальную картину мира было учение **Эпикура Самосского (341 – 270)**, возродившего и углубившего атомистику Демокрита. Правда, в духе времени, философская система Эпикура приобрела известность прежде всего благодаря своим морально-этическим выводам. В своей школе «Сад», созданной в Афинах в 307 году, Эпикур учил, что целью человеческой жизни является достижение счастья, понимаемого как отсутствие страданий. Средством достижения счастья назывались добродетельная жизнь в тиши и покое, вдали от шумной толпы, дружба, любовь. Но главная причина страданий — вера в богов, поэтому счастье достигается освобождением от религии. Такому освобождению и служит разработанная Эпикуром атомистическая система мира, в которой богам нет места.

Особенную популярность эпикурейство приобрело в Риме в смутное время гражданских войн и восстаний рабов (II – I века до н.э.) Самым известным нам эпикурейцем Рима был **Тит Лукреций Кар**, автор бессмертной поэмы «О природе вещей», в которой подробно изложены натурфилософские взгляды Эпикура. Но значение поэмы, как считает Б.Г. Кузнецов, не сводится к поэтическому **изложению** определенных сведений; гораздо большее значение имеет сделанное Лукрецием поэтическое **обобщение** теории Эпикура, равное по художественному таланту философской глубине и прозорливости последней.

«Поэтическое обобщение отнюдь не тавтологично [не просто повторяет содержание излагаемого]. Оно включает ряд идей, образов (в первую очередь именно образов) и понятий, которые, даже не раскрывая новых сторон действительности, служат стимулами для дальнейших поисков... В указанном отношении поэма Лукреция оказала на науку трудно определяемое, но несомненно огромное воздействие».

Б.Г. Кузнецов. Этюды об Эйнштейне

В чем же заключались взгляды Эпикура-Лукреция?

Два единственных начала мироздания — пустое пространство и материя. Пространство однородно и бесконечно; бесконечна и материя. Материя состоит из дискретных элементов — атомов, которые, в отличие от атомов Демокрита, обладают не только размерами и формой, но и весом, заставляющим их падать в мировом пространстве. Останавливаться атомы не могут.

Исходя из понимания мира как движущихся атомов, Лукреций дает объяснение множества природных явлений (кстати, стремление перекинуть прочный мост от

свойств не наблюдаемых атомов к знакомым каждому вещам привнесено именно поэтом): белье сохнет потому, что от него отрываются атомы воды, каменные ступени стираются подошвами людей, уносящих на них атомы камня. Он считает свет потоком корпускул и правильно объясняет зрение действием на глаза атомов, летящих от всех тел; понимает относительность движения; за шестнадцать столетий до Галилея он, споря с Аристотелем, объясняет меньшую скорость падения легких тел по сравнению с более тяжелыми сопротивлением воздуха и заключает отсюда, что в пустоте все тела должны падать одинаково быстро.

Среди множества идей, рассмотренных в поэме «О природе вещей», особого внимания заслуживает идея о так называемых *clinamen* — спонтанных отклонениях атомов от своих прямолинейных траекторий. Эпикур и Лукреций понимали, что движение атомов по траекториям, строго определенным тем или иным законом (например, обусловленное их весом падение строго вниз), неизбежно приводит к **фатальной детерминированности, predeterminedности** всех будущих событий, в том числе и человеческих поступков. Это казалось совершенно неприемлемым с точки зрения этики, так как отрицало наличие у человека свободы воли, а, значит, и ответственности за свои деяния. Выход был найден в представлении о том, что атомы, помимо закономерных движений, испытывают еще спонтанные, случайные, непредсказуемые отклонения от своих законных путей — **clinamen**.

«... тела изначальные в некое время

*В месте, неведомом нам, начинают слегка отклоняться,
Так что едва и назвать отклонением это возможно.
Если ж, как капли дождя, они вниз продолжали бы падать,
Не отклоняясь ничуть на пути в пустоте необъятной,
То никаких бы ни встреч, ни толчков у начал не рождалось,
И ничего никогда породить не могла бы природа».*

Лукреций. О природе вещей

«Лучше было бы следовать мифу о богах, чем быть рабом физиков (естествоиспытателей), миф дает намек на надежду умилоствить богов посредством почитания их, а судьба [предопределенная траекториями атомов] заключает в себе неумолимую необходимость».

Эпикур. Письмо к Менекию

Только недавно ученые, уже на нынешнем уровне развития науки, осознали, как прав был Эпикур, утверждая необходимость случайных, непредсказуемых флуктуаций в поведении микрочастиц, неизбежность «шума», который является источником богатства и разнообразия форм нашего мира.

Споры между античными атомистами и сторонниками представлений о непрерывности, бесконечной делимости материи стали одной из основных движущих сил

развития картины мира в новое и новейшее время. Очень поучительно проследить, как они преломляются в истории борьбы корпускулярных и волновых учений о природе света, противопоставления поля и вещества, проблемы соотношения классических и квантовых свойств материи. Как обычно, в конце концов оказалось, что истина находится между крайними точками зрения и глубже их: дискретность и непрерывность являются не взаимоисключающими, а взаимодополняющими атрибутами материи.

3.2. Аристотелево учение

Аристотель родился в 384 году до н.э. в Стагире — городе на северном побережье Эгейского моря — и умер в 322 году на острове Эвбея.

Сама личность Аристотеля Стагирита легендарна. Он провел детство при дворе македонских царей, где его отец служил врачом и где он познакомился с юным Филиппом, будущим покорителем Греции и отцом Александра Македонского. Лишившись в 15 лет родителей, Аристотель уехал в Афины и поступил в Академию Платона, где пробыл 20 лет, сначала в качестве ученика, а затем преподавателя. Платон высоко ценил Аристотеля и называл его «умом»; тот, в свою очередь, платил учителю глубоким уважением, хотя принципиально расходился с ним по философским вопросам («Платон мне друг, но истина — больший друг!»). После смерти Платона Аристотель покидает Афины и скитается по малоазийским колониям греков, пока в 342 году не получает приглашения Филиппа II в новую столицу Македонии — Пеллу, воспитывать юного сына, Александра. Впоследствии Александр, по свидетельству Плутарха, скажет: «Я чтю Аристотеля наравне с отцом, так как если отцу я обязан жизнью, то Аристотелю — тем, что дает ей цену».

*В 338 году Филипп II, разбив соединенное греческое войско при Херонее, становится властелином всей Греции. Это дает возможность Аристотелю уже пятидесятилетним мужем вернуться в Афины и открыть собственную философскую школу. Это был знаменитый **Ликей**, или школа перипатетиков, который просуществовал до конца античного мира. Александр завоевывал мир — Аристотель и его ученики познавали его. Теофраст, опираясь на рассказы македонских воинов, описывал гигантские фиговые деревья в Индии и мангровые рожи на берегу Черного моря. Дикеарх по тем же источникам составлял новое описание Земли и вычислял площадь ее поверхности. Менон изучал медицинскую литературу, Евдем писал историю математики и астрономии, Аристоксен — историю музыки...*

После смерти Александра Аристотель вынужден был бежать из Афин и в следующем, 322 году умер. Его наследие насчитывало несколько сот папирусных свитков, трактовавших вопросы философии, физики, биологии, психологии, логики, этики, политики и экономики, а также искусствоведения.

Помимо энциклопедических знаний Аристотель прославился непревзойденной глубиной логического анализа и пытливым отношением к окружающему миру. Он считается отцом зоологии. Он же ввел понятие **«физика»**, **определив ее как науку, которая «имеет дело с таким бытием, которое способно к**

движению, и с такой сущностью, ... которая не может существовать отдельно от материи». Созданная им картина мира была в высшей степени оригинальна, подкреплена железной логикой и всеобъемлюща. Поэтому, несмотря на то, что некоторые положения Аристотеля уже при его жизни не представляли последнего слова в науке, аристотелево объяснение мироздания с небольшими изменениями владело умами в течение двух тысяч лет.

Аристотель считает основой вещей единую бесконечно делимую материю, пассивную и неизменную. Материя сама по себе не существует вне какой-либо формы. **Форма является причиной и сущностью вещей.** Форма определяет свойства материи, придавая ей признаки одной из стихий — земли, воды, воздуха, огня и эфира (из которого состоят небесные сферы). Отсюда следует возможность качественных изменений, превращения стихий друг в друга.

Основным (точнее, единственным) атрибутом материи Аристотель считал ее способность к движению. Движение он понимает широко — как возникновение или уничтожение определенных тел, их рост или уменьшение, как изменение качества и, наконец, как перемена места, перемещение. Аристотель никогда не рассматривает движение отдельно от его результата или цели. Перемещение у него — это всегда перемещение **от чего-то к чему-то** и, в зависимости от начальной и конечной точек, может происходить по-разному. Движение к **естественному месту**, которое есть у каждого предмета (у тяжелых — низ, у легких — верх), не требует материальной причины, а «насильственное» движение, когда тело выводится из своего естественного места, происходит только под действием движущей силы и прекращается, как только прекращается действие силы. Нет необходимости особо доказывать биологическое происхождение идеи определения движения через его цель.

Перемещение Аристотель рассматривал как непрерывный процесс, а апории Зенона о противоречивости непрерывного движения опровергал, считая, что в них неправомерно смешиваются понятия бесконечности **актуальной** (то есть достигнутой, осуществленной, чувственно воспринимаемой) и бесконечности **потенциальной** (то есть понимаемой в смысле **возможности** производить какую-либо операцию, например, дихотомию, сколь угодно большое, но конечное число раз).

«Вообще говоря, бесконечное существует таким образом, что всегда берется иное и иное, и взятое всегда бывает конечным, но всегда разным и разным».

Аристотель. Физика

Аристотель доказывает вечность движения, однако отвергает идею о **самодвижении** материи. Все движущееся движимо другими телами, а мир в целом приводится

в движение неким перводвигателем. Перводвигатель неподвижен (в противном случае был бы первоперводвигатель), вечен (ибо движение, вызываемое им, вечно). Фактически перводвигатель — это бог.

Учение Аристотеля о пространстве и времени исходит из понятия **непрерывности**. Непрерывное, по Аристотелю, устроено таким образом, что любой сколь угодно малый его элемент **пересекается** с соседними элементами. Это делает немыслимым разбиение отрезка конечной длины на непротяженные точки и снимает многие из противоречий непрерывности, указанные Зеноном. Непрерывная по протяженности величина — это пространство. Время — величина, непрерывная по последовательности: «теперь» пересекается с прошлым и с будущим одновременно.

Пространство не однородно и не изотропно: Вселенная Аристотеля имеет центр и периферию, верх (направление от центра) и низ (к центру). Это, собственно, и дает возможность разделять движения на естественные и насильственные.

Взаимодействие понимается Аристотелем как действие движущего на движимое, но не наоборот. Такое одностороннее представление господствовало вплоть до формулировки Ньютоном его Третьего закона (действие равно противодействию), который сейчас рассматривается как тривиальное следствие закона сохранения импульса, а во времена Ньютона означал коренное изменение освященных временем и авторитетом Аристотеля взглядов.

Чрезвычайно важное место в картине мира Аристотеля играет понятие **конечной причины** и **постулат целесообразности, согласно которому ход любого процесса определяется его результатом**. Так, дождь идет для того — и **потому**, — чтобы рос хлеб. Природа, по Аристотелю, как бы единый живой организм, где одно происходит ради другого. Его учение о целесообразности всех природных процессов — телеология, — не отрицая существования случайного и самопроизвольного, рассматривает эти категории как нечто второстепенное, происходящее как бы по недосмотру разумных существ или стремящейся к целесообразности природы.

Космологические представления Аристотеля были старомодны даже для его времени: еще до него пифагорейцы говорили о движении в мировом пространстве шарообразной Земли наряду с другими планетами, а Левкипп и Демокрит — о пространственно-временной бесконечности Вселенной и бесчисленности миров в ней. Через сто лет после Аристотеля Аристарх Самосский на основании своих наблюдений придет к гелиоцентрической системе мира, в которой Земля вращается вокруг Солнца. Однако авторитет Аристотеля был столь велик, что на века утвердил пред-

ложенную им следующую картину мироздания. В центре мира находится неподвижная шарообразная Земля. Вокруг нее вращаются сферы, к которым прикреплены небесные светила. Самая удаленная — сфера неподвижных звезд, которая является границей космоса. Ближайшая к Земле — сфера Луны, отделяющая надлунный мир совершенных круговых движений от несовершенного **подлунного мира**. Надлунные тела построены из вечного, неуничтожимого эфира, не подверженного никаким изменениям и превращениям. Вне сферы неподвижных звезд нет ни времени, ни пространства, ни пустоты, а есть только неподвижный, не имеющий частей, вечный перводвижитель — бог, в понимании Аристотеля.

3.3. Эволюция представлений о материи в научную эпоху

Представление о единой субстанции, являющейся первоосновой всего сущего и ведущей себя в соответствии с некоторыми объективными законами, которые можно и должно познать, возникло в Древней Греции. Впервые отчетливую форму это представление приняло у мыслителей ионийской школы — Фалеса и его последователей. В античной Греции лежит также начало многовекового противостояния корпускулярной (атомистической) и континуальной программ описания мира.

В механической картине мира под материей понималось вещество, состоящее из частиц, вечных и неизменных. Основная абстракция ньютоновской механики, *материальная точка*, — это как раз абстракция дискретной неделимой частицы.

В электромагнитной картине мира появилось представление об еще одной форме материи — физическом *поле*, непрерывном в пространстве, не имеющем определенных границ и тем самым принципиально отличающемся от вещества.

В неклассической картине мира непреодолимая граница между полем и веществом исчезает. Согласно концепции корпускулярно-волнового дуализма, все поля *квантуются*, то есть могут рассматриваться как совокупность частиц; с другой стороны, каждая элементарная частица может рассматриваться как квант некоторого поля.

В неклассической картине появляется, а в постнеклассической утверждается окончательно представление о том, что *вакуум*, который ранее рассматривался как абсолютная пустота, лишенное материи пространство, на самом деле также представляет собой форму материи, обладающую сложными и нетривиальными свойствами, которые во многом определяют динамику развития Вселенной.

Тема 4. Эволюция научных представлений о пространстве и времени

4.1. Два подхода к пониманию пространства и времени

Несмотря на усилия философов и ученых, общепринятого определения пространства и времени до сих пор нет. Причина в том, что для определения любого понятия нужно, во-первых, указать более широкую категорию, к которой оно относится, и, во-вторых, указать, чем оно отличается от других понятий этой категории. Но понятия пространства и времени сами по себе настолько широки и фундаментальны, что для них невозможно указать еще более широкой категории!

В истории науки известны два основных подхода к пониманию пространства и времени — *субстанциальный* и *реляционный*.

В рамках субстанциального подхода (от «субстанция») пространство и время понимаются как независимые от материальных тел сущности, обладающие собственным бытием.

Первыми приверженцами субстанциального подхода были, по-видимому, древнегреческие *атомисты* Левкипп и Демокрит, которые заявили, что наряду с атомами, составляющими все тела, необходимым началом мироздания является пустота. Большинство же современных им философов полагало, что пустота суть небытие, которое не может обладать существованием по определению.

В рамках реляционного подхода (от лат. *relatio* — отношение) пространство и время понимаются как система отношений (далее — ближе, до — после) между материальными телами и происходящими с ними событиями.

Сторонником реляционного подхода был Аристотель, учивший, что понятие *места* (сейчас мы сказали бы: координат) можно определить только указанием материальных тел, заключающих это место между собой, а понятие *времени* возникает только когда имеется ряд событий, упорядоченных в определенной последовательности.

У Аристотеля пространство и время у не существуют независимо от материи. Дело в том, что он отрицает существование пустоты. Пустота — это **однородное** пространство, все точки которого равноправны, так как нет материальных меток, чтобы выделить ту или иную из них. Поэтому в пустоте невозможно определить естественное, выделенное место тела. Раз начавшись, движение, даже «насильственное», в пустоте не могло бы прекратиться. «Никто не сможет сказать, почему [тело], приведенное в движение, где-нибудь остановится, ибо почему оно скорее остановится здесь, а не там? Следовательно, ему необходимо или покоиться, или двигаться до

бесконечности» (Аристотель. Физика). Эти рассуждения на самом деле совершенно безупречны. Если допустить существование пустоты, они немедленно приводят к закону инерции. Последний, однако, противоречил аристотелевскому постулату о целесообразности движения и был использован как пример доведения до абсурда, доказывающий невозможность пустоты. Для движения необходимости в пустоте нет: все движется в круговороте, уступая место друг другу. Вселенная заполнена материей плотно.

Авторитет Аристотеля был огромен. Чтобы противостоять ему, потребовался гений и интеллектуальное мужество Ньютона. Тот возродил субстанциальный подход, введя понятия Абсолютного пространства и Абсолютного времени. Последние, существуя они реально, представляли бы идеальную *систему отсчета*, пользуясь которой можно было бы сказать, каково *на самом деле* расстояние между двумя предметами, сколько *на самом деле* прошло времени между двумя событиями, с какой скоростью *на самом деле* движется тело. Однако природа оказалась устроена сложнее и интереснее.

4.2. Основные симметрии пространства и времени

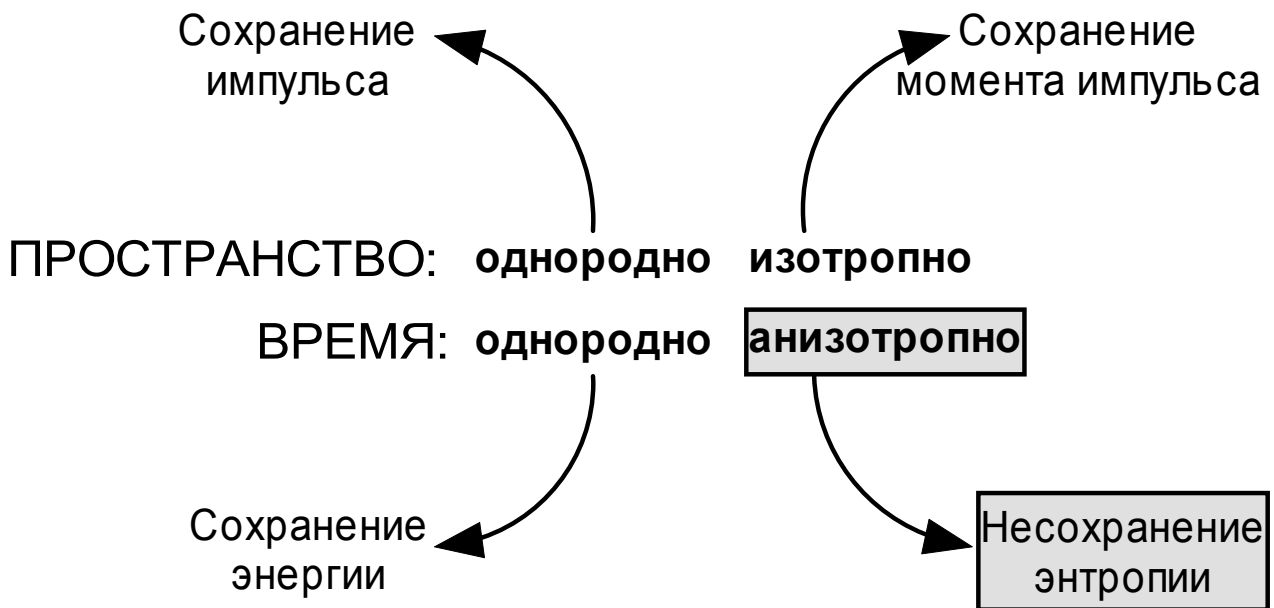
Как бы ни понимать пространство и время, они обладают рядом очевидных свойств симметрии.

Пространство однородно. Другими словами, все точки пространства эквивалентны, ни одна из них не выделена среди других. Это, в частности, означает, что у Вселенной нет центра, так же как и краин.

Пространство изотропно. Изотропность означает инвариантность относительно изменения направления: все направления в пространстве равноправны, никакое из них не лучше и не хуже других.

Время однородно. Все моменты времени равноправны. Благодаря этой симметрии **эксперимент**, повторенный сто лет спустя, дает те же результаты.

Согласно *теореме Нётер*, каждая симметрия влечет за собой сохранение определенной физической величины. Поскольку все мировые процессы разворачиваются в пространстве и во времени, то законы сохранения, вытекающие из пространственно-временных симметрий (см. рисунок), имеют всеобщий характер.



Важнейший закон сохранения, который, как установлено в физике, вытекает из однородности времени, — *закон сохранения энергии*:

Существует физическая величина — *энергия*, которая, в силу однородности времени, в замкнутой системе не изменяется, что бы в системе ни происходило. Другими словами, энергия не может возникнуть ниоткуда и исчезать без следа.

Из однородности пространства вытекает *закон сохранения импульса* (другое название импульса — количество движения). Третий закон Ньютона («действие равно противодействию») — одно из следствий этого закона, как и принцип реактивного движения.

Изотропность пространства приводит к *закону сохранения момента импульса* — величины, характеризующей количество вращательного движения. Благодаря этому закону Земля вращается с постоянной скоростью, один оборот за **24** часа, а направление земной оси практически не меняется с течением времени — уже несколько тысяч лет ее северный конец указывает на Полярную звезду.

В отличие от пространства, время не изотропно: направления «по течению» времени и «против течения» не эквивалентны. Повседневный опыт убеждает нас, что многие процессы в мире **необратимы**. Каждому приходилось наблюдать, как стакан падает со стола, разбивается, а вода из него разливается по полу. Однако никто еще не видел, чтобы осколки стакана сами по себе срослись, и в него собралась разлитая по полу вода. Такое бывает только в кино, пущенном задом наперед. Однако если бы время было изотропно, то и падение стакана со всеми последствиями, и обратный процесс должны были бы случаться одинаково часто.

Если бы время было изотропно, то, по теореме Нётер, должен был бы иметь место закон сохранения соответствующей физической величины. Поскольку же такой симметрии нет, то эта величина сохраняться не должна. «Закон несохранения», обусловленный анизотропностью времени, действительно существует (он известен как второй закон термодинамики) и играет важную роль в современной эволюционной картине мира.

4.3. Постулаты Эйнштейна

В механической картине мира господствует *субстанциальное* понимание пространства и времени. Абсолютное пространство и Абсолютное время Ньютона бесконечны, однородны, находятся вне материальных тел и не зависят от них.

Однако эти представления и следствия из них (классический закон сложения скоростей) входят в противоречие с теоретическими соображениями и экспериментальными данными (опыт Майкельсона-Морли), указывающими на наличие у пространства и времени более сложных, динамических симметрий, выражающих инвариантность пространственно-временных отношений при переходе от одной системы отсчета к другой. Эти симметрии выражаются т.н. постулатами Эйнштейна.

Первый постулат Эйнштейна — это *принцип относительности*. К формулировке принципа относительности подошел еще Галилей, который придумал **мысленный эксперимент**, ставший известным как «корабль Галилея». Представим, говорил он, что вы просыпаетесь в трюме корабля и желаете выяснить, стоит ли он на якоре или идет под всеми парусами. Как это сделать, не выглядывая наружу? Очевидно, следует провести какой-то **эксперимент**, который дает разные результаты на покоящемся и на плывущем корабле. Попробуем, например, выпустить из руки камень. На покоящемся корабле он упадет вертикально вниз. А вот плывущий корабль, казалось бы, должен за время падения сместиться вперед, и потому путешественник в трюме должен наблюдать отклонение падающего камня от вертикали — назад, в сторону, противоположную движению судна.

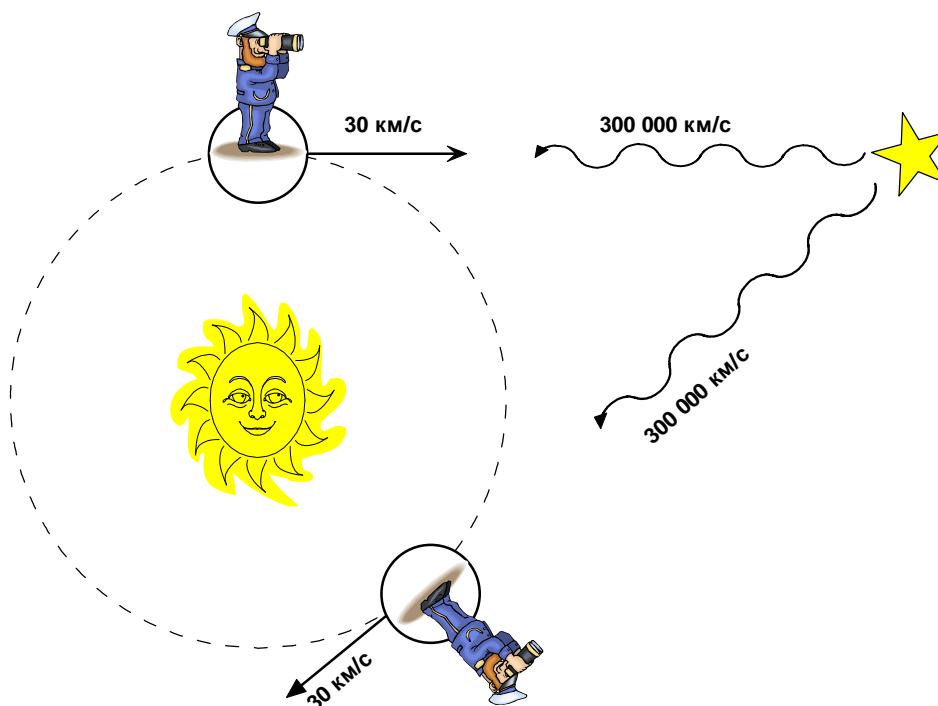
На самом деле любой, кто ронял что-либо в поезде, самолете или на корабле, знает, что ничего подобного не происходит. Галилей объясняет, почему: на плывущем корабле и путешественник, и камень, который он держит, имеют скорость корабля. Когда камень выпускают из рук, он сохраняет эту скорость. В результате в каждый момент полета он находится над одной и той же точкой палубы и упадет именно на нее. Проанализировав еще несколько возможных **экспериментов**, Галилей пришел к выводу, что, не выходя из трюма, путешественник никогда не сможет определить, плывет ли корабль!

Основываясь на доводах Галилея, можно сформулировать положение, известное как принцип относительности: *любое явление должно идти совершенно одинаково в любой системе отсчета.*

Формулировка простая, но не очень строгая. Точнее сказать: «уравнения, описывающие любое явление, должны быть инвариантны относительно преобразований, описывающих переход от одной системы отсчета к другой».

Преобразования, о которых речь, в классической механике называются *преобразованиями Галилея* и выглядят элементарно. Первое сводится к утверждению, что время во всех системах отсчета течет одинаково и, в свете ньютоновской концепции Абсолютного времени, само собой разумеется. Второе выражает собой *закон сложения скоростей*, которым пользуются со второго класса школы. Например: с какой скоростью уменьшается расстояние между поездами, идущими навстречу друг другу со скоростями **40** и **60** км/ч? Ответ очевиден: **40 + 60 = 100** км/ч.

Уравнения ньютоновской механики оказались действительно инвариантными относительно преобразований Галилея. С электричеством дела обстояли хуже. В середине **XIX** века Максвелл вывел уравнения, описывавшие все электрические и магнитные явления и с успехом прошедшие все экспериментальные проверки. Но преобразования Галилея изменяли вид уравнений Максвелла! Что-то было не в порядке либо с первыми, либо со вторыми. В конце **XIX** века было обнаружено, что, если скорости движения сравнимы со скоростью света, утрачивают силу преобразования Галилея: нарушается закон сложения скоростей. Честь этого открытия принадлежит физикам Майкельсону и Морли.



Идея *опытов Майкельсона-Морли* заключалась в следующем. Пусть мы наблюдаем с Земли какую-то звезду. Свет от нее летит со скоростью $c = 300\,000$ км/с. Но Земля сама движется вокруг Солнца со средней скоростью 30 км/с. Если скорость Земли направлена к звезде, то для нас скорость светового луча должна составить $c + 30$ км/с («поезда идут навстречу»). Однако опыты дали поразительный результат: измеренная скорость света от любой звезды составляет ровно $300\,000$ км/с, ни больше, ни меньше. Это выглядело так же невероятно, как если бы правильный ответ к школьной задачке о поездах, рассмотренной выше, был не 100 , а 60 км/ч!

Открытие вызвало большое волнение среди ученых. Появились теории, пытавшиеся объяснить, *почему* опыт Майкельсона—Морли дает «неправильный» результат. Но в **1905** г. Эйнштейн предложил принципиально иной подход. **Эксперимент** показывает, что, как бы ни двигался наблюдатель, его приборы неизменно показывают одну и ту же скорость света? Значит, это закон природы! Примем его как постулат (*второй постулат Эйнштейна, или принцип инвариантности скорости света*):

Если скорость объекта в какой-нибудь системе отсчета равна скорости света в вакууме $c = 300\,000$ км/с, то в любой другой системе отсчета она также равна скорости света.

Обратите внимание, что дело тут не в особых свойствах света, а в особых свойствах скорости $c = 300\,000$ км/с. В нашем мире эта скорость — особенная, выделенная. А свет — просто самый удобный объект, который может двигаться с такой скоростью

Первый же постулат Эйнштейна — это, как обсуждалось выше, принцип относительности, наиболее общая формулировка которого такова:

Все **инерциальные системы отсчета** совершенно равноправны, среди них нет выделенных или предпочтительных.

К началу **XX** века справедливость принципа относительности подтверждалась данными не только механики, но всех разделов физики. Кроме того, он предполагает симметрию, гармоничность окружающего мира. А Эйнштейн был глубоко убежден, что теория, правильно описывающая мир, должна быть красивой.

4.4. Основные идеи специальной теории относительности

Эйнштейн показал, что из двух его постулатов (которые по сути своей есть эмпирические обобщения многочисленных наблюдательных и экспериментальных фактов) практически без дополнительных предположений вытекают следующие парадоксальные следствия, которые идут вразрез с привычными представлениями о свойствах пространства и времени. Анализ этих следствий составляет содержание *специальной теории относительности* (СТО).

1. *Относительность одновременности.* События, одновременные для одного наблюдателя, для другого могут происходить в разные моменты времени и даже в разной последовательности. Бессмысленно спрашивать, одновременны ли эти события «на самом деле»: принцип относительности требует считать всех наблюдателей равноправными.
2. *Релятивистское сокращение длин.* Длина тела, измеренная в системе отсчета, в которой оно движется со скоростью v , в $b = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ раз меньше его длины в системе отсчета, в которой оно неподвижно. Для привычных нам скоростей коэффициент b практически равен единице, и потому релятивистское сокращение длин незаметно. Разница становится существенной только для скоростей, близких к скорости света.
3. *Релятивистское замедление времени.* Продолжительность любого процесса в некотором теле, измеренная в системе отсчета, в которой тело движется со скоростью v , в $b = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ раз больше, чем в системе отсчета, в которой тело неподвижно. Так, космонавт, пролетающий мимо Земли, обнаружит, что все процессы на планете происходят в b раз медленнее, чем если бы он стоял на ней. А земной наблюдатель обнаружит, что медленнее (в b раз) тикают часы космонавта.
4. *Инвариантность интервала.* Пусть l — расстояние между точками, в которых произошли два события, t — промежуток времени между ними. В зависимости от выбора системы отсчета, l и t по отдельности могут быть разными, но величина $s^2 = (ct)^2 - l^2$, называемая *интервалом между событиями*, одинакова для всех наблюдателей. Если в другой системе отсчета между событиями проходит меньше времени, то и расстояние между ними оказывается меньше — ровно настолько, чтобы значение интервала не изменилось.
5. *Единство пространства и времени.* Из инвариантности интервала вытекает, что пространственные и временные промежутки при переходе от одной системы отсчета к другой изменяются строго согласованно. Поэтому в теории относительности пространство и время принято рассматривать не отдельно, а как разные стороны *единого четырехмерного пространства-времени*. Единство не означает эквивалентности, то есть тождественности: пространство трехмерно, а время одномерно; пространство изотропно, а время необратимо. Но одно без другого не существует и одно без другого не изменяется. Единство пространства и времени подобно единству рамы и колес в велосипеде: те тоже различны по своим свойствам, но они едины в том смысле, что как без рамы, так и без колес транспортного средства у нас нет. Кроме того, если мы захотим изменить конструкцию рамы, нам придется соответствующим образом менять и колеса, и наоборот.

6. *Инвариантность причинно-следственных связей.* Из инвариантности интервала можно вывести, что причинно связанные события во всех системах отсчета происходят в одной и той же последовательности. Если с точки зрения одного наблюдателя дед родился раньше внука, то же самое отметит любой другой наблюдатель. Это обеспечивает согласие теории относительности с *принципом причинности*:

каждое событие имеет *предшествующую ему* причину.

7. *Невозможность сверхсветовых скоростей.* Исходя из инвариантности интервала и принципа причинности, Эйнштейн показал, что скорость света — максимально возможная скорость движения материальных тел и передачи сигналов. Представление о сверхсветовых скоростях, популярное у фантастов, требует отказаться от принципа причинности и допустить возможность событий, причины которых еще не возникли, например, рождения внука, чей дед еще не появился на свет.

8. На свойства пространства-времени как единого целого опирается знаменитое соотношение Эйнштейна, выражающее *эквивалентность массы и энергии*: $E = mc^2$.

Иногда говорят, что формула Эйнштейна описывает превращение массы в энергию. На самом же деле она устанавливает, что *масса и есть энергия*. Если тело обладает массой m , то *тем самым* оно обладает энергией $E = mc^2$, которую можно, полностью или частично, превратить в другие формы энергии. Такое превращение происходит, например, в любой химической реакции: масса продуктов реакции отличается от массы исходных реагентов на величину, пропорциональную выделившейся или поглощенной тепловой энергии. Коэффициент пропорциональности ($1/c^2 \approx 0,0000000000000001 \text{ с}^2/\text{м}^2$), правда, очень мал, так что изменение массы в химических реакциях весьма незначительно. А вот в реакциях деления атомных ядер или, особенно, в реакциях *термоядерного синтеза*, идущих с очень большим энергосодержанием, изменение массы может достигать 1%.

Обратно, если энергия тела увеличилась на E , то тем самым его масса увеличилась на $m = E/c^2$. Например, с ростом скорости тела растет его кинетическая энергия и одновременно увеличивается масса. Когда скорость тела приближается к скорости света, его масса становится бесконечно большой, что означает невозможность дальнейшего разгона. Со скоростью света могут двигаться только частицы, *масса покоя* которых равна нулю.

4.5. Дальнейшее развитие представлений о пространстве и времени

Основным элементом новизны, отличавшим электромагнитную научную картину мира от ее предшественницы — механической НКМ — была идея новой формы мате-

рии, электромагнитного поля. Колебания электромагнитного поля — электромагнитные волны, в частности, свет — распространяются с максимально возможной в нашем мире скоростью c . Поэтому электромагнитная картина мира становится внутренне согласованной лишь после создания Эйнштейном специальной теории относительности (СТО) — новой системы физических представлений о свойствах пространства и времени. В СТО пространство и время рассматриваются как система отношений между материальными телами. Отсюда вытекает относительность одновременности, пространственных и временных промежутков. Непротиворечивость причинно-следственных связей в нашем мире обеспечивается невозможностью перемещения со сверхсветовыми скоростями. Пространство и время оказываются разными сторонами единого пространственно-временного континуума. Отсюда вытекают естественные связи между массой и энергией, электрическим и магнитным полями.

Дальнейшее углубление научных представлений о пространстве-времени связано с развитием общей теории относительности (ОТО), которое шло хронологически параллельно становлению неклассической картины мира, до поры до времени не будучи слишком тесно связанной с ней. В ОТО устанавливается физическая эквивалентность материального объекта — гравитационного поля — определенным геометрическим свойствам пространства-времени. Таким образом, связь между материей и пространством-временем оказалась более тесной и взаимной, чем обычная связь между объектом и его свойствами. Сам факт присутствия материальных тел искривляет пространство и изменяет темп течения времени; наоборот, искривление пространства-времени определяет характер движения тел. Исследование геометрии пространства-времени становится основой научной космологии.

В постнеклассической картине мира тенденция к признанию пространства-времени полноправным, активным, сложно устроенным структурным элементом Вселенной получила дальнейшее развитие, в особенности благодаря пониманию **вакуума** как особой формы материи. В физических статьях последних лет уже без кавычек употребляется термин «энергия пространства», под которой понимается энергия физического вакуума. Общеизвестным становится положение о том, что в ультрамикроскопических масштабах (10^{-35} м, 10^{-43} с) квантовые флуктуации вакуума делают непригодными обычные понятия «до — после», «ближе — дальше», «точка пространства», «момент времени»; образное представление о пространственно-временной ткани в этих масштабах дает распространенное выражение «квантовая пена». Рассматриваются модели возникновения Вселенной в результате квантовых флуктуаций пространства-времени.

Тема 5. Эволюция представлений о причинности, закономерности и случайности

В любой рационалистической и, тем более, научной картине мира каждое явление должно иметь естественную причину. Допущение о возможности событий беспричинных или вызванных сверхъестественными причинами означает отказ от программы рационального объяснения мира, в рамках которой только и имеет смысл научная деятельность. Однако связь между причиной и следствием понималась по-разному, порождая разные представления о природных закономерностях и отражающих их научных теориях.

5.1. Античные представления о гармонии и закономерности природы

Идея о том, что мир представляет собой единую упорядоченную, гармоничную целостность утвердилась еще в античной Греции. Недаром возникший тогда для обозначения Вселенной термин «Космос» и современное слово «косметика» происходят от одного греческого корня, означающего гармонию, красоту. Древние самым выбором термина подчеркивали предполагаемую гармоничность, упорядоченность мира. В таком мире не может быть случайных, посторонних или уродливых элементов мироздания. В упорядоченном Космосе античных мыслителей ничто не может происходить просто так, без причины и цели, но все должно подчиняться закону. Задача философа, считали они, как раз и заключается в том, чтобы выявить те законы, которым обязано подчиняться всё, происходящее в мире, — законы, определяющие мировой порядок. Начиная с античности, в истории человеческих представлений о природе и ее законах постоянно соперничали две концепции, два общих объяснительных подхода.

Корпускулярный подход («корпускула» значит «частица»), основан на представлении о том, что все на свете состоит из мельчайших частиц, *атомов* («атом» по-гречески — «неделимый»). Первые *атомисты* (Левкипп и Демокрит), учившие, что мир — это атомы, закономерно движущиеся в пустоте, появились еще в Древней Греции в VI в. до н.э. Правда, по вопросу о свойствах атомов среди них не было согласия — ведь атомистическая гипотеза в то время не могла не быть чисто умозрительной. Тем не менее, исходя из нее древнеримский поэт и философ Лукреций Кар в поэме «О природе вещей» дал правильные объяснения множеству природных явлений. Недаром великий физик Р. Фейнман говорил, что из всех коротких предложений наибольшую информацию об окружающем мире несет фраза: «Всё состоит из атомов».

Лукреций при создании своей поэмы опирался на учение греческого философа Эпикура. Однако Эпикур указал и фундаментальную проблему атомистики. Если движение атомов по своим траекториям *строго* определено тем или иным законом, это неизбежно приводит к фатальной **детерминированности**, *предопределенности* всех будущих событий, в том числе и человеческих поступков. Но это совершенно неприемлемо с точки зрения этики, так как отрицает наличие у человека свободы воли, а значит, и ответственности за свои деяния. «Лучше было бы следовать мифу о богах..., миф дает намек на надежду умиловить богов посредством почитания их, а судьба [предопределенная траекториями атомов] заключает в себе неумолимую необходимость», — восклицал Эпикур в одном из писем. Он же, однако, предложил и выход, введя представление о том, что атомы, кроме закономерных движений, испытывают еще небольшие случайные отклонения от своих законных путей.

Только недавно, уже на нынешнем уровне развития науки, выяснилось, что Эпикур был совершенно прав, утверждая необходимость случайных, непредсказуемых *флуктуаций* в поведении микрочастиц, неизбежность «шума», который является источником богатства и разнообразия форм нашего мира.

В первой научной — механической картине мира считалось, что следствие из причины вытекает однозначно и определяется, в конечном счете, законами механики. Это представление основано на том математическом факте, что уравнения механики, описывающие движение тела, *при условии, что для какого-нибудь момента времени точно заданы положение и скорость этого тела (начальные условия)*, имеют единственное решение. Отыскав его, мы сможем сказать, где тело находилось в любой момент прошлого, и где оно будет находиться в любой будущий момент. На этом основании сформировалась концепция *механического детерминизма*, согласно которой в принципе возможно дать точное и однозначное механическое описание любого будущего или прошлого состояния Вселенной по ее современному механическому состоянию.

В механической картине мира впервые оформилось понятие *состояния физической системы*. В наиболее общей формулировке,

состояние системы — это совокупность данных, позволяющая предсказать эволюцию системы во времени.
--

В механике состояние системы описывается значениями физических величин — координат и скоростей тел, входящих в систему. Законы механики позволяют, в принципе, по начальному состоянию системы *однозначно* определить ее состояние в любой будущий или прошлый момент времени. Тем же свойством обладают уравне-

ния классической электродинамики Максвелла, которая легла в основу следующей — электромагнитной научной картины мира. Разница лишь в том, что в электродинамике Максвелла состояние системы определяется значениями электрического и магнитного **полей** в каждой точке пространства. Поэтому *детерминизм так же свойствен электромагнитной картине мира, как и механической*. Однако тот же Максвелл стал одним из создателей теории, продемонстрировавшей несостоятельность механического детерминизма — молекулярно-кинетической теории газов.

5.2. Молекулярно-кинетическая теория: неизбежность случайности

Первоначально основная идея молекулярно-кинетической теории (МКТ) заключалась в том, чтобы, рассмотрев механическое движение молекул газа, *теоретически вывести* законы термодинамики, установленные опытным путем. Главная трудность на этом пути — огромное число молекул в любой представляющей интерес системе, обычно соизмеримое с числом Авогадро, $N_A = 6 \times 10^{23}$. Совершенно нереально даже записать уравнения движения *для каждой* из такого количества молекул, не говоря уже о том, чтобы решить. Поэтому Максвеллу пришлось изменить саму постановку задачи. Вместо того чтобы искать, каковы в точности положение и скорость данной молекулы, он задался вопросом, какова *вероятность* того, что скорость молекулы имеет определенное значение. Оказалось, что ответ на этот вопрос — знаменитое *распределение Максвелла молекул по скоростям* — несложно получить, не вдаваясь в детали взаимодействия молекул друг с другом.

Поначалу Максвелл полагал, что использование вероятностей является лишь техническим приемом, позволяющим упростить решение трудной задачи. Однако впоследствии он пришел к убеждению, что в системах большого числа частиц присутствует элемент случайности, который *принципиально* не может быть учтен в рамках механической, **детерминированной** схемы. Аналогичную эволюцию претерпели взгляды другого выдающегося физика XIX века, Людвиг Больцмана. Начав с попыток вывести законы термодинамики из ньютоновской механики молекул, он пришел к пониманию того, что поведение больших коллективов частиц управляется более глубокими законами — не механическими, а *вероятностными*. Пример, которым Больцман пояснял, почему бессмысленно говорить о **детерминированности** траекторий молекул, можно изложить следующим образом.

В 30-литровой фляге, из тех, в которых перевозят молоко или сметану, при нормальных атмосферных условиях содержится около 10^{24} молекул воздуха. Вообразим, что с помощью некоего чудесного компьютера мы рассчитали траекторию будущего движения каждой молекулы. Теперь удалим из фляги одну-единственную молекулу.

В молекулярно-кинетической теории появился совершенно новый подход к описанию состояния системы: оно описывалось не значениями физических величин, а *вероятностями* этих значений. Этот подход оказался чрезвычайно плодотворным при построении фундаментальных естественнонаучных теорий XX века.

5.3. Динамический хаос

В МКТ впервые была нарисована картина *хаотического* движения. Любые попытки рассчитать точные траектории молекул газа оказываются безуспешными ввиду чрезвычайной чувствительности результатов расчета к самому ничтожному изменению начальных условий. Единственно полезная информация о такой системе сводится к значениям *вероятностей* тех или иных ее состояний и *средним* значениям характерных физических величин.

Эта картина радикально отличалась от ньютоновской картины величавого, закономерного, предсказуемого движения планет по своим орбитам. Причину отличия поначалу видели лишь в очень большом количестве частиц в молекулярных системах. Считалось, что система, описываемая небольшим числом уравнений, всегда ведет себя «хорошо», упорядоченно, а хаотическое поведение возникает с ростом числа элементов системы, когда мы, вследствие ограниченности своих возможностей, не способны отследить все взаимодействия в ней.

В XX веке выяснилось, что хаотическим, непредсказуемым поведением могут обладать системы и из небольшого числа частиц, например, трех.

Вот задача, которую рассмотрел французский астроном Мишель Энон. В систему двух одинаковых звезд, обращающихся друг вокруг друга, влетает метеорит. Требуется вычислить его дальнейшую траекторию. Нетрудно записать уравнения движения метеорита, несложно составить компьютерную программу для их решения. Однако дать общую характеристику движения невозможно: *в зависимости от начальных условий*, метеорит либо вечно кружится в окрестности одной из звезд, либо время от времени перескакивает от одной звезды к другой, либо, в конце концов, навсегда покидает звездную систему. Переход от одного типа поведения к другому может происходить при ничтожном изменении начальных условий. Поскольку же они всегда известны с некоторой погрешностью, это и означает непредсказуемость движения метеорита. Парадокс: математически задача полностью определена, возможность ее решения, как теоретическая, так и практическая, имеется, а дать долгосрочный прогноз поведения системы невозможно.

Ситуация, когда поведение простой системы невозможно предсказать из-за ее чувствительности к слабому изменению начальных условий, называется *динамическим хаосом*.

Хаос следует отличать от беспорядка.

Беспорядочным называется поведение, определяемое постоянно действующими факторами, которые мы не можем или не хотим учитывать.

Так, броуновское движение частицы порошка в жидкости беспорядочно, поскольку полностью обусловлено невидимыми для наблюдателя ударами молекул по частице. Хаотическое же поведение возникает, когда все определяющие его факторы известны, но воспользоваться этим знанием невозможно из-за чрезвычайной чувствительности расчетов к малым ошибкам.

Динамический хаос имеет место не только в академической задаче Энона, но и в более насущных ситуациях. Установлено, что хаотична динамика Солнечной системы: вследствие взаимного притяжения планет друг к другу медленно изменяются параметры их орбит, и невозможно предсказать, каковы они будут через сотни миллионов лет. В начале 60-х годов XX века американский метеоролог Э. Лоренц вывел систему трех — всего лишь трех! — уравнений, описывающую изменение погоды над ограниченным участком земной поверхности, — и обнаружил, что она обладает динамическим хаосом. Хаотично, как выяснилось, поведение атмосферы в целом — и потому долгосрочный (на месяцы вперед) прогноз погоды никогда не станет точным, как бы ни росла мощность компьютеров в метеоцентрах. Хаотична электрическая активность здорового головного мозга. В последние десятилетия выяснилось, что колебания курсов акций на фондовых рынках, по всей видимости, также не беспорядочны, а хаотичны. Другими словами, в принципе возможно найти систему уравнений, которая описывает, как курсы акций меняются с течением времени, но даже с помощью этой системы невозможно предсказать, каким будет индекс Доу-Джонса, скажем, через пару лет.

5.4. Квантовые представления: корпускулярно-волновой дуализм

Важной вехой в развитии представлений о природе света стали работы Ньютона, который был прекрасным оптиком. В механической картине мира все сводится к механическому перемещению тел. Соответственно, Ньютон считал, что свет представляет собой поток корпускул, движущихся с огромной скоростью — отсюда прямолинейность световых лучей. Авторитет Ньютона был велик, и корпускулярные представления о природе света преобладали вплоть до XIX века.

Постепенно накапливались факты, которые невозможно было уложить в рамки корпускулярной теории. Были открыты явления *интерференции* (при котором два световых пучка могут не только усиливать, но и гасить друг друга) и *дифракции* (огибание светом препятствий). В начале XIX века французский физик О. Френель представил математическую теорию оптических явлений, основанную на представлениях Х. Гюйгенса, о том, что свет представляет собой *волну*, то есть распространяющиеся колебания. В 70-х годах XIX века Максвелл и Герц выяснили, что же именно колеблется в световой волне: электрическое и магнитное **поля**. Свет оказался *электромагнитной волной*.

Однако в 1887 году А. Г. Столетов открыл явление, которое никак не вписывалось уже в волновую теорию: внешний фотоэффект, то есть выбивание светом электронов из металла. Он установил, что ни энергия вылетающих частиц, ни сама возможность вылета не зависят от силы света, а только от его длины волны. Самый слабый синий свет вызывает фотоэффект, а мощным красным пучком можно металл хоть расплавить, но фотоэффект так и не появится! Сходным образом, фотобумага не засвечивается красной лампой.

С точки зрения волновой теории, причина фотоэффекта заключается в том, что колебания электрического поля в световой волне заставляют колебаться заряженные частицы — электроны в металле. Чем ярче свет, тем сильнее колебания электрического поля в световой волне, тем больше размах вызываемых ею колебаний электронов и тем легче должно быть им вырваться из металла. Однако эксперимент упрямо говорил, что важна не сила, а длина волны света.

Почти двадцать лет законы фотоэффекта ставили физиков в тупик, пока в 1905 г. Эйнштейн не показал, что они получают элементарное объяснение, если предположить, что свет представляет собой совокупность частиц (*фотонов*), энергия которых обратно пропорциональна длине волны света. Энергия одного «красного» (длинноволнового) фотона слишком мала, чтобы выбить электрон, а энергии «синего» (коротковолнового) хватает с запасом. Интенсивность же светового луча определяется *числом* фотонов в нем и не влияет на способность каждого отдельного фотона выбить электрон. Именно за эту работу Эйнштейн получил свою Нобелевскую премию. Другой нобелевский лауреат, Макс Планк, показал, что без представлений о световых *квантах*, фотонах, невозможно объяснить законы теплового излучения.

Так что же такое свет *на самом деле*: волна или поток корпускул? Прежде, чем ответить, полезно вспомнить следующую притчу.

Жил некогда просвещенный властитель, покровитель наук. И собрал он при своем дворе семь знаменитейших мудрецов своего времени, но все они были слепые. И прослышали как-то мудрецы о странном животном по имени «слон», и попросили владыку доставить им один экземпляр для исследования. Желание мудрецов было исполнено, и начали они ощупывать слона. Одному попался в руки хобот, другому хвост, третьему бивень, четвертому нога, пятому ухо... Затем мудрецы устроили симпозиум, на котором каждый выступил с докладом «О свойствах слона». Первый докладчик сказал: слон — длинный, мягкий и пустой внутри. Второй уточнил: слон действительно длинный и гибкий, но не пустой, а внутри у него твердые косточки. Третий высмеял первых двух, объявив, что слон твердый и острый. Четвертый сравнил слона со столбом, пятый — с простыней...

Кто же из мудрецов был прав? Ясно, что полностью — никто, но каждый прав по своему. Слон действительно в разных местах имеет свойства и шланга, и веревки, и столба — все зависит от того, с какой стороны к нему подойти.

Аналогичным образом, материальный объект, который мы называем «свет», есть образование сложное, не укладывающееся полностью ни в одну из простых моделей: «корпускула» или «волна». Свет обладает *и* волновыми, *и* корпускулярными свойствами, но проявляет *либо* те, *либо* другие в зависимости от ситуации.

Такой же двойственностью, *корпускулярно-волновым дуализмом*, обладает, как выяснилось, не только свет. Спустя два года после объяснения фотоэффекта Эйнштейн показал, что непонятное поведение теплоемкости твердых тел при низких температурах легко объяснить, допустив, что колебания атомов ведут себя не только как звуковые волны, но и как частицы — *фононы*. А в 1927 году были экспериментально обнаружены *волновые* свойства у такой классической *частицы*, как электрон. В настоящее время нет сомнений в том, что волновые свойства присущи любой элементарной частице и вообще любому телу.

Корпускулярно-волновой дуализм — это всеобщее свойство материальных объектов, заключающееся в том, что поведение одного и того же объекта в разных ситуациях или в разных отношениях может описываться как моделью волны, так и моделью частицы или совокупности частиц.

5.5. Квантовые представления: соотношения неопределенностей

Классическая механика описывает мир как совокупность движущихся материальных точек. В электродинамике Максвелла появились концепции **поля** и **волны** — распространяющегося возмущения поля. Граница между частицами и волнами в электромагнитной картине мира была непреодолимой. Открытие корпускулярно-

волнового дуализма и установление его всеобщего характера потребовало теории, которая позволяла бы единым образом описывать как корпускулярные, так и волновые свойства объектов. Такая теория, *квантовая механика*, была создана в 20-е — 30-е гг. XX века. При этом появилось столько новых, непривычных представлений о фундаментальных свойствах материи и движения, что на их основе сформировалась новая, *неклассическая картина мира*.

Механический детерминизм основывался, среди прочего, на предположении, что начальное состояние системы в механическом смысле, то есть положение и скорость каждой из ее материальных точек, может быть установлено сколь угодно точно. Рассмотренные в пп. 5.2 и 5.3 аргументы указывают, что достичь необходимой точности измерений на практике невозможно. В квантовой механике показывается, что *точное и одновременное* измерение скорости и положения тела невозможно даже теоретически. Обнаруживший это В. Гейзенберг иллюстрировал свои выкладки **мысленным экспериментом**, который известен как «микроскоп Гейзенберга».

Пусть мы хотим измерить положение частицы. Для этого мы должны ее видеть, а для того, чтобы видеть объект, надо его осветить. Свет обладает волновыми свойствами и потому не позволяет рассмотреть подробности, более мелкие, чем длина волны. Так, в самый лучший оптический микроскоп невозможно увидеть отдельные атомы: их размеры не превышают 0,5 нанометра, а длины волн видимого света составляют от 400 до 700 нанометров.

Таким образом, для уточнения координат частицы необходимо ее освещать излучением со все меньшей длиной волны. Но при этом возникает другая неприятность. Свет ведь одновременно является и потоком фотонов. Чтобы частица стала видна, в нее должен попасть хотя бы один фотон, который неизбежно изменит скорость частицы. Поскольку с уменьшением длины волны энергия фотона растет, то чем точнее мы определяем координаты частицы, тем сильнее изменяется ее скорость в результате измерения. Математически это выражается знаменитым *соотношением неопределенностей Гейзенберга*:

$$\Delta x \Delta v \geq \hbar / m,$$

где Δx — погрешность в определении координаты частицы, Δv — погрешность определения ее скорости, $\hbar \approx 10^{-34}$ кг·м²/с — постоянная Планка, названная в честь М. Планка, который в 1900 г. впервые ввел понятие «квант», m — масса частицы. Мы не замечаем этих неопределенностей, поскольку они, благодаря малости постоянной Планка, существенны лишь для микрообъектов.

За простой формулой Гейзенберга скрыта довольно глубокая философия. Оказывается, измерение одной характеристики предмета (положения) *принципиально непредсказуемым образом* изменяет другие (скорость). Так уж устроена природа. Но тогда понятие «точных начальных условий движения частицы» оказывается мифом, не соответствующим реальности. Дело не в том, что их невозможно измерить, а в том, что, *поскольку их невозможно измерить, они не существуют!*

Таким образом, квантовая механика окончательно похоронила механический детерминизм, показав, что

в поведении материальных тел действительно присутствует принципиально неустранимый элемент случайности, который можно описать только вероятностными законами.

5.6. Принцип дополненности

Размышляя над философским смыслом результатов квантовой теории, Нильс Бор, которого Британская энциклопедия называет «вдохновителем» (*guiding spirit*) развития квантовой физики, в 1928 г. выдвинул *принцип дополненности*. В первоначальной формулировке принцип гласил: ввиду неотделимости свойств объекта от обстоятельств его взаимодействия с измерительным прибором (вспомните «микроскоп Гейзенберга»), *результаты, получаемые в разных экспериментах, не могут быть сведены в единую картину, но должны рассматриваться как взаимодополняющие* в том смысле, что все они необходимы для исчерпывающего описания объекта. Другими словами,

для полного описания объекта всегда требуется такой набор его характеристик, что измерение одних делает невозможным или неточным измерение других.

Принцип дополненности постепенно был принят большинством физиков и стал одной из основ современной научной картины мира, в которой признается *невозможность отделить мир от обзоревающего его наблюдателя*. Познающий субъект всегда оказывается активным, исследование реальности всегда сопровождается ее изменением, а результат исследования зависит от того, как оно выполнялось. Полное представление о свойствах объекта требует взгляда на него с несовместимых точек зрения, подобно тому, как стереоскопический эффект требует двух разных изображений одной и той же сцены.

5.7. Динамические и статистические теории

Одна из главных задач любой научной теории заключается в том, чтобы по заданному состоянию системы предсказать ее будущее или восстановить прошлое со-

стояние. Однако, поскольку состояние системы можно описывать по-разному, различается и характер предсказаний. В этом отношении все теории можно разделить на два класса: *динамические* и *статистические*.

В динамической теории состояние системы определяется значениями характеризующих ее физических величин. Соответственно,

динамическая теория позволяет предсказывать значения физических величин, характеризующих систему.

Исторически первая научная теория — классическая механика — динамическая. Она стала образцом, по которому кроились другие разделы классического естествознания: термодинамика, электродинамика, теория относительности, теория химического строения, систематика живых существ... Сформировалось убеждение, что динамические теории несут наиболее фундаментальное знание.

Теория, в которой состояние системы определяется заданием *вероятностей* тех или иных значений физических величин, относится к статистическим теориям.

Статистическая теория позволяет предсказывать лишь вероятности тех или иных значений физических величин, характеризующих систему.

Первые статистические теории стали возникать в XIX веке: молекулярно-кинетическая теория в физике, дарвиновская теория эволюции (основанная на представлениях о неопределенной, случайной изменчивости), менделевская генетика. Большинство же статистических теорий (например, квантовая механика) появились уже в XX веке. С ними в естествознание вошло фундаментальное понятие *флуктуации*.

Флуктуация — это случайное отклонение характеристик системы от наиболее вероятного или среднего значения.

Причины флуктуаций могут быть различными. Например, голубой цвет неба, в конечном счете, обусловлен тем, что количество молекул воздуха в заданном объеме не постоянно: оно все время колеблется вокруг среднего значения. Причина — беспорядочное тепловое движение молекул. Существуют флуктуации квантового происхождения. В биологии флуктуации скрываются за терминами «неопределенная изменчивость», «мутации»; здесь их основная причина — влияние множества неучитываемых факторов. Понятие флуктуации фактически используется и в общественном вознании, когда говорится о субъективных факторах общественных процессов, обсуждается роль личности в истории и т.д.

Динамические теории не учитывают (и не допускают возможности) флуктуаций; статистические — допускают, учитывают и даже выводят на передний план.

В классическом естествознании сложилось убеждение, что фундаментальное знание должно быть облечено в форму динамической теории — точной, однозначной, не допускающей никакой неопределенности. Первые статистические теории рассматривались лишь как приближения, допустимые временно, до разработки «строгих» методов. Однако в настоящее время преобладает представление, что

наиболее фундаментальными, то есть наиболее глубоко и полно описывающими реальность, являются статистические теории.

Самые убедительные аргументы в пользу этой концепции опираются на *принцип соответствия*.

Для каждой из фундаментальных физических теорий *динамического* типа существует *статистический* аналог, описывающий тот же круг явлений: для классической механики — квантовая механика, для термодинамики — статистическая механика, для электродинамики и специальной теории относительности — квантовая электродинамика...

С другой стороны, у ряда фундаментальных статистических теорий нет и не предвидится динамических аналогов. Такова, например, дарвиновская эволюционная теория. Изгнание из неё фактора случайности дает эволюционную теорию Ламарка, ошибочность которой сейчас не вызывает сомнений.

Еще существеннее, что в каждой из этих пар статистическая теория описывает более широкий круг явлений, дает более полное и подробное их описание. Например, в МКТ справедливы те же газовые законы Бойля-Мариотта, Шарля, Гей-Люссака, что и в термодинамике, однако кроме того она описывает еще вязкость, теплопроводность, диффузию, чего термодинамика не позволяет. С помощью квантовой механики можно, при желании, описывать движение макроскопических тел: после упрощений мы получим те же уравнения движения, что и в ньютоновской механике. Но поведение микрообъектов — например, электронов в атомах — можно описывать только квантовомеханически; попытки применить классическую механику дают бессмысленные и противоречивые результаты.

Динамическая теория всегда играет роль приближения, упрощения соответствующей статистической теории.

Статистическая теория рассматривает и учитывает флуктуации, случайные отклонения от среднего. Если ситуация такова, что эти отклонения несущественны, то,

пренебрегая ими, мы получим *приближенную* теорию, описывающую поведение средних значений — и эта теория будет уже динамической.

Например, если нас интересует давление воздуха на оконное стекло, то можно считать, что все молекулы движутся с одной скоростью. Отклонения в большую и в меньшую сторону взаимно компенсируются, когда удары мириадом молекул складываются в силу давления на стекло. Здесь применима термодинамика. Однако если нас интересует, с какой скоростью планеты теряют свои атмосферы, то статистический анализ флуктуаций становится необходимым, ибо в космос улечиваются самые быстрые молекулы, скорость которых превышает среднюю.

Можно сказать, что современное естествознание подтвердило правоту Эпикура: случайность заложена в основу основ мира, в котором мы живем, и потому познание этих основ возможно лишь с помощью законов вероятности.

5.8. Развитие науки: от динамики к статистике

Классическая механика и электродинамика — это *динамические теории*, для которых характерна однозначная связь между значениями физических величин, характеризующих исследуемую систему. Благодаря их успехам (прежде всего, механики) они рассматривались как образец построения любой научной теории вообще. Однако уже в XIX веке возникают первые *статистические теории* (молекулярно-кинетическая теория газов, дарвиновская теория эволюции), в которых однозначная причинно-следственная связь устанавливается не между самими величинами, характеризующими систему, а между *вероятностями* значений, принимаемых этими величинами.

Поначалу статистические теории рассматривались как трюк, прием, позволяющий найти приближенное решение задачи в условиях, когда мы либо не знаем всех факторов, влияющих на поведение природной системы, либо, в силу ограниченности своих возможностей, не в состоянии учесть эти факторы должным образом. Однако с течением времени появлялось все больше указаний на то, что применимость динамических теорий ограничена не техническими, а принципиальными причинами. Обнаружились простые системы (в том числе механические), точное предсказание поведения которых требует точности задания начальных условий, не достижимой никакими практическими средствами. В генетике появилось понятие мутации как принципиально случайного, непредсказуемого события — и, опираясь на этот постулат, генетика добивается в XX веке огромных успехов. В квантовой механике было установлено, что точное задание состояния физической системы в смысле механики или электродинамики невозможно даже теоретически (соотношения неоп-

ределенностей) — и тем самым выбита основная опора из-под концепции механического детерминизма. Согласно квантовой механике, вся доступная информация о состоянии системы заключена в ее *волновой функции*, но последняя позволяет рассчитать лишь *вероятность* тех или иных значений параметров системы. Таким образом, в неклассической картине мира тезис о фундаментальной роли динамических теорий окончательно дискредитируется.

В постнеклассический период развития естествознания постепенно становится понятно, что статистические закономерности не просто равноправны с динамическими, но более фундаментальны. Они точнее и детальнее отражают свойства реального мира. Более того, случайные флуктуации, хаос, предстают не как неизбежное зло, а как бесконечно мощный источник разнообразия, из которого рождаются все упорядоченные структуры Вселенной. Развитие, эволюция, возникновение нового осуществляется в момент выбора развивающейся системой одной из бесконечного спектра возможностей, предоставляемых ей игрой случайностей. Будущее в постнеклассической картине мира причинно связано с прошлым, но не предопределяется им, а лишь направляется.

Одним из важнейших источников случайности, непредсказуемости нашего мира является принципиальная невозможность отделить объект от его окружения. Чтобы предсказать будущее системы, мы должны ее изучить, но любое исследование оказывается неизбежно связанным с воздействием исследователя на изучаемый объект, причем воздействием неконтролируемым. Неконтролируемо и влияние на систему тепловых, квантовых или иных флуктуаций. Лишь в тех случаях, когда, в силу конкретных особенностей системы, влиянием на нее действий исследователя и флуктуаций можно пренебречь, становятся применимыми динамические закономерности и возможными — точные прогнозы.

Тема 6. Сущность и история эволюционной концепции в естествознании и культуре

6.1. Понятие и атрибуты эволюции

Современное естествознание отличается от классического прежде всего тем, что рассматривает мир сквозь призму *эволюционной концепции*.

Эволюционная концепция заключается в том, что нынешнее состояние природы и общества мыслится как результат предшествовавшего длительного естественного прогресса и как исходная точка для дальнейшей эволюции.

В XX в. выяснилось, что направленное развитие, *самоорганизация*, свойственно не только биологическим, но и физико-химическим системам. Более того, было обнаружено, что закономерности эволюционных процессов на разных уровнях организации природы имеют много общего. Сформировалось общенаучное понятие эволюции.

Эволюция — это обусловленное объективными законами природы **необратимое** развитие материальных объектов и их систем в направлении от простого к сложному, от хаотического и однородного состояния к упорядоченным структурам.

Таким образом, атрибутами понятия «эволюция» в естествознании служат

- во-первых, *самопроизвольность*;
- во-вторых, *необратимость*;
- в-третьих, *направленность*.

6.2. Возникновение представлений о развитии науки, общества и природы

Идея эволюции возникла лишь в Новое время, когда ускорение общественного и культурного развития достигло такой степени, что факт существования прогресса, представление о том, что в мире *может возникать, и возникает нечто новое и более совершенное*, стали доступны человеку на основе его личного опыта.

Вначале был замечен прогресс в человеческих знаниях. На рубеже XVI–XVII веков Ф. Бэкон и Р. Декарт предложили методы получения *новых* знаний, не сводящихся к древней мудрости. Это выглядело дерзко, поскольку в средневековой культуре преобладало представление о том, что всё доступное человеку знание *уже существует*, уже записано в Священном писании и других авторитетных источниках. Дело лишь за тем, чтобы это знание извлечь и представить в удобной форме. Однако в XVII в. был достиг-

нут невиданный ранее темп развития знаний о природе. После открытий Галилея, Ньютона, Гука (клеточное строение растений), Левенгука (микроорганизмы) и Гарвея (кровообращение), отрицать существование научного прогресса стало невозможно.

Следующей областью, в которой оформилась идея эволюции, были представления об обществе. XVIII век — век *Просвещения*, идейного течения, считавшего, что общество можно устроить на *новых*, разумных началах. Ж. А. Кондорсэ предпринял первую попытку установить закономерности *развития* истории, его основные этапы и движущие силы; сам же факт такого развития сомнений в конце XVIII века уже не вызывал.

В XIX веке эволюционная идея проникает в естествознание. В 1809 г. Жан Батист Ламарк в своей книге «Философия зоологии» впервые публично и недвусмысленно заявил, что все современные животные *возникли* путем совершенствования более примитивных форм. Однако, предложенный им *механизм* эволюции оказался неверным. Согласно Ламарку, эволюция происходит путем унаследования признаков, приобретенных предками *при их жизни*. Ошибочность таких представлений была понятна уже его современникам. Особенно энергично критиковал их Ж. Кювье. Однако тот же Кювье внес свой вклад в развитие эволюционной *идеи*, установив, что и животный мир, и сама поверхность Земли менялись на протяжении истории нашей планеты. Правда, единственной причиной этого он видел глобальные геологические катастрофы, которые, по его мнению, привели к вымиранию многих видов, известных нам сейчас только по ископаемым останкам.

Концепция *катастрофизма* Кювье, в свою очередь, была опровергнута английским геологом Ч. Лайелем. В классическом труде «Основы геологии» (1830—1833) он привел неопровержимые факты в пользу того, что геологические процессы идут с очень малой и примерно постоянной скоростью, а их впечатляющие результаты обусловлены невообразимой длительностью геологического времени. Вопрос о том, как понимать находимые при раскопках останки странных существ, вновь встал на повестку дня.

В 1859 году выходит одна из книг, изменивших мир, — «Происхождение видов» Чарлза Дарвина, который *предложил естественный механизм, обеспечивающий эволюцию*, совершенствование живых организмов, и доказал, что этот механизм существует и работает. Механизм имеет три компоненты: *изменчивость, естественный отбор и наследственность*.

В XX веке выяснилось, что естественное возникновение новых упорядоченных и высокоорганизованных структур, *самоорганизация*, происходит не только в мире

живого, но также в физических и химических системах. Оказалось, что в общем закономерности самоорганизации укладываются в дарвиновский механизм, если сформулировать его так, чтобы исключить чисто биологическую специфику.

- Во-первых, в природе имеется неисчерпаемый источник *случайных* изменений существующих форм. В физике и химии это *флуктуации*, в биологии — изменчивость и *мутации*.
- Во-вторых, имеется естественный и эффективный способ отбраковывать неудачные изменения. В физике и химии этот способ чаще всего называется отрицательной **обратной связью**, в биологии — естественным отбором.
- В-третьих, имеется механизм сохранения и размножения форм с удачными изменениями, которые избежали отбраковки. В физике принято называть его положительной **обратной связью**, в химии — **автокатализом**, в биологии — наследственностью.

В последней четверти **XX** века возникла гипотеза, что изложенный механизм самоорганизации применим и к процессам социального развития. Появилось новое научное направление — синергетика социальных процессов, ставшее составной частью программы исследований *универсального эволюционизма*.

6.3. Дарвинизм и антидарвинизм

Эволюционная идея, согласно которой живые организмы, их строение и отношения между собой являются результатом длительного исторического развития, образует фундамент всей современной биологии. В свою очередь, современный биологический эволюционизм сам возник в результате эволюции своей первоначальной формы — дарвиновской теории происхождения видов путем естественного отбора. Пройденный при этом путь научного познания был весьма извилист.

Довольно многие биологи, приняв общую идею эволюции, не признавали главенствующей роли естественного отбора, считая, что последнего либо вообще не существует, либо он не играет существенной роли. Поскольку в дарвинизме двигателем прогресса служит именно естественный отбор, отказ от его рассмотрения привел к необходимости найти какие-то другие движущие силы эволюции. Чаще всего для этого воскрешались идеи Ламарка.

Согласно *ламаркистской* концепции, каждый организм изменяется только в «полезном» направлении, причем «полезный» часто употреблялось в смысле «удовлетворяющий *осознанную* потребность». Сам Ламарк писал, что для видоизменения животного большое значение имеют его желания, привычки и усилия воли. Для объяснения направленности эволюции ламаркисты обычно принимали гипотезу о нали-

чий в организме некоей внутренней силы, которая вынуждает его изменяться в сторону совершенствования, повышения уровня организации.

Сторонники других недарвиновских эволюционных концепций считали, что изменение признаков, приводящее к возникновению новых видов, происходит резко, скачком. Так, современник Дарвина Майварт заявил, что естественный отбор не может объяснить начальных стадий возникновения полезных приспособлений, поскольку слабо выраженные изменения не могут быть полезными. Решение этой проблемы он видел в признании того, что новая форма живого приобретает все свои отличительные особенности *сразу, в законченном виде*. Ему вторил эмбриолог Кёлликер, считавший, что новые виды возникают, когда «живые существа производят из своих зачатков других, отличающихся от них». Время и обстоятельства таких событий, согласно Кёлликеру и Майварту, определяются некоей таинственной внутренней силой, толкающей эволюционный процесс.

В конце XIX века началось развитие генетики. Были переоткрыты законы Менделя, сформулировано основное положение о дискретном характере наследственности, введены понятия гена — неделимого «атома» наследственности — и мутации как элементарного, внезапного, качественного, устойчивого изменения единицы наследственности. Однако первые генетики не принимали дарвиновскую эволюционную концепцию («генетический антидарвинизм»). Впрочем, в равной мере не жаловали они и ламаркистов. Пионеры генетики полагали, что строгие и простые, свободные от умозрительных построений, проверяемые расчетом и беспристрастным экспериментом, законы генетики делают ее независимой от «устаревших» представлений и самодостаточной для решения любых биологических проблем, в том числе проблемы развития мира живых существ. Однако все попытки построить чисто генетическую теорию эволюции не увенчались успехом.

6.4. Синтетическая теория эволюции

Поворот от конфронтации между дарвинизмом и генетикой к их союзу знаменует работа С. С. Четверикова «О некоторых моментах эволюционного процесса с точки зрения современной генетики» (1926), в которой была показана прямая связь между мутационным процессом и эволюцией плодовой мушки дрозофилы — излюбленного объекта генетиков. Вслед за тем выходят фундаментальные работы Р. Фишера, Дж. Б. С. Холдейна, Н. П. Дубинина, Д. Д. Ромашова, С. Райта, в которых с использованием генетических законов и математических методов была поставлена задача о *микрорезультатах*, то есть об элементарных процессах видообразования, и получены первые результаты ее решения. Обобщение этих результатов и увязка их с достигну-

тыми успехами в понимании *макроэволюции* (эволюции, рассматриваемой в более крупном масштабе, чем изменение отдельного вида), выполненные Ф. Добжанским, Н. В. Тимофеевым-Ресовским, Дж. С. Хаксли, Э. Майром и И. И. Шмальгаузенем позволили, обогатив дарвиновское учение новыми идеями, создать *синтетическую теорию эволюции* (СТЭ).

Основные положения классической СТЭ таковы.

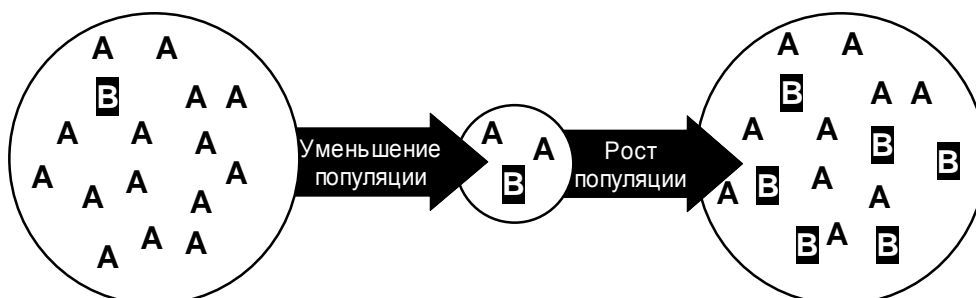
1. Каждый биологический вид имеет сложную **иерархическую** структуру. Основная структурная единица вида — *популяция*.

Популяция — совокупность особей одного вида, свободно скрещивающихся, населяющих определенное пространство с относительно однородными условиями обитания и отделенная от подобных групп той или иной формой изоляции.

2. Замкнутость и целостность вида поддерживаются его *репродуктивной изоляцией*: особи одного вида могут скрещиваться и давать потомство, особи разных видов — как правило, нет. При скрещивании происходит комбинирование генов родительских особей, благодаря чему внутри вида поддерживается общий поток генов. Новый ген, возникнув у отдельной особи, вливается в этот поток и может распространиться по всем популяциям и подвидам данного вида.

3. Генофонд вида постоянно пополняется новыми генами, возникающими в результате мутаций. *Отдельный* ген весьма устойчив к мутациям. Однако поскольку число генов у особи достаточно велико (десятки тысяч для не слишком примитивных организмов), вероятность того, что взятая наугад особь несет *какую-нибудь* мутацию, довольно высока.

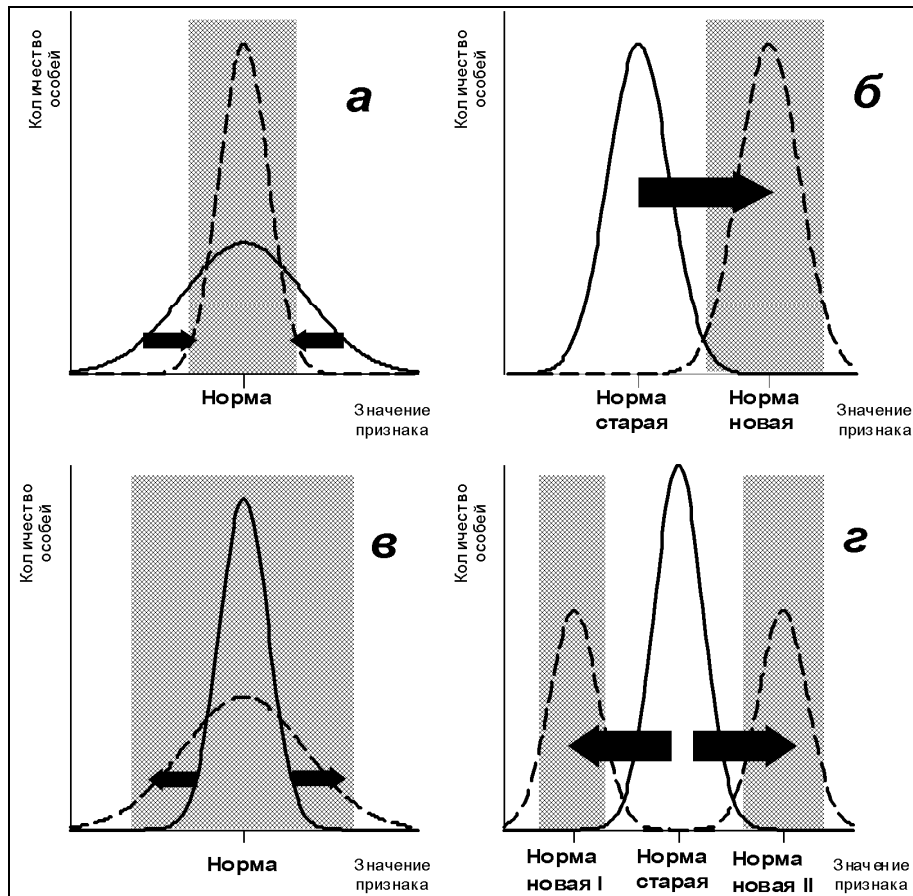
4. Помимо мутаций, генофонд популяции может изменяться также благодаря колебаниям численности особей, приводящим к *генетическому дрейфу*. В период резкого спада численности популяции те редкие мутации, которые *случайно* сохранились в генотипах выживших особей, становятся менее редкими, поскольку «растворены» теперь в значительно меньшей популяции. Когда же численность популяции начинает расти, пропорционально увеличивается и число носителей редких аллелей (см. рисунок).



5. Изменение генофонда вида благодаря мутациям и колебаниям численности — чисто случайный, ненаправленный процесс. Единственный направляющий фактор эволюции — естественный отбор.

6. Существуют различные формы отбора. В роли творческой силы эволюции выступают *движущий отбор*, вследствие изменения внешних условий поощряющий отклонения от нормы в определенном направлении, и *разрывающий (дизруптивный) отбор*, возникающий, когда отклонения от нормы как в одну, так и в другую сторону оказываются лучше приспособленными, чем особи со средними характеристиками. При этом возникают две или более отчетливо различающиеся формы внутри вида, которые постепенно превращаются в близкие, но все же разные виды.

Если же условия жизни неизменны, то *стабилизирующий отбор*, наоборот, отсекает отклонения от найденной в ходе эволюции оптимальной формы.



Действие различных форм отбора на распределение значений некоторого признака в популяции: **а** — стабилизирующий отбор; **б** — движущий; **в** — дестабилизирующий; **г** — разрывающий (дизруптивный). Штриховкой выделены диапазоны благоприятных для выживания особи значений признака.

7. *Наименьшая структурная единица живого, которая может эволюционировать, — популяция.* Это одно из наиболее существенных отличий СТЭ от классического дарвинизма: в качестве элементарного эволюционного процесса рассматривается изменение генного состава популяции. Изучением этого процесса занимается *популяционная генетика*.

8. Эволюция носит дивергентный характер («дивергенция» — расходимость). Это означает, что, в отличие от большинства *организмов*, каждый *вид* происходит от единственного предкового вида. Сам же он может стать предком нескольких разных видов.

Синтетическая теория эволюции сформировалась к середине XX века. Прошедшее с тех пор время стало свидетелем прогресса биологии и превращения ее в лидера современного естествознания. *Самые важные изменения в современной эволюционной теории связаны с успехами молекулярной биологии*, открывшей возможность изучения механизмов эволюции на атомно-молекулярном уровне. Например, ее методы позволяют *исследовать состав генофонда популяции непосредственно*, а не через анализ внешних признаков. Это многократно снизило трудоемкость экспериментального обоснования популяционной генетики и повысило надежность результатов. Далее рассказывается и о более важных достижениях современного биологического эволюционизма. Следует отметить, что они *не отменяют, а углубляют* дарвиновскую концепцию. В статье одного из основателей СТЭ Дж. Л. Стеббинса говорится: «Каким бы ни было новое [эволюционное] учение, которое родится в продолжающихся исследованиях и полемике, очень маловероятно, что мы откажемся от основных положений дарвинизма и теории, сформулированной в середине XX века. Синтетическая теория XXI века будет существенно отличаться от прежней, но появится она не внезапно, а путем эволюции».

6.5. ДНК, гены, белки

Носителем наследственной информации служат молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), находящиеся в *хромосомах* клеточного ядра. Каждая молекула ДНК представляет собой длинный полимер («поезд»), составленный из четырех *нуклеотидов* (четырёх типов «вагонов»), обозначаемых А, Т, Ц и Г. Точнее говоря, ДНК образуют два таких параллельных «поезда», связанных соотношением *комплементарности* (дополнительности): напротив нуклеотида А в одном «поезде» всегда стоит Т в другом, а напротив Ц — Г. Поэтому длину ДНК принято измерять в *парах нуклеотидов (пн)*.

Типичный *ген* представляет собой группу из нескольких тысяч *пн*, расположенных в определенном порядке. Порядок нуклеотидов в гене так же важен, как порядок букв в слове. Количество разных генов, в совокупности составляющих *геном*, колеблется от сотен у бактерий до десятков тысяч у высших растений и животных и, в общем, возрастает пропорционально сложности организма.

Смысл гена заключается в том, что он представляет собой записанное на «нуклеотидном» языке строение одного из необходимых для данного организма *белков*.

Белки — важнейший класс биохимических соединений. Они играют основную роль в построении и функционировании любого земного организма. С помощью *белков-ферментов* осуществляются почти все химические реакции, поддерживающие жизнедеятельность. Например, молекулы белка гемоглобина присоединяют кислород в легких и отдают его клеткам тела. Молекулы белков иммуноглобулинов участвуют в работе защитной системы организма, химически связываясь с проникшими в него чужеродными соединениями и микробами, и т.д. Белки, как и ДНК, являются природными полимерами, но собираются не из четырех нуклеотидов, а из двадцати *аминокислот*.

6.6. Генетический код и эволюция генов

Трансляция (термин, буквально означающий «перевод») с «нуклеотидного» языка генов на «аминокислотный» язык белков осуществляется с помощью *генетического кода*, который каждой тройке нуклеотидов гена (*кодону*) ставит в соответствие определенную аминокислоту в синтезируемом белке. Различных троек из четырех нуклеотидов существует, как нетрудно подсчитать, $4^3 = 64$, то есть больше, чем аминокислот. Поэтому одна и та же аминокислота может кодироваться различными тройками нуклеотидов.

Понятие о генетическом коде было введено в 1953 г. американским физиком русского происхождения Г. А. Гамовым, а полностью «шифровальная таблица природы» (см. рис.) была раскрыта М. У. Ниренбергом и Х. Г. Кораной в начале 1960-х гг.

Важнейший для эволюционной теории результат молекулярной генетики заключается в том, что

генетический код един для всех земных организмов
--

И вирусы, и бактерии, и клетки человеческого тела переводят с «нуклеотидного» на «аминокислотный» по одному и тому же словарю. Это очень веское свидетельство в пользу того, что всё живое на Земле произошло, в конечном счете, от одного общего предка путем дивергентной эволюции.

		Второй нуклеотид кодона					
		Т	Ц	А	Г		
П е р в ы й н у к л е о т и д	Т	Фен	Сер	Тир	Цис	Т Ц А Г	Т р е т и й н у к л е о т и д
	Фен	Сер	Тир	Цис			
	Лей	Сер	СТОП	СТОП			
	Лей	Сер	СТОП	Трп			
Ц	Лей	Про	Гис	Арг	Т	Т р е т и й н у к л е о т и д	
Лей	Про	Гис	Арг	Ц			
Лей	Про	Глн	Арг	А			
Лей	Про	Глн	Арг	Г			
А	Иле	Трп	Асн	Сер	Т	Т р е т и й н у к л е о т и д	
Иле	Трп	Асн	Сер	Ц			
Иле	Трп	Лиз	Арг	А			
Мет	Трп	Лиз	Арг	Г			
Г	Вал	Ала	Асп	Гли	Т	Т р е т и й н у к л е о т и д	
Вал	Ала	Асп	Гли	Ц			
Вал	Ала	Глу	Гли	А			
Вал	Ала	Глу	Гли	Г			

Таблица генетического кода. Аминокислоту серин (Сер) означают шесть разных кодонов (ТЦ..., АГТ и АГЦ), глицин (Гли) — четыре (ГГ...), а метионин (Мет) — один кодон АТГ. Три кодона (ТAA, ТАГ и ТГА) означают конец белковой молекулы.

Молекулярная генетика доказала, что в процессе эволюции не только мутируют, видоизменяются имеющиеся гены, но и возникают новые, о чем свидетельствует хотя бы увеличение их числа от одноклеточных к высшим организмам. Это подтверждает, что эволюция — действительно процесс постоянного созидания нового, не существовавшего ранее, а не развертывание некоей изначально заложенной в живые существа программы.

В общих чертах стал понятен процесс возникновения новых генов. Чаще всего новый сложный ген формируется по принципу увеличения размеров или умножения числа существующих более простых генов с последующим их изменением в результате мутаций.

Например, ген коллагена (белка, образующего кости, хрящи, кожу) у цыплят состоит примерно из **38** тысяч пн. В этом гене можно выделить примерно **50** «говорящих» фрагментов — экзонов, каждый из которых представляет собой серию повторов одной и той же последовательности: ГГЦ ЦЦТ ЦЦТ. Анализ этих повторов по-

зволюил с большой степенью уверенности восстановить эволюционную историю гена. Она началась с указанного 9-нуклеотидного фрагмента. В результате пятикратного его повторения образовался экзон из 54 пн (повторение происходит благодаря случайным сбоям во время процесса образования половых клеток). Повторение было не совсем точным, или его исказили позднейшие мутации, так что среди этих 9-нуклеотидных кусочков сейчас есть и ГГГ ТТТ ЦАА, и ГГТ ГТТ ЦЦТ... В дальнейшем основной 54-нуклеотидный экзон был повторен примерно 50 раз, пока ген не достиг современных размеров.

6.7. Молекулярная археология

Развитие молекулярно-генетических исследований привело к осознанию того, что *наиболее полным и хорошо сохранившимся свидетелем эволюционной истории является генетическая информация*, имеющаяся в каждой клетке каждого живого существа.

Степень эволюционной близости организмов объективнее всего можно оценить по размеру совпадающей части их геномов. Например, близкородственность человека и шимпанзе очевидно вытекает из того факта, что геномы этих двух видов различаются всего на 1,1%. Сравнительная молекулярная генетика позволяет не только установить степень родства между видами, но и оценить, как давно разошлись их эволюционные пути. Дело в том, что *скорость эволюции данного гена или белка примерно постоянна в течение длительных промежутков времени и примерно одинакова у разных видов*. Таким образом, эволюционные изменения на молекулярном уровне играют роль «молекулярных часов» эволюции.

Активно развиваются поиски ДНК, содержащейся в останках древних организмов («молекулярная археология»). Ее исследование позволяет точнее, чем по строению костей, зубов и другим внешним признакам, определить степень родства с другими организмами, вымершими и современными. Кроме того, такие находки позволяют проградировать «молекулярные часы». Основная сложность заключается в том, что молекулы ДНК достаточно хрупки и способны химически разлагаться. Поэтому их сохранение в течение длительного времени возможно только в особых условиях, например, если после смерти организм был погребен в бескислородных условиях или во льду. Тем не менее, в распоряжении ученых уже находятся образцы ДНК человека, утонувшего во флоридском болоте 7 тысяч лет назад, мумии египетского жреца возрастом 4000 лет, 40-тысячелетнего мамонта, двух неандертальцев...

Тема 7. Универсальный эволюционизм как исследовательская программа современности

7.1. Второй закон термодинамики. Энтропия

Направленность времени

В середине XIX века был открыт *второй закон (второе начало) термодинамики*, который определяет общее направление процессов в нашем мире. Среди других физических законов он стоит особняком. Наиболее фундаментальные законы физики — это, как правило, *законы сохранения* той или иной физической величины (энергии, импульса и т.д.). Сохранение, постоянство чего-либо означает эквивалентность прошлого и будущего, их полную симметричность, отсутствие у времени направленности. Второй же закон термодинамики можно сформулировать как утверждение о *невозможности сохранения* определенной физической величины (см. п. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**):

Существует физическая величина — *энтропия*, — которая в замкнутой системе с течением времени может лишь увеличиваться.

Этого утверждения, ничего пока не говорящего о том, что такое энтропия, уже достаточно, чтобы признать прошлое и будущее физически различными. Поэтому

второй закон термодинамики можно рассматривать как физическое утверждение о направленности времени.

Понятие энтропии, как и неразрывно связанное с ним второе начало термодинамики, имеет чрезвычайно много граней.

Энтропия как измеряемая физическая величина

Энтропия не есть некое расплывчатое общепhilosophическое понятие. Нет, это физическая величина, поддающаяся точному измерению и вычислению. Р. Клаузиус, который ввел понятие энтропии, определил ее следующим образом. Пусть некоторому телу сообщили количество теплоты Q при температуре T (отсчитываемой от абсолютного нуля). Тогда энтропия тела S возрастет минимум на

$$dS = Q/T.$$

Отношение Q/T несложно измерить. Приборы для измерения количества теплоты, калориметры, имелись и во времена Клаузиуса; приборы для измерения температуры окружают нас в быту.

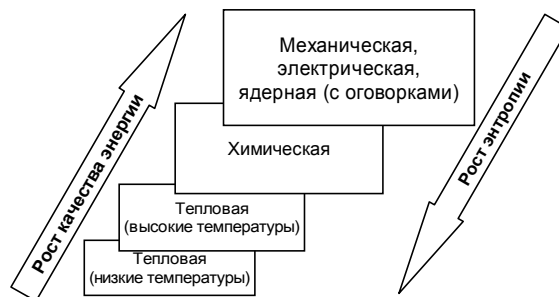
Энтропия как мера некачественности энергии

Первый закон термодинамики — закон сохранения энергии — похож на бухгалтера, который сводит баланс, не вмешиваясь в решения, принимаемые хозяином фирмы и не оценивая их с точки зрения, так сказать, качества капитала. Однако каждый понимает, что обменять деньги на эквивалентное количество, скажем, старых калош довольно легко, а вот обратная операция потребует усилий и вряд ли обойдется без финансовых потерь. Хотя стоимость калош может быть эквивалентна потраченной сумме, такой качественный показатель, как ликвидность, у них гораздо ниже, чем у денег.

Разные формы энергии также обладают разным качеством.

О качестве энергии легче всего судить по легкости ее превращения в другие формы. Не представляет проблемы, например, превращение энергии электрического тока в равное количество тепловой энергии. Для этого достаточно взять утюг или кипятильник и воткнуть вилку в розетку. Обратная задача — превратить тепловую энергию в электрическую — гораздо сложнее. Для этого нужна сложная и дорогая тепловая электростанция, и все равно она сможет превратить в электроэнергию не больше 40% энергии сгорания топлива. И дело не в нерадивости инженеров, проектировавших станцию, а в том, что сама природа не позволяет добиться большего. Просто тепловая энергия — это энергия, менее качественная, менее «ликвидная», чем электрическая.

Можно выстроить **иерархию** различных форм энергии по ее качеству. На верхних ступенях, кроме электрической, находится, например, механическая энергия. Чуть ниже по качеству химическая энергия, заключенная, например, в бензине или в аккумуляторах. *Самым низким качеством обладает энергия тепловая, причем качество ее тем ниже, чем ниже температура тела.*



Открытие энтропии дало возможность от общих рассуждений о качестве энергии перейти к его точной количественной характеристике. Установлено, что если система обладает запасом энергии U , то в полезную работу можно превратить не весь этот запас, а лишь его часть, которая называется *свободной энергией*:

$$F = U - TS.$$

Свободную энергию F и следует считать *мерой качества* энергетического запаса системы. Видно, что она тем меньше, чем больше энтропия S . Поэтому

энтропия системы является мерой некачественности ее энергетического запаса.

С учетом этого закон возрастания энтропии можно сформулировать так:

энергетический запас замкнутой системы, оставаясь неизменным количественно, с течением времени неуклонно ухудшается качественно.

Энергетические проблемы цивилизации заключаются не в том, чтобы найти источник энергии для удовлетворения потребностей человека, а том, чтобы найти источник энергии *высококачественной*. Иначе мы могли бы буквально черпать энергию из океана. Достаточно ежегодно охлаждать воды океана всего лишь на $0,0002^\circ\text{C}$, чтобы полностью покрыть все современные энергетические потребности человечества, составляющие около 10^{21} джоулей в год. Идея, однако, неосуществима: запасы энергии океана действительно огромны, но его *свободная* энергия, которую можно превратить в полезную работу, очень низка из-за высокой энтропии. Поэтому строительство дорогих и экологически грязных электростанций оказывается, в конечном счете, гораздо выгоднее.

Микроскопический смысл энтропии

Глубокое понимание сущности энтропии невозможно без выяснения того, что же она представляет собой *микроскопически*, с точки зрения движения молекул. Исследование этого вопроса было предпринято Л. Больцманом. Главный его результат заключается в короткой формуле, которую он завещал выбить на своем надгробии. В современных обозначениях она записывается следующим образом:

$$S = k \ln W,$$

где S — энтропия системы молекул, k — коэффициент пропорциональности (постоянная Больцмана), W — *статистический вес* данного макроскопического состояния системы, \ln — натуральный логарифм. Чем больше W , тем больше $\ln W$ и тем больше энтропия S .

Статистический вес — это число способов, которым можно реализовать данное макроскопическое состояние системы.

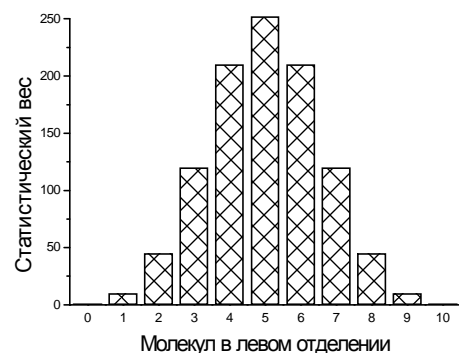
Пояснить определение статистического веса можно на примере ящика с двумя одинаковыми отделениями, между которыми имеется перегородка с небольшим от-

верстием. Начнем заполнять ящик молекулами. Для определенности будем считать, что всего в нашем распоряжении $N = 10$ молекул.

Макроскопическое состояние системы задается числом молекул в каждом отделении — например, 4|6.

Способы, «которыми можно реализовать данное состояние системы», отличаются друг от друга тем, *какие именно* молекулы попали в левое отделение. Представим, что все 10 молекул пронумерованы. Состояние 4|6 можно получить, поместив в левое отделение молекулы номер 1, 2, 3 и 4. А можно — 1, 3, 5, 7 или 7, 8, 9 и 10.

Наименьший статистический вес $W=1$ имеют состояния 0|10 и 10|0, поскольку есть лишь один способ поместить все молекулы в правое (левое) отделения. Статистический вес состояния 1|9 равен 10 (поскольку одну молекулу, помещаемую в левое отделение, можно выбрать из всех имеющихся десятью способами), состояния 2|8 (и состояния 8|2) — 45. Максимальным статистическим весом, равным 252, обладает состояние 5|5, в котором молекул в отделениях поровну.



Поместим все десять молекул в левое отделение и закроем ящик. Молекулы в нем будут беспорядочно двигаться, сталкиваться друг с другом и со стенками, время от времени проскакивая через отверстие из одного отделения в другое. Можно ли ожидать, что, открыв через некоторое время ящик, мы опять обнаружим все десять молекул в одном отделении? Здравый смысл и интуиция подсказывают, что вряд ли — вероятнее всего, мы увидим состояние 5|5. Но наиболее вероятное состояние 5|5 — это состояние с наибольшим статистическим весом, а значит, и энтропией. Таким образом, чем больше вероятность состояния, в котором находится система, тем больше ее энтропия.

Энтропия является мерой вероятности обнаружить систему в данном состоянии.

Отсюда еще одна формулировка закона возрастания энтропии:

с течением времени замкнутая система самопроизвольно переходит из менее вероятных в более вероятные состояния.

Энтропия как мера неупорядоченности

Какое из состояний рассмотренной нами простейшей системы, состоящей из ящика с двумя отделениями и десяти молекул в нем, можно назвать более упорядоченным: однородное состояние $5|5$ или предельно неоднородное $0|10$?

Понятие *упорядоченности* тесно связано с понятием *структуры*, а структура требует *неоднородности*. Английский парк более упорядочен, чем естественная роща тех же размеров, поскольку имеет более четко выраженную структуру: дорожки, кусты, деревья. При этом растения каждого вида высаживаются только на определенных участках, а в других местах парка вы их не найдете. В библиотеке порядок, если книги по полкам распределены неоднородно: на этой полке — только книги по истории, а на той — только по химии, и т.д. *Более однородное состояние является менее упорядоченным*. Но энтропия системы максимальна именно для ее однородного состояния. Таким образом, мы приходим к пониманию еще одного свойства энтропии:

энтропия системы есть мера неупорядоченности состояния,
в котором находится система.

Связанная формулировка второго закона термодинамики гласит:

с течением времени степень упорядоченности замкнутой системы
неизбежно понижается, а имеющиеся в ней структуры разрушаются.

Энтропия и информация

Обратимся еще раз к модели ящика с двумя отделениями: в каком случае мы знаем о системе больше — когда она находится в состоянии $0|10$ или $5|5$? Очевидно, в первом: про *каждую* молекулу мы можем точно сказать, в каком она отделении — в правом. Если же система находится в состоянии $5|5$, то интересующая нас конкретная молекула может с равной вероятностью быть в любом отделении.

Для остальных состояний количество доступной информации о системе будет промежуточным между этими двумя крайними случаями. Например, если нам известно, что состояние системы есть $8|2$, то на вопрос «где находится молекула №1?» можно ответить, что с вероятностью $0,8$ она в левом отделении — а это означает, что мы знаем больше, чем ничего. Прослеживается четкая связь: чем меньше статистический вес состояния системы, то есть чем меньше энтропия, тем определеннее наши знания о системе.

Энтропия системы есть мера отсутствия информации
о ее внутреннем устройстве.

Поэтому, в силу закона возрастания энтропии:

количество доступной о замкнутой системе информации с течением времени уменьшается.

Одна из основных дисциплин, определяющих лицо современной науки и технологии, — это теория информации. Она выросла из работ К. Шеннона, опубликованных в 1948—1949 гг., где он дал четкое определение «количества информации», определив количество полученной системой информации DI как понижение ее энтропии в результате приема сообщения:

$$DI = -DS.$$

Это определение, основанное на понимании энтропии как меры отсутствия информации, оказалось чрезвычайно плодотворным и представляет собой теоретическую основу всех современных технологий передачи, хранения и обработки информации.

7.2. Основной парадокс эволюционной картины мира

Если попытаться передать общий смысл всех формулировок второго закона термодинамики, получится примерно следующее:

Неизбежным результатом любых процессов в замкнутой системе является сглаживание неоднородностей, разрушение упорядоченных структур, понижение сложности устройства системы и качества запасенной в ней энергии.

Другими словами, термодинамика утверждает, что

в мировых процессах преобладает тенденция к деградации.

С другой стороны, по дарвиновскому учению, с течением времени закономерно возникают все более сложные и высокоорганизованные системы — живые организмы. Учение обосновано фактами и логикой и является основой самого способа мышления в биологии. Правова и Дарвина, и Клаузиуса — каждого по отдельности — подтверждается всей совокупностью научных знаний. И вместе с тем эволюционное учение и второй закон термодинамики кажутся противоречащими друг другу, взаимоисключающими. В этом заключается *основной парадокс эволюционной картины мира*.

На самом же деле парадокса, понимаемого как противоречие между *буквой* закона возрастания энтропии и закона биологической эволюции, не существует.

Дело в том, что второй закон термодинамики в своем буквальном смысле установлен для замкнутых систем. Однако ни один живой организм или сообщество организмов принципиально не может рассматриваться как замкнутая система.

Атрибутом жизни служит непрерывный обмен веществами и энергией с окружающей средой.

Это справедливо и для любого сообщества живых существ. *Замкнутые* экологические системы космических кораблей, которые часто описываются в фантастических романах, на самом деле не могут существовать бесконечно долго. Если лишить их подпитки от внешнего источника, они, в соответствии с термодинамикой, деградируют. Вопрос лишь в том, насколько растянется этот процесс деградации.

7.3. Синергетика — теория самоорганизации

Итак, термодинамика не запрещает эволюционных явлений. Но она ничего не говорит о том, насколько неизбежна *самоорганизация* в природных системах и каким закономерностям должна подчиняться.

Под самоорганизацией понимается самопроизвольное возникновение сложных упорядоченных структур в силу объективных законов природы и общества.

Законы самоорганизации изучает *синергетика*.

Синергетика — междисциплинарное направление научных исследований, предметом которого являются общие закономерности самоорганизации в природных и социальных системах.

Термин «синергетика» происходит от греческого слова «*synergetikos*» — совместно, согласованно действующий. Предложивший его Г. Хакен считал, что главной особенностью процесса самоорганизации в любой системе является возникновение согласованного, кооперативного поведения большого числа ее элементарных подсистем.

Синергетика рассматривает системы самой разнообразной природы, процессы самоорганизации в которых, как выяснилось, описываются одними и теми же математическими моделями и, следовательно, подчиняются универсальным закономерностям.

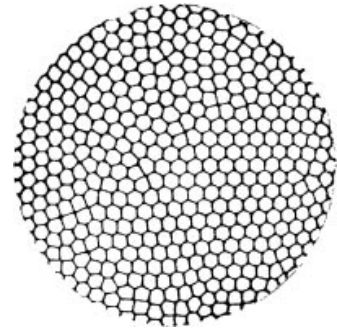
Примеры самоорганизации: ячейки Бенара

В 1900 г. появилась статья французского физика Бенара, изучавшего теплоперенос в жидкости. Бенар наливал спермацетовое масло в сосуд, подогреваемый снизу. Характер переноса тепла между верхним и нижним слоями жидкости зависит от интенсивности нагрева, который определяет разность температур между ними, ΔT .

При слабом нагреве сама жидкость неподвижна, переносится лишь тепловая энергия за счет *теплопроводности*. По мере повышения интенсивности нагрева (увеличения ΔT) все большую роль начинает играть *конвекция*: нагретая жидкость расширяет-

ся, становится более легкой и стремится всплыть вверх. На смену опускаются более холодные и плотные слои. Однако это происходит спорадически: восходящие потоки возникают то в одном месте, то в другом и существуют недолго. Конвекция идет беспорядочно.

Когда разность температур DT достигает некоторого критического значения, картина принципиально изменяется. Весь объем жидкости разделяется на одинаковые ячейки, в каждой из которых происходит уже *незатухающее* конвекционное движение частиц жидкости по замкнутым траекториям. В условиях опыта Бенара конвекционные ячейки имели форму почти правильных шестиугольников, так что приводимые в его статье фотографии показывают эффектную структуру, очень похожую на пчелиные соты. В центре каждой ячейки нагретая жидкость поднималась снизу вверх, а вдоль границ ячеек — опускалась сверху вниз.



Для того чтобы объяснить открытие Бенара само по себе, не нужна особая новая наука. В 1916 году английский физик лорд Рэлей показал, что необходимость образования ячеек Бенара, когда разность температур DT достигает критического значения DT_c (зависящего от свойств жидкости и толщины ее слоя), следует из уравнений гидродинамики, известных с начала XIX века.

Образованием конвективных ячеек процессы самоорганизации в подогреваемой снизу жидкости не заканчиваются. При достижении критической разности температур $DT_1 > DT_c$ ячейки Бенара начинают колебаться с определенной частотой. При этом периодически меняется и температура жидкости в них.

Однако и периодические колебания системы ячеек Бенара — еще не конец истории. С дальнейшим ростом DT частота колебаний ячеек растет. При достижении нового порога, DT_2 , возникают колебания на новой частоте. Поведение системы остается предсказуемым, однако более сложным, чем для одночастотного колебания. Продолжение роста DT приводит к появлению новых частот, пока, наконец, при некоторой $DT = DT_*$ их не становится бесконечно много. Но сумма бесконечного числа колебаний с разными частотами дает полностью *хаотичное* движение! Описанный сценарий универсален и свойствен столь различным жидкостям, как ртуть и жидкий гелий. Конвективные ячейки обнаружены в фотосфере Солнца (*солнечная грануляция*) и в мантии Земли.

Примеры самоорганизации: реакция Белоусова-Жаботинского

В 1951 г. Б. П. Белоусов, изучая простую реакцию между броматом калия и лимонной кислотой в присутствии катализатора, обнаружил, что она идет не как обычные реакции. Окраска реакционной смеси изменялась от бесцветной до желтой — и обратно! Белоусов наблюдал несколько десятков периодов колебаний. В открытие не сразу поверили, поскольку это была первая открытая реакция, которая в однородной смеси сама по себе идет в колебательном режиме.

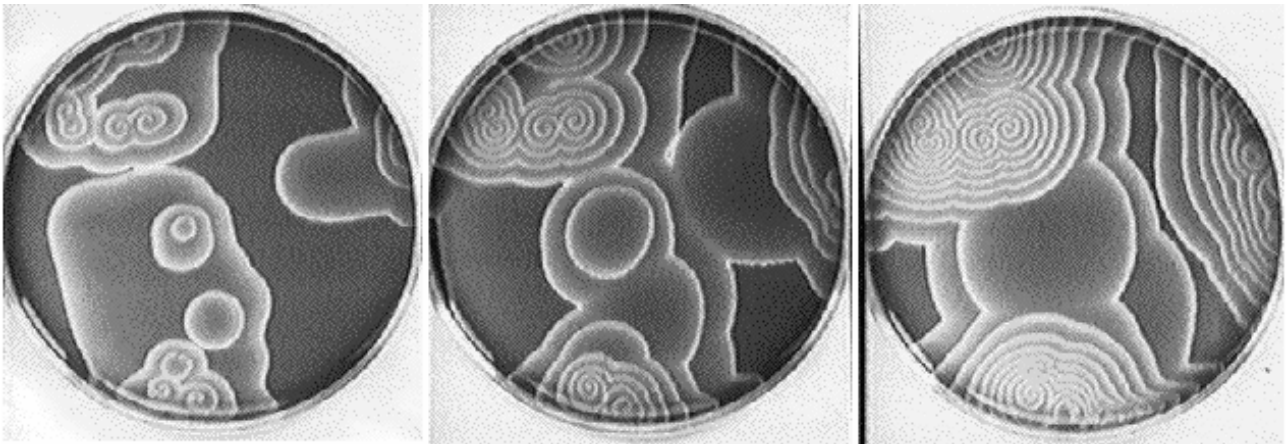
Аналогично явлению Бенара, реакция Белоусова не стала фундаментальным химическим открытием, то есть таким, которое заставляет создавать новую теорию. А. М. Жаботинский показал, что колебательный режим реакции допускается обычными уравнениями химической кинетики, если хотя бы одна из промежуточных стадий реакции является автокаталитической, то есть если какой-то из ее продуктов ее же ускоряет.

Значение открытия Белоусова-Жаботинского заключается в том, что оно продемонстрировало самоорганизацию в простейшей химической системе. Периодичность — один из видов упорядоченности. Спонтанные химические колебания — это упорядоченная структура, неоднородность, только не в пространстве, а во времени.

В 1970 г. Жаботинский и Заикин обнаружили, что в системе Белоусова-Жаботинского возможна не только временная, но и пространственная самоорганизация. Они отказались от традиционного перемешивания раствора и просто налили его тонким слоем в чашку Петри. Оказалось, что реакция не идет синхронно по всей чашке. Изменение окраски сначала происходит в какой-то одной точке — так называемом ведущем центре, от которого затем распространяется во все стороны. Форма линии раздела между областями, окрашенными по-разному, представляет собой фрагмент спирали. Формируется *спиральная волна*, вращающаяся вокруг ведущего центра со скоростью порядка одного оборота за несколько минут.

Тем временем в объеме раствора могут возникнуть еще несколько ведущих центров, вокруг каждого из которых формируется своя спиральная волна. Периоды разных ведущих центров несколько отличаются друг от друга. Благодаря этому наблюдается еще одно замечательное явление — *синхронизация*. Дело в том, что при столкновении двух спиральных волн они не проходят друг сквозь друга, как обычные волны на поверхности жидкости, а взаимно аннигилируют (уничтожаются), причем аннигиляция в большей степени затрагивает более медленную из них. В результате фронт более быстрой спиральной волны постепенно продвигается в сторону

ведущего центра, порождающего медленную волну, уничтожает его и устанавливает единую частоту колебаний во всем объеме (явление синхронизации).



Спиральные волны — распространенная форма самоорганизации в системах различной природы. Они наблюдаются, например, при образовании колоний коллективных микроорганизмов. Сложный характер сокращений сердечной мышцы обусловлен тем, что по ней безостановочно бежит спиральная волна возбуждения.

7.4. Необходимые условия самоорганизации

Одно из главных достижений синергетики — выяснение условий, выполнение которых необходимо для начала самоорганизации в системе любой природы. Подчеркнем, что эти условия — *необходимые*, то есть, если хотя бы одно из них не выполнено, никаких упорядоченных структур в системе не возникнет наверняка. К сожалению, до сих пор неизвестны универсальные *достаточные* условия самоорганизации.

Система должна быть неравновесной

Основным признаком неравновесности является протекание сквозь систему *потоков* энергии и вещества. Так, кухня, в которой на плите стоит только что вскипевший чайник, — неравновесная система, поскольку между чайником и окружающим воздухом возникает направленный поток тепловой энергии, и чайник остывает. Однако когда температура чайника сравняется с температурой окружающего воздуха, равновесие все еще не будет достигнуто. Дело в том, что концентрация воды в чайнике больше концентрации водяного пара в воздухе, что приводит к направленному потоку молекул воды из чайника. Через несколько дней вся вода из чайника испарится и можно будет считать состояние равновесия достигнутым.

Для всех рассмотренных выше систем это условие выполняется. Ячейки Бенара возникают в условиях протекания сквозь жидкость теплового потока. В системе Белоусова-Жаботинского имеются химические потоки вещества. Между живыми орга-

низмами и окружающей средой постоянно текут потоки веществ и энергии, что является доказательством их неравновесности.

Неравновесная система может быть и замкнутой, не сообщаемой с внешним миром. Например, не исключено, что наша Вселенная — изолированная система. Но масштабы ее таковы, что время, необходимое для ее перехода в равновесное состояние, астрономически велико. Другим примером систем, которые и в изолированном состоянии способны чрезвычайно долго удерживаться вдали от равновесия, являются стёкла любой природы. Однако чаще всего длительное поддержание системы в неравновесном (тем более, сильно неравновесном, см. ниже) состоянии требует, чтобы она была незамкнутой, открытой, проточной.

*Система должна быть **сильно** неравновесной*

Физическая теория неравновесных систем, *неравновесная термодинамика*, начала развиваться в середине XIX века, однако в течение почти ста лет в ней считалось, что все процессы в таких системах приводят лишь к *разрушению* структур, сглаживанию неоднородностей. Лишь в середине XX века стало понятно, что это справедливо только для слабо неравновесных систем, а при сильном отклонении от равновесия неоднородности могут и *возникать*.

Все живые организмы сильно неравновесны. Ячейки Бенара возникают только при достаточно большом перепаде температур ΔT . Реакция Белоусова-Жаботинского входит в колебательный режим лишь при достаточно высоких концентрациях реагентов.

Система должна быть нелинейной

Термодинамику слабо неравновесных систем называют еще *линейной*. Тогда теория *сильно* неравновесных структур должна быть *нелинейной*. Формальное определение гласит:

Нелинейной называется система, поведение которой описывается нелинейными математическими уравнениями.

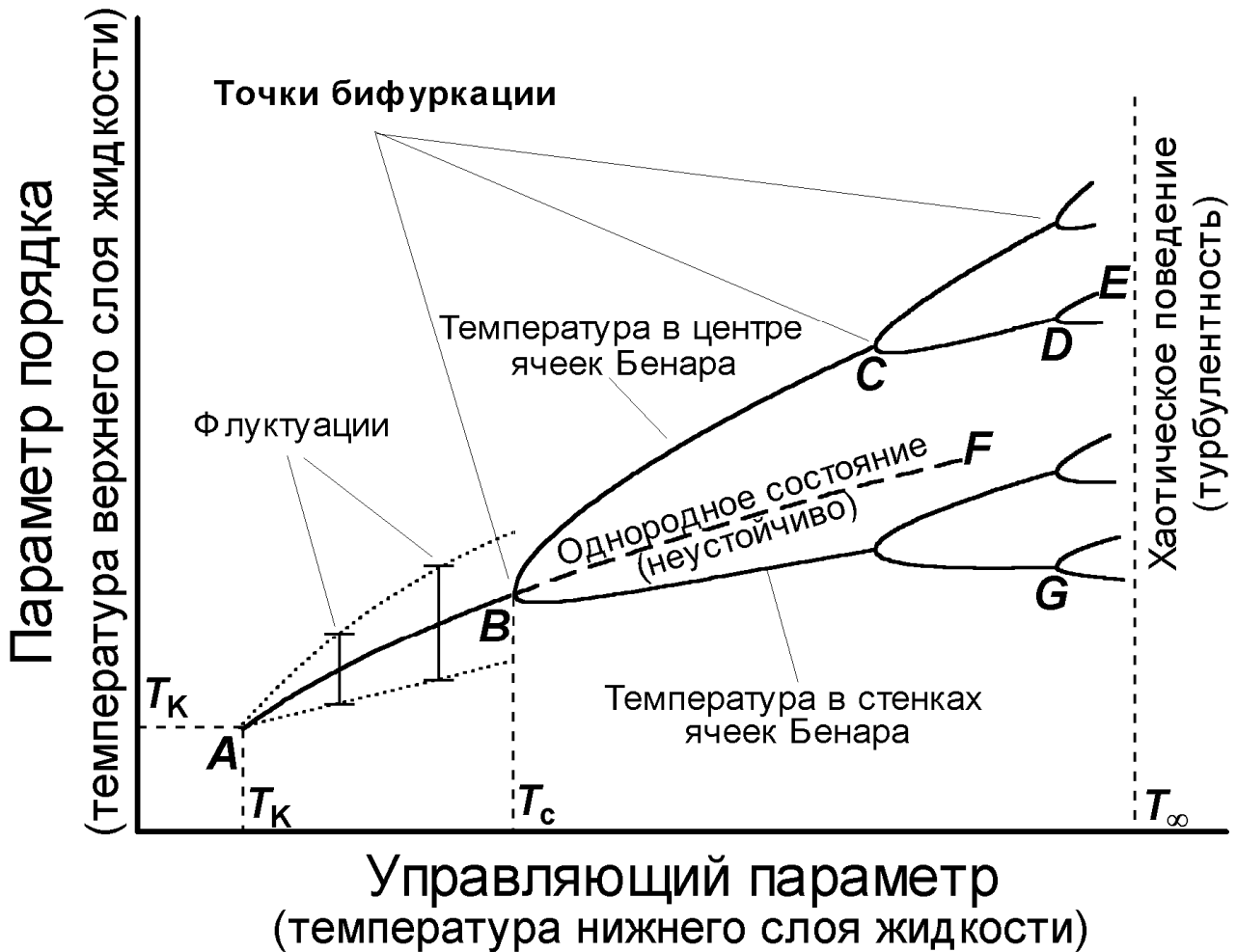
В линейное уравнение неизвестные входят только в первой степени. Как только в уравнении появляется квадрат, куб или какая-то функция от неизвестной, или произведение неизвестных, оно сразу становится нелинейным. Линейные уравнения проще решать, и потому классическое естествознание интересовалось, главным образом, линейными системами. Казалось, что фундаментальное обязательно должно быть простым. Но это не так: *современное естествознание — нелинейное*.

Нелинейные системы способны *качественно* изменять свое поведение при *количественном* изменении воздействия.
 Другими словами, нелинейные системы — это системы *сложные*.

Речь тут идет не столько о сложности законов, управляющих поведением системы, сколько о сложности возникающего под их действием поведения.

7.5. Основные закономерности самоорганизации

Все явления самоорганизации, рассматриваемые синергетикой, подчиняются универсальным закономерностям.



Бифуркационная диаграмма для ячеек Бенара

Поведение системы, в которой происходит самоорганизация, удобно рассматривать с помощью *бифуркационной диаграммы*. По оси абсцисс диаграммы откладывается значение *управляющего параметра*, который характеризует воздействие, выводящее систему из равновесного состояния, а по оси ординат — *параметр порядка*, описывающий состояние системы и чувствительный к возникновению в ней структуры.

Для системы Бенара в качестве управляющего параметра можно использовать температуру нижнего слоя жидкости, которая растет с увеличением интенсивности

нагрева, а в качестве параметра порядка — температуру верхнего слоя жидкости (см. рисунок).

Диаграмма начинается в точке **A**, соответствующей отсутствию нагрева. При этом температуры нижнего и верхнего слоев одинаковы и равны комнатной температуре T_k . По мере усиления нагрева температура верхнего слоя растет медленнее, чем нижнего, поскольку верхний слой контактирует с холодным воздухом. Поэтому участок **AB** бифуркационной диаграммы представляет собой кривую, наклон которой плавно уменьшается.

Пороговый характер самоорганизации

Упорядоченная структура возникает по *пороговому* механизму, внезапно.

Можно было бы вообразить сценарий, по которому зачатки ячеек Бенара, пусть не очень четко выраженные, возникают уже при слабом нагреве, а с увеличением его интенсивности постепенно «дозревают». Природа, однако, устроена так, что до определенной, пороговой, силы нагрева никаких ячеек нет в принципе, а по достижении порога конвекционные ячейки возникают почти мгновенно.

Бифуркационный сценарий самоорганизации

Чаще всего возникновение новых упорядоченных структур происходит по *бифуркационному* сценарию.

Бифуркация — математический термин, означающий ветвление решения уравнений, описывающих систему. Физически это ветвление соответствует разделению однородной системы на области разных типов.

Так, участок **AB** диаграммы фактически представляет собой график решения Рэлея задачи Бенара. По заданной температуре нижнего слоя он позволяет определить температуру верхнего слоя жидкости. Пока температура ниже критического значения T_c , это решение единственно. Однако при $T = T_c$ возникают две новых ветви решений. Верхняя описывает температуру в центре возникших ячеек, где нагретая жидкость поднимается, а нижняя — в стенках ячеек, где охладившаяся жидкость опускается. Точка **B**, где возникает характерная «вилка», и называется точкой бифуркации.

При дальнейшем изменении управляющего параметра возможны новые бифуркации, означающие появление в системе новых типов упорядоченности. Для системы Бенара эти бифуркации связаны с возникновением все более сложных колебаний системы конвекционных ячеек, как обсуждалось ранее.

Точки бифуркации — спутники любой эволюционирующей системы. Загляните в любой учебник биологии: *филогенетическое дерево*, изображающее историю разви-

тия жизни на Земле, имеет вид типичной бифуркационной диаграммы. Историки также давно заметили, что в развитии общества чередуются сравнительно спокойные периоды постепенных изменений со временами социальных потрясений и революций, когда за исторически ничтожный срок теряют устойчивость и распадаются традиционные социальные институты и возникают новые формы общественной организации.

Порядок из хаоса

В окрестности точки бифуркации резко возрастают величина и продолжительность существования флуктуаций.

Кривая **AB** на бифуркационной диаграмме описывает лишь *среднее* значение температуры верхнего слоя. На самом деле до возникновения ячеек температура в любой точке верхнего слоя беспорядочно колеблется: то поднимется выше средней, когда в данной области возникает восходящий поток, то опустится ниже средней благодаря случайному нисходящему потоку. Другими словами, в системе имеют место *флуктуации*. Поэтому имеет смысл указывать не только *среднюю* температуру верхнего слоя (кривая **AB**), но и размах флуктуационных колебаний (ограниченная пунктиром область вокруг участка **AB**).

При температуре ниже критической флуктуации более или менее эффективно подавляются. Случайно возникший восходящий поток быстро затухает. Однако чем выше температура, тем менее эффективно работает механизм подавления, тем **больших** значений достигают отклонения от среднего и тем дольше они существуют. В точке бифуркации размах флуктуаций достигает максимума, а время их жизни становится бесконечным. Поэтому

самоорганизовавшаяся упорядоченная структура может рассматриваться как результат запоминания системой тех случайных флуктуаций, которые имели место в момент перехода через критическую точку.

Беспорядочные флуктуации, хаос являются тем строительным материалом, из которого строится порядок. Девизом синергетики стало название книги ее создателя, И. Р. Пригожина: «Порядок из хаоса».

Дальнодействующая кооперативность

При самоорганизации в системе движение составляющих ее элементов становится согласованным (кооперативным) на расстояниях, многократно превышающих размеры элементов.

Как говорилось ранее, синергетика обязана этому обстоятельству своим названием. В случае с ячейками Бенара переход через критическую точку делает согласованным движение молекул жидкости в пределах макроскопической ячейки.

Невозможность долгосрочных прогнозов

Точный прогноз будущего состояния системы на период, охватывающий хотя бы одну точку бифуркации, оказывается принципиально невозможным.

В точке бифуркации *самоорганизующаяся система запоминает случайный выбор*. На него могут повлиять незначительные и не поддающиеся учету факторы. Можно оценить лишь *вероятность*, с которой система двинется по той или иной ветви бифуркационной диаграммы. С каждой новой точкой бифуркации неопределенность усиливается, и потому отдаленное будущее оказывается непредсказуемым.

Это не означает, что о будущем нельзя сказать вообще ничего. Знание развивающейся системы позволяет из всего бесконечного множества ее мыслимых состояний выделить те немногие, в которые она *может попасть из современного состояния*. Профессиональные аналитики и футурологи занимаются расчетом возможных вариантов развития событий, не берясь определенно утверждать, какой из этих вариантов реализуется.

Самоорганизация порождает историю

Система, прошедшая несколько точек бифуркации, приобретает историю: по ее современному состоянию можно установить, в каких состояниях она находилась ранее.

Например, если мы обнаружили систему в состоянии, изображаемом на бифуркационной диаграмме точкой **E**, то отсюда однозначно следует, что в прошлом она побывала в состояниях **D** и **C**, но никогда не была в состоянии **G**. Можно сказать, что история возникает в точках бифуркаций. Специалисты по общественным процессам поняли это уже давно.

Балансирование на грани хаоса

Система, прошедшая в своем развитии несколько точек бифуркации, как правило, оказывается вблизи границы, отделяющей упорядоченное поведение от хаотического.

Как обсуждалось ранее, при слишком сильном нагреве конвекция в жидкости из упорядоченной вновь становится хаотической, турбулентной. Другой пример привел физик П. Бак: если сверху сыпать на тарелку песок, то в конце концов склоны образующейся горки приобретают критическую крутизну, когда достаточно уронить еще

одну песчинку, чтобы вызвать сход целой лавины. В 1980-х годах Бак разработал теорию *самоорганизованной критичности*, основанную на положении о том, что любая эволюционно зрелая система неизбежно балансирует на грани потери устойчивости. Для выживания такой системе требуется тонкое и точное управление.

Неоднородность распределения энтропии

При возникновении упорядоченной структуры энтропия занимаемой ею области пространства понижается, а энтропия прилегающих областей возрастает. Суммарное же изменение энтропии неизменно оказывается положительным.

Эта закономерность прямо вытекает из второго закона термодинамики и основных свойств энтропии.

Ускорение производства энтропии

При возникновении новой упорядоченной структуры скорость производства энтропии в занимаемой ею области пространства скачкообразно возрастает.

Например, при возникновении ячеек Бенара тепловой поток Q сквозь жидкость резко возрастает (за счет упорядочения конвективного движения) при практически неизменной температуре нижнего, $T_{\text{нижн}}$, и верхнего, $T_{\text{верх}}$, слоев жидкости. При этом одновременно возрастает поток входящей в объем жидкости энтропии $DS_{\text{вх}} = Q/T_{\text{нижн}}$, выходящей $DS_{\text{вых}} = Q/T_{\text{верх}}$, и их разность, которая и представляет скорость производства энтропии в жидкости.

Связь самоорганизованных структур с ускорением производства энтропии, то есть рассеяния, *диссипации* энергии, настолько неразрывна, что легла в основу термина, которым их обозначают в синергетике: *диссипативные структуры*.

Конкуренция диссипативных структур

Если самоорганизуется несколько конкурирующих диссипативных структур, то в конечном счете выживает та из них, которая производит энтропию с наибольшей скоростью.

В качестве примера можно привести явление синхронизации спиральных волн в системе Белоусова-Жаботинского: всех подчиняет своему ритму и выживает та волна, которая вращается вокруг своего ведущего центра быстрее остальных. Медикам известно смертельно опасное явление *фибрилляции*, когда сердце вместо ритмичных правильных сокращений начинает беспорядочно трепыхаться. Фибрилляция связана с тем, что помимо естественной медленной спиральной волны возбуждения в сердечной мышце возникает паразитная быстрая, которая подчиняет естественную своему ритму.

7.6. Универсальный эволюционизм

В настоящее время сформировалась новая научная программа исследований — программа *универсального эволюционизма*, включающая:

- разработку общетеоретических положений о механизмах развития природных *и социальных систем*;
- анализ и переосмысление данных естественных *и социальных наук* в рамках единого эволюционного подхода;
- приложение полученных результатов к поиску решения насущных социально-экологических проблем современной цивилизации.

Основные положения универсального эволюционизма, согласно академику Н.Н. Моисееву, можно сформулировать следующим образом:

1. Вселенная не просто существует, но и может существовать лишь в развитии. Попытки объяснить ее вне эволюции оказываются столь же бесплодными, как попытки объяснить устойчивость велосипеда без учета его движения.
2. Развитие Вселенной объяснимо внутренними по отношению к ней факторами, действующими объективно и познаваемыми рационально. Речь идет именно о самоорганизации материи, а не об организации ее внешними или сверхъестественными силами.
3. В мире действуют принципы отбора, выделяющие из всех мыслимых состояний некоторое множество допустимых. Отбор действует на всех уровнях: физическом (законы сохранения), химическом, биологическом и социальном.
4. На ход всех процессов во Вселенной неизбежно влияют случайные факторы. Все процессы протекают в условиях некоторого уровня неопределенности.
5. Развитие материальных объектов неизбежно приводит к точкам бифуркации, из которых возможен переход в различные состояния. В этих точках дальнейшая эволюция оказывается принципиально непредсказуемой, поскольку определяется действующими в системе в данный момент случайными флуктуациями. Поэтому настоящее и будущее зависят от прошлого, но не определяются им.
6. Диссипативные структуры, возникшие в результате самоорганизации, в отличие от кристаллов или технических устройств, поддерживают свое существование путем непрерывного самовоспроизводства — автопоэзиса. Поэтому диссипативную структуру (вроде живой клетки) правильнее рассматривать не как структуру, а как устойчивый самоподдерживающийся процесс.
7. В природе преобладают надежные системы из ненадежных составляющих (правило конструктивной эмерджентности). Устойчивость таких систем поддержива-

ется за счет непрерывного изменения и обновления их состава. Атомы, из которых мы состоим сейчас, когда-то разметал по космосу взрыв Сверхновой, а те, из которых мы состояли год назад, давно уже рассеялись в окружающей среде.

8. Эволюция — не просто развитие структур на фоне неизменной окружающей среды. Самоорганизуясь и самовоспроизводясь, диссипативные структуры неизбежно изменяют окружающую среду. При этом возникают новые принципы отбора — новые законы природы! Эволюция материальных систем порождает эволюцию эволюционных механизмов. Поэтому законы самоорганизации действуют на всех уровнях иерархической структуры Вселенной и оказываются не просто универсальными, но родственными, связанными общностью происхождения.
9. Возникающие на каждом этапе развития новые «правила игры в эволюцию» действительно благодаря деятельности структур-«предков», которые играют роль окружающей среды для структур-«потомков». Поэтому «предки» продолжают существовать и даже эволюционировать; только теперь их эволюция согласуется с эволюцией «потомков» и приобретает характер коэволюции — согласованного развития системы и ее исторического фона.

На этапе коэволюции система и «окружающая среда» становятся неразрывным целым. Так, история человеческого общества не сменяет, а вливается в историю природы. Вместе они образуют непрерывную естественную историю природы и человека. В концепции универсального эволюционизма человек — не случайность и не гость в этом мире, а наиболее активная и разумная природная сила. И будущее человечества видится именно как коэволюция цивилизации и геосферы, постепенно объединяющая их в единую ноосферу.