

## **Концепции современного естествознания**

ФИЗИКА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Серия основана в 2003 году

*Научные редакторы*

д-р физ.-мат. наук, проф. Л.К. Мартинсон,

д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. Морозов

Москва

Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана

2010

М.Ю. Докукин

## **Концепции современного естествознания**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению 220700 «Организация и управление  
наукоемкими производствами»*

Москва

Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана

2010

УДК 577.4(075.8)

ББК 28.081.1

Д63

*Рецензенты:* кафедра физики Московского государственного университета прикладной биотехнологии (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. К.В. Показеев);  
д-р физ.-мат. наук, проф. Г.И. Петрунин

**Докукин М.Ю.**

Д63      Концепции современного естествознания: Учеб. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 167 с.: ил. (Физика в техническом университете / Под ред. Л.К. Мартинсона, А.Н. Морозова).

ISBN 978-5-7038-32-13-4

Рассмотрены исторические этапы развития естествознания, структурные уровни организации материи и их объединения в микро-, макро- и мегамиры с точки зрения фундаментальных взаимодействий в природе; проявления симметрии в живой и неживой природе, принципы симметрии пространства и времени, их связь с фундаментальными законами сохранения. Изложены основные принципы формирования законов природы, закономерности в поведении сложных систем, вопросы термодинамики равновесных и неравновесных процессов. Рассмотрены хаотические системы, проблемы организации и самоорганизации в природе, методы и модели синергетики и вопросы ее сопряжения с эволюцией. Даны дополнительные учебно-методические материалы для выполнения реферативной работы.

В основу пособия положены конспекты лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н.Э. Баумана по дисциплине «Концепции современного естествознания».

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Организация и управление наукоемкими производствами».

**УДК 577.4(075.8)**

**ББК 28.081.1**

ISBN 978-5-7038-32-13-4

© Докукин М.Ю., 2010;  
© Оформление. Изд-во МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, 2010

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебная дисциплина «Концепции современного естествознания» (КСЕ) сейчас рассматривается как обязательный компонент в процессе подготовки бакалавров и дипломированных специалистов по гуманитарным направлениям, а также - специалистов в области организации производства. Это принципиально новая общеобразовательная дисциплина из цикла «Общие математические и естественнонаучные дисциплины» в Государственном образовательном стандарте (ГОС) второго поколения, принятом Минобразования Российской Федерации в 2000 г. В ГОСе и сопутствующих нормативных документах отмечается назначение данной дисциплины: «...повышение общекультурного статуса и уровня эрудиции студентов через ознакомление с достижениями в области современного естествознания...».

Еще в 1920-е годы в СССР при разработке курса «Естествознание» появилась идея объединения в рамках одной учебной дисциплины основополагающих концепций физики, химии, биологии. Но, к сожалению, уже в конце 1930-х годов на стадии реализации эта идея по политическим мотивам была признана неактуальной и отклонена.

Подобный курс давно введен в систему образования ряда ведущих стран (США, Англия, Франция и др.), и многолетняя практика подтверждает обоснованность существования интегральной, естественнонаучной дисциплины при дифференциальном, узкопредметном, подходе к процессу подготовки специалистов гуманитарной и технической ориентаций.

С 1990-х годов в системе образования нашей страны также стала просматриваться тенденция глобализации естественнонаучного знания, которую можно кратко охарактеризовать как стремление представить

современное естествознание феноменом мировой культуры. Достижение этой цели, согласно разработчикам действующего курса КСЕ для гуманитариев (авторы курса - профессора А. Д. Суханов и О. Н. Голубева), предполагает не только изложение общих естественнонаучных концепций, но и рассмотрение основных положений классической и неклассической стратегий мышления. Эти положения автор целиком и полностью поддерживает и в предлагаемом учебном пособии по ходу изложения материала старается их развивать.

Автор выражает глубокую благодарность уважаемым рецензентам – сотрудникам кафедры физики Московского государственного университета прикладной биотехнологии, возглавляемой профессором К. В. Показеевым, и профессору МГУ имени М. В. Ломоносова Г. И. Петрунину - за внимательное прочтение рукописи и ценные замечания, послужившие ее улучшению.

## ВВЕДЕНИЕ

Современное естествознание можно трактовать как область знаний о природе, в которой исследуются трансдисциплинарные отношения между частными естественными науками.

В связи с этим предмет курса «Концепции современного естествознания» (КСЕ) можно определить через представленные на рис. В.1 структурные части 1, 2, 3. Рассмотрение последних проводится с



**Рис. В.1.** Предмет и цель курса КСЕ

учетом их исторического развития и современного состояния и подчинено

единой глобальной цели – созданию концептуального каркаса\* целостной естественнонаучной картины мира.

**Методологическое замечание.** В связи с тем что сегодня по-прежнему остается заметной концептуальная и терминологическая несогласованность между отдельными естественными науками, особое внимание при изложении данного курса будет уделяться проблемам, в которых явно прослеживается влияние фундаментальных концепций физики, разработанных наиболее определенно. В то же время целый ряд вопросов химии и биологии, имеющих самостоятельную значимость в этих науках, будем рассматривать в качестве примеров, иллюстрирующих междисциплинарные отношения между отдельными естественными науками.

Подводя итог такому «философскому» введению в новую учебную дисциплину КСЕ, постараемся определить **з а д а ч и к у р с а**:

- отталкиваясь от основных принципиальных положений, теорий и достижений науки о природе, получить представление о целостной естественнонаучной картине мира как о полномасштабной модели природы;

- базируясь на знаниях о принципах существования и самоорганизации материального мира, овладеть рациональными методами и навыками разрешения современных и назревающих проблем при функционировании системы «человек – природа», т. е. привести эту систему к состоянию самосогласованности.

---

\* *Концептуальный каркас естественнонаучной картины мира* – это своеобразный конгломерат (сплав) знаний о природе с осознанием методов их получения, которые рациональным образом используют при исследовании проблем, изучении теорий и законов естествознания.



# 1. ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ И ГУМАНИТАРНОЙ КУЛЬТУР. ПАНОРАМА СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

## 1.1. Естественнонаучная и гуманитарная культуры, их структуризация и основные признаки, проблемы и взаимоотношения

Под *культурой*, согласно Питириму Сорокину – ведущему культурологу в мире, понимают систему ценностей (материальных и духовных), на основе которой происходит объединение людей в сообщество, а также – обеспечивается функционирование и взаимосвязь общественных институтов (организаций). Иначе говоря, культура отражает комплекс знаний, ценностей и норм, непосредственно связанный с существованием, как социальных групп людей, так и отдельных личностей.

По сути, культура подразумевает всю совокупность знаний и ценностей, созданных в ходе всех форм материальной и духовной деятельности человечества. Она воплощается в результатах предметной деятельности человека, способах и методах проявления этой деятельности, в разнообразных (правовых, этических, религиозных, эстетических и др.) нормах, соблюдения которых общество требует от всех индивидуумов.

Обычно культуру рассматривают с позиций науки и искусства.

*Наука* является одной из важнейших форм культуры, в ценностях (знаниях) которой преобладает рациональное начало.

*Искусство* – другая форма культуры, где доминирует эмоциональное начало в деятельности человека по формированию художественных образов.

Исторически сложилось так, что культуру стали подразделять на естественнонаучную и гуманитарную составляющие. Это наиболее заметно на примере науки.

Как представлено на схеме (рис. 1.1), в соответствии с конкретной предметной областью знаний все науки подразделяются на естественные и гуманитарные.

Таким образом, *естественные науки* – это система знаний о материальном мире, его формах существования и взаимодействия; а *гуманитарные науки* – это система знаний о позитивно значимых



**Рис. 1.1.** Предметная область науки

ценностях бытия человека (индивидуума), социальных слоев (групп людей) и человечества в целом, включающая в себя идеалы, цели, нормы и правила мышления, общения и поведения людей.

- *Специфика естественной науки* состоит в том, что знания о природе отличаются высокой степенью объективности и достоверности.

Для естествознания характерно стремление к истине, раскрытию наиболее глубоких и общих закономерностей рассматриваемых явлений

мира в целом, а также системный подход при выводе одних знаний из других логическим путем с использованием математического аппарата.

- *Специфика гуманитарной науки* состоит в том, что системообразующие ценности данной области знания определяются и активизируются исходя из социальной позиции человека.

Гуманитарные знания нацелены на человека по определению и имеют определенные идеологические корни, что предполагает зависимость этих знаний от приоритетов и предпочтений познающего субъекта. Поэтому в гуманитарных науках иллюзии и заблуждения сохраняются довольно долго.

Результаты гуманитарной научной деятельности, как правило, плохо поддаются экспериментальной проверке и математической обработке, а также подчинены определенным морально-этическим нормам. Следует отметить, что в настоящее время гуманитарные методы познания, как таковые, применяются в естествознании крайне редко. Ученые предпочитают использовать физико-математические, химические, биологические, технические методы исследований.

Таким образом, естественнонаучная деятельность выражается в познании объективных законов природы, не зависящих от социальных приоритетов, а гуманитарные науки возникли в ходе социальной деятельности людей, т. е. их можно рассматривать как продукт общественного мышления, подверженного этапным изменениям в обществе.

Казалось бы естественные и гуманитарные науки внутренне не связаны и поддерживают между собой чисто исторические и формальные отношения... Однако на определенном этапе эволюции именно гуманитарные ценности отдельных народов определили преимущественные направления в развитии их естественнонаучной деятельности.

Так уж сложилось, что *гуманитарная культура* в общественном восприятии является культурой полноценной, первокультурой и рассматривается как необходимый фактор духовного развития людей.

*Естественнонаучная культура* обычно воспринимается проще, ее достижения часто связывают с результатами материальной деятельности людей, а при обсуждении ее значимости обычно рассматривают технические и технологические приложения естествознания – говорят о веке электроники, могуществе ядерной энергетики, эпохе компьютеров и информационных технологий и т. д.

Современное понятие «культура» трактуется значительно шире. В наше время это понятие нельзя связывать только с гуманитарным знанием и искусством. Духовный мир человека определяется его культурным уровнем, а последний формируется в ходе осмысления природы, осознания ее законов. Поэтому естествознание следует рассматривать как часть *общечеловеческой культуры*.

**П р и м е ч а н и е.** В настоящее время становится все более правомерным суждение о том, что естественнонаучная и гуманитарная культуры – это две формы проявления единой, общечеловеческой культуры.

Культура в широком смысле воплощает в себе всю систему знаний и представлений о мире, которая определяет уровень развития общества и отдельной личности. Причем основополагающий вещественный вклад естествознания в эту систему дополняется сегодня активным положительным воздействием естественных наук на процесс мышления и духовный мир человека.

Давно привычным стало рассмотрение двух видов существования материи – вещество и поле, например заряженная микрочастица и электромагнитное излучение. При этом обе эти субстанции равноправны с точки зрения своей сущности и способны к взаимопревращениям. Подтверждением сказанного является взаимодействие электрона с

позитроном, приводящее к рождению двух фотонов – квантов излучения, и обратный процесс образования электронно-позитронной пары при столкновении фотонов с атомами вещества.

Подобным образом следует рассматривать и соотношение между гуманитарной и естественнонаучной культурами.

Культура, вообще, становится «двуликой», что само по себе выражается в одновременном существовании ее гуманитарной и естественнонаучной форм, которым свойственна неодинаковость и взаимодополняемость. Между этими формами устанавливается взаимодействие по типу сообщающихся сосудов, когда прибавление содержимого в одном сосуде со временем повышает уровень содержимого в другом. В реальном восприятии два лика культуры – это образы человека и природы. Единение последних обусловлено тем, что человек – это часть природы, а природа – его естественное окружение.

## **1.2. Предназначение науки и формы научного знания**

Какова формула науки? Кратко ответить на этот вопрос можно следующим образом: знать, чтобы предвидеть, предвидеть, чтобы действовать со знанием дела.

В процессе научного познания можно выделить две существенные стороны. Одна сторона связана с раскрытием природы предмета науки, а другая сторона отражает природу и механизм метода исследования.

Согласно французскому математику А. Пуанкаре научная деятельность всегда предполагает некоторую классификацию собранного фактического материала, в процессе которой устанавливаются скрытые изначально связи между отдельными фактами и закономерности их проявления.

Обобщая все ранее сказанное о науке, можно дать ей следующее определение.



**Рис. 1.2.** Структуризация форм научного знания

Наука – это осознанная деятельность людей, направленная на достижение объективно-истинных знаний, а также систематизация полученной человеком и обществом информации.

Представленная на рис. 1.2 схема отражает структуризацию форм научного знания, их взаимодействие и назначение.

### **1.3. Научные методы как средство достижения научного знания, процесс научного познания**

Научная деятельность всегда предполагает применение того или иного метода исследования. Выбор конкретного метода обосновывается природой изучаемого объекта, характером и закономерностями его движения.

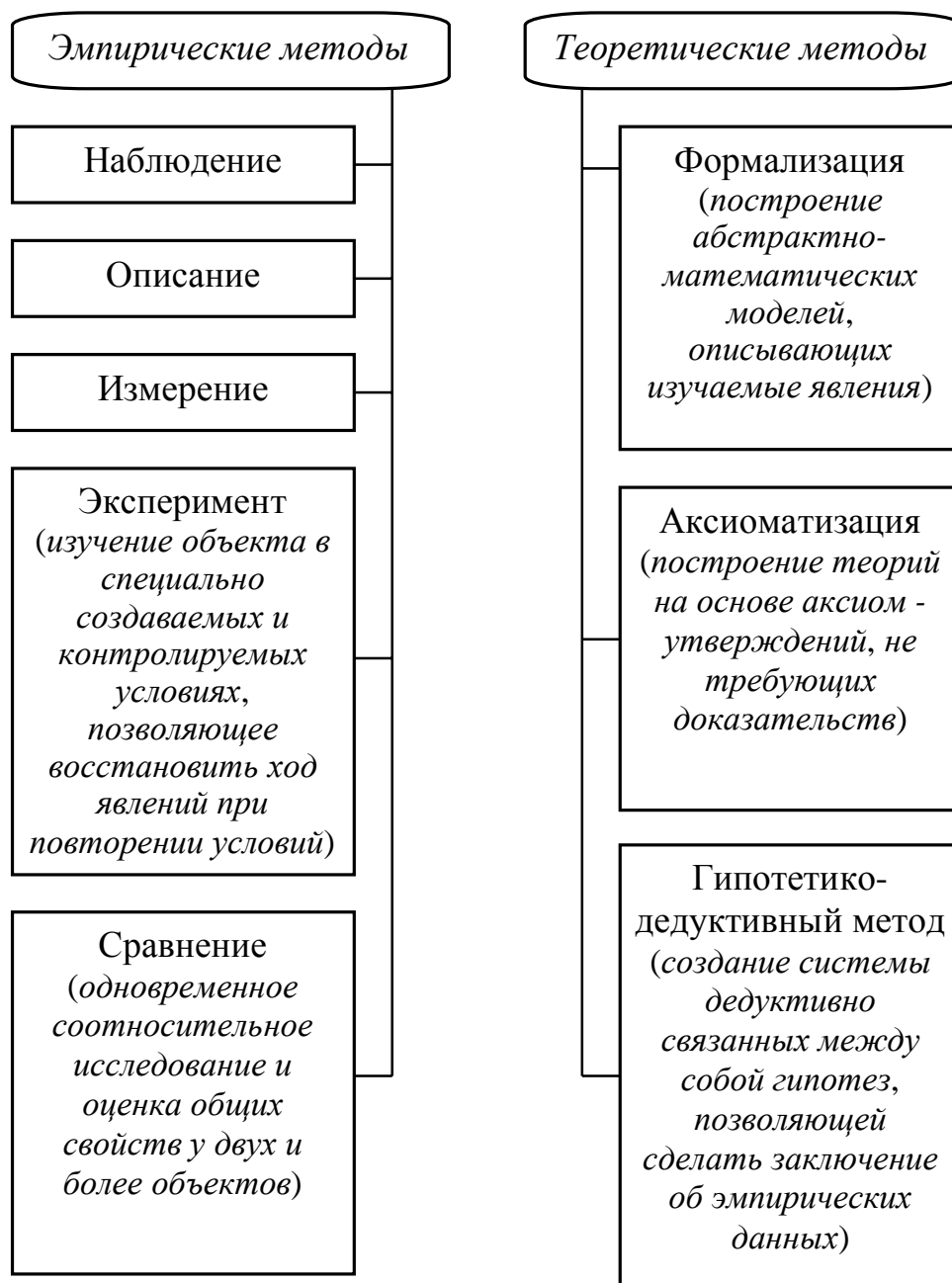
Результат научного поиска может быть отрицательным, т. е. он не отвечает на изначально поставленный вопрос. Но, если этот результат получен по научно обоснованной методике, то и он важен в дальнейших исследованиях, так как сужает область поиска.

Время от времени в науке происходит обновление теорий, смена взглядов, преодоление сложившихся мнений. При этом методы исследования сохраняют вид в своей основе, что является важным элементом стабильности и преемственности в научных исканиях последующих поколений ученых. На рис. 1.3 приведена схема, в которой методы исследования в соответствии с характером использования в процессе познания объединены в две большие группы – эмпирическую и теоретическую.

Структурная схема так называемых общенаучных методов исследования представлена на рис. 1.4.

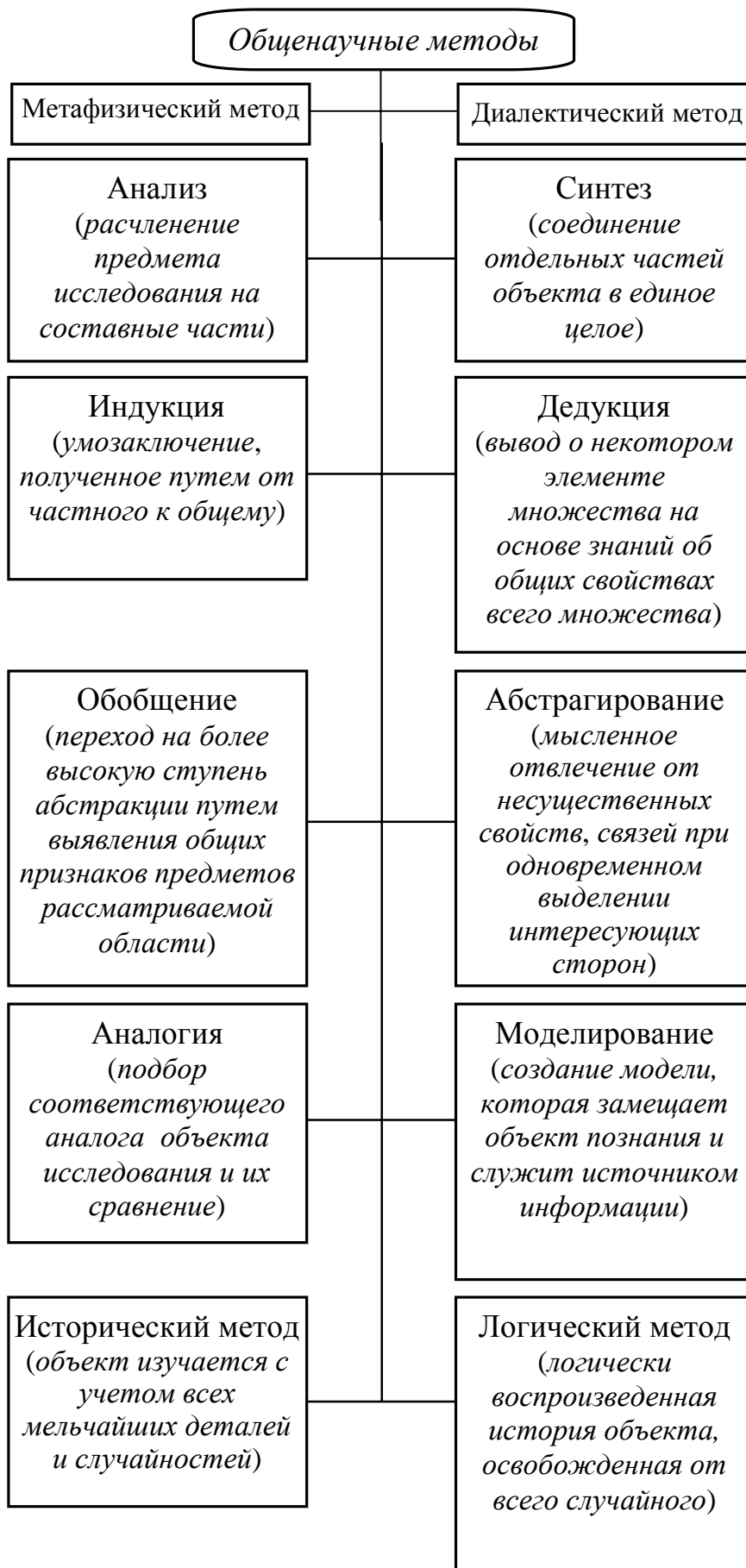
Кроме методов, приведенных в последней схеме, часто используется *операционный метод*, который основан на подразделении изучаемых явлений на отдельные события, определенных временных и пространственных масштабов. Сами события заключаются в совершении каких-либо действий (операций) над объектом познания и последующем сборе информации об ответной реакции объекта.

При распространении той или иной теории на менее изученные области часто используют *метод экстраполяции*, а когда требуется установить общую закономерность в поведении объекта исследования по отдельным экспериментальным данным, применяют *метод интерполяции*. При этом приходится подбирать подходящие простые экстраполирующие и интерполирующие функции.



**Рис. 1.3.** Классификация методов исследования





**Рис. 1.4.** Общенаучные методы исследования

Следует также отметить, что современная наука широко использует *метод структурного анализа*, в котором учитывается системность исследуемого объекта, т. е. внутренняя расчлененность изучаемого материального образования на отдельные системы, для которых характерна иерархичность (самоподчинение более низких систем системам более высокого уровня).

Для изучения природных явлений человечество выработало определенный методологический путь, этапы которого можно в совокупности рассматривать как *процесс научного познания* (рис. 1.5).



**Рис. 1.5.** Схема научного познания

#### 1.4. Исторические этапы развития естествознания

Познание материального мира, сущности наблюдаемых природных явлений – все это со временем стало необходимым условием плодотворной практической деятельности людей. Первыми создателями философских учений, теоретических схем и моделей процессов в окружающей действительности стали великие ученые и мыслители древности.

Принято считать, что наука возникла в Древней Греции на рубеже VI–V вв. до н. э., ибо именно тогда впервые человеческое знание стало подкрепляться обоснованностью, необходимостью доказательства: труды Фалеса Милетского, труды Пифагора по геометрии и первоначалах мира и др.

**Этап I.** Зарождение в Древней Греции единой науки о развитии природы, человеческого мышления и общества – *натурфилософии* – послужило началом одноименного этапа в истории естествознания (ок. VI в. до н. э. – IV в. н. э.). С этим этапом связывают следующие события:

- зарождение *диалектики* (учение о развитии) – показательны мысли Гераклита о вечном движении, изменении и развитии;

- появление основ теории *материализма* – важны идеи о материи у Левкиппа, понятие атома у Демокрита, учение Эпикура о формах движения атомов;

- становление методологии в процессе познания – следует прежде всего отметить философские труды Аристотеля о достоверном, истинном, неоспоримом знании (*ἐπιστήμη*), получаемом в ходе описания объектов и субъектов окружающей природы\*;

- становление и развитие основ математики и механики – известные «Начала» планиметрии Евклида, где он умело использовал метод Аристотеля, положив в основу геометрии ряд аксиом. Сам Аристотель также по праву считается основателем механики: в своей теории движения он выделяет «движущее» – силу как причину движения и «движимое» – тело (или тела, которыми наполнена природа – «природа боится пустоты»), приобретающее скорость. Аристотель ввел понятие «скорость» – путь,

---

\* Подход Аристотеля к познанию природы был по сути дедуктивным, несвязанным с экспериментом (в основе его заключений лежал ряд «непререкаемых истин» – аксиом). По мнению великого энциклопедиста античности (см. труд Аристотеля «О возникновении животных»), научное знание в большей степени зависит от общего и необходимого, а не от единичного и случайного.

пройденный за единицу времени, и «время» – последовательность состояний тела. Большая заслуга в развитии статики и гидростатики принадлежит Архимеду (см. работы «О равновесии плоских фигур или о центре тяжести плоских фигур», «О плавании тел»), открывшему также закон рычага;

- становление астрономии как науки – появление учения Птолемея о геоцентрической системе мира.

**Этап II.** Следующим этапом развития естествознания считается этап схоластики (V–XIV вв. н. э.).

*Схоластика* – учение, основанное одновременно на богословии и на концепции Аристотеля относительно «души» как функции тела, а не какого-либо внешнего феномена. Ученые-схоласты объясняли устройство мира как с позиций разумного начала, так и с позиций «озарения» верой (верой во Всевышнего). Главное в рассуждениях сводилось к выяснению соотношения между приобретенными знаниями и верой. В основном доминировал тезис «Вера превышает разум».

Во времена схоластики в мире процветали астрология, алхимия, магия, кабалистика (т.е. в большей степени ненаучные знания), однако в некоторых случаях результаты поисков носили позитивный характер в деле познания Вселенной, мира окружающих веществ и т. п.

На этом этапе получили развитие естественные науки – астрономия, медицина, математика. Больших успехов добились ученые-мыслители и исследователи из Средней Азии – Улугбек (обсерватория и каталог звезд), аль-Хорезми (трактаты по арифметике и алгебре), Ибн-Сина (каноны врачевания), из Индокитая – Брахмагупта (каноны теории чисел и квадратных уравнений) и др.

**Этап III.** С XV в. до середины XVIII в. простирается крайне важный период развития естествознания – этап *механицизма*.

Начало этого периода обычно связывают с разработкой гелиоцентрической системы мира Н. Коперником и с учением о множественности миров Д. Бруно. Далее следует установление И. Кеплером на основе астрономических наблюдений, проведенных Т. Браге, трех законов небесной механики (законы движения планет относительно Солнца, 1609).

Основы механицизма заложил величайший естествоиспытатель Г. Галилей. Его по праву считают основоположником экспериментальной физики. Галилей соединил научное мышление с опытом, определил ряд фундаментальных понятий механики (инерцию, ускорение как характеристику неравномерного движения), открыл закон, согласно которому ускорение свободно падающего тела не зависит от его массы, активно поддерживал учение Коперника о гелиоцентрической системе.

Завершил научное построение механистической картины мира И. Ньютон. Ньютон, родившийся, как считают некоторые историки, в день смерти Галилея, придал полную научную ясность выводам (по механике) своего предшественника, заключив их в точную математическую оболочку. Он сформулировал, используя разработанное им же дифференциальное исчисление, три основных закона механики и закон всемирного тяготения. Записав дифференциальный закон движения, Ньютон тем самым объяснил и законы Кеплера, носящие, как говорил А. Эйнштейн, чисто интегральный характер (см.: *Эйнштейн А. Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики*).

**Этап IV.** Следующим этапом развития естествознания можно считать *формирование эволюционных идей* (конец XVIII – XIX вв.). Этот этап знаменателен появлением ряда гипотез и теорий, научно обосновывающих проблему развития мира:

- *космогонической гипотезы И. Канта* о возникновении Солнечной системы в результате сгущения газообразного облака;

- *теории катастроф* Ж. Кювье, предполагающей внезапные изменения в земном рельефе (в геологических пластах) и качественную смену всего живого (флора, фауна);

- *теории геологического эволюционизма* Ч. Лайеля, где в противовес теории катастроф рассмотрены медленные, непрерывные изменения в земной коре под влиянием постоянных геологических факторов;

- фундаментального закона сохранения и превращения энергии в работах некоторых естествоиспытателей, например Ю. фон Майера, Г. Гельмгольца;

- клеточной теории построения всего живого М. Шлейдена и Т. Шванна;

- учения об эволюции и теории естественного отбора Ч. Дарвина.

**Этап V.** Этот этап (конец XIX – начало XX в.) часто определяют как *крушение механицизма*. В это время во взглядах ученых качественно меняются приоритеты в объяснении физических явлений – от чисто механического подхода к электромагнитному и квантовому. Этап знаменуется:

- разработкой классической электродинамики в работах М. Фарадея, Г. Герца, Д. Максвелла (1831–1865);

- открытием радиоактивности А. Беккерелем (1896);

- открытием электрона Д. Томсоном (1897);

- выдвижением квантовой гипотезы теплового излучения М. Планком (1900);

- разработкой специальной теории относительности А. Эйнштейном (1905);

- открытием атомного ядра Э. Резерфордом (1911);

- квантовым подходом Н. Бора в теории атома водорода (1913).

**Этап VI.** Современный этап развития естествознания (XX в. – настоящее время) связывают с такими достижениями:

- разработка общей теории относительности (теория гравитации) (А. Эйнштейн, 1916 );
- появление модели расширяющейся Вселенной (А. Фридман, 1922);
- разработка квантовой механики (В. Гейзенберг, Э. Шрёдингер, 1925-1926);
- открытие нейтрона (Д. Чедвик, 1932);
- создание кибернетики (Н. Винер, 1948);
- построение модели молекулы ДНК (Д. Уотсон, Ф. Крик, 1953);
- открытие структуры генетического кода (М. Ниренберг, Х. Корана и др., 1961), появление генной инженерии;
- разработка и первые успехи нанотехнологий (2004).

### **1.5. Этапы формирования физической картины мира**

Становление той или иной физической картины мира связано с процессами эволюции основных концепций природы: материя, пространство и время, движение и развитие, детерминизм и стохастичность.

Различают следующие исторически сложившиеся системы взглядов на окружающий мир.

**Механистическая картина мира (МКМ).** Система формируется на основе классической механики И. Ньютона, экспериментального естествознания Г. Галилея, законов небесной механики И. Кеплера, учения Н. Коперника.

Характерные особенности МКМ следующие.

- В рамках МКМ сложилась дискретная модель объективной реальности. Материя – вещественная субстанция, состоящая из атомов

(корпускул). Атомы абсолютно прочны, неделимы, непроницаемы, обладают массой.

- Действует ньютоновская *концепция абсолютных пространства и времени*, т. е. пространство, окружающее тела, является трехмерным, евклидовым, оно постоянно, не зависит от вещества; время не зависит ни от пространства, ни от вещества; как пространство, так и время не связаны с движением тел.

- Движение в МКМ – простое механическое перемещение. Законы механики рассматриваются как фундаментальные законы мироздания. Самостоятельные тела движутся равномерно и прямолинейно, изменение характера такого движения есть проявление действия на тела внешней силы. Масса тела является мерой инерции (неизменности характера) в его движении. Все тела подвержены дальнедействующей силе всемирного тяготения. В целом существует тенденция сведения закономерностей высших форм движения материи к простейшему механическому перемещению.

- Работает *принцип дальнего действия* – взаимодействие между телами происходит мгновенно на любом расстоянии, иначе говоря, действие передается в пустоте с бесконечной скоростью.

- Механические процессы подчиняются *принципу детерминизма*, т.е. они однозначны и строго закономерны. Случайность исключается из физической картины мира.

**Электромагнитная картина мира (ЭКМ).** Система формируется на основе теорий электромагнетизма М. Фарадея и электромагнитного поля Дж. Максвелла, электронной теории вещества Х. Лоренца, специальной теории относительности А. Эйнштейна.

Характерные особенности ЭКМ следующие.

- В рамках ЭКМ сложилась полевая континуальная модель действительности. Материя воспринимается как единое непрерывное



электромагнитное поле с точечными силовыми центрами, роль которых играют электрические заряды. Взаимодействие между зарядами осуществляется через поле.

- Действует *концепция реляционных (относительных) пространства и времени*: пространство и время связаны с движениями, происходящими в поле, т. е. они не самостоятельны и зависимы от материи (вещества).

- Движение в ЭКМ – это распространение электромагнитных волн в средах, которые обладают электрическими и магнитными свойствами.

- Работает *принцип близкодействия*, а именно: взаимодействие передается полем от точки к точке непрерывным образом и с конечной скоростью, не превышающей скорости света в вакууме.

- В ЭКМ введено понятие вероятности, но оно носит частный характер.

**Квантово-полевая картина мира (КПКМ).** Система формируется на основе квантовой гипотезы М. Планка, квантовой механики В. Гейзенберга, Э. Шрёдингера и П. Дирака, квантовой теории атома и фундаментальных принципов Н. Бора.

Характерные особенности КПКМ следующие.

- В рамках КПКМ сложились квантово-полевые представления о материи. Материя обладает *корпускулярно-волновым дуализмом*, т. е. каждый элемент материи имеет свойства как частицы, так и волны. Формирование физической картины мира в квантовой механике происходит в ходе активного взаимного влияния объекта познания и средств познания (средства наблюдения и измерения, которые использует исследователь).

- Для описания объектов исследования применяются пространственно-временные и энергетическо-импульсные характеристики.

Первые характеристики отражают кинематическую картину движения, вторые – динамическую (причинную) картину. При составлении общей КПКМ пространство–время и причинность считаются относительными и зависимыми.

- Движение трактуется как частный случай взаимодействия. Рассматриваются фундаментальные физические взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное.

- Взаимодействия описываются на основе принципа близкодействия, т. е. они передаются соответствующими квантовыми полями от точки к точке с конечной скоростью, не превышающей скорость света.

- Закономерности квантовых процессов носят вероятностный характер и отражаются в виде статистических законов.

**П р и м е ч а н и е.** Фундаментальными принципами квантовой теории являются принцип неопределенности и принцип дополнительности.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что является предметом курса «Концепции современного естествознания» (КСЕ)?

2. Каковы задачи курса КСЕ?

3. В ценностях какой формы культуры преобладает рациональное начало? Какая форма культуры связана с формированием художественных образов?

4. По каким принципам проводится подразделение всех известных наук на естественные и гуманитарные науки? Укажите специфические особенности естественных и гуманитарных наук.

5. В чем заключается «двуличие» единой, общечеловеческой культуры?

6. Что существенно для научного познания?

7. Перечислите основные формы научного знания. В чем заключается научная деятельность людей?

8. Как классифицируются общенаучные методы исследования?

9. Дайте определения следующих методов исследования: эксперимент, аксиоматизация.

10. Какой метод исследования заключается в мысленном отвлечении от несущественных свойств, связей при одновременном выделении интересующих сторон изучаемого явления?

11. Перечислите этапы процесса научного познания.

12. Назовите исторические этапы развития естествознания. Чем знаменательны эти этапы?

13. Какие концептуальные понятия естествознания играют главную роль в формировании физической картины мира? Перечислите исторически сложившиеся системы взглядов на окружающий мир. Какие принципы, законы, теории положены в основу каждой системы?

## 2. СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИИ. МИКРО-, МАКРО- И МЕГАМИРЫ

### 2.1. Структурность и системность описания материи

Принято считать, что природные объекты являются упорядоченными, иерархически структурированными системами. Попытаемся разобраться в этом.

Под *системой* понимают упорядоченное множество (совокупность) взаимосвязанных элементов.

Связи между элементами системы образуют ее *структуру*. При этом предполагается включение систем нижних (более мелких или простых) уровней в системы более высоких уровней, что связывает каждый элемент конкретной системы с другими возможными элементами.

Примеры иерархически построенных природных систем:

- человек → биосфера → Земля → Солнечная система;
- элементарные частицы → атомы → молекулы → макротела;
- гены → клетки → органы → организмы → виды.

Возможны и другие варианты систематизации при описании материи, например: по формам существования материи – вещество и поле; по типу материальных систем – живая и неживая природа; по типам взаимодействия между элементами при организации системы – физические, химические, биологические, социальные. Так, в живой природе часто выделяют «нуклеиновые кислоты и белки» как системы доклеточного уровня, далее – «клетки и микроорганизмы (вирусы, микробы, бактерии)», «одно- и многоклеточные организмы» соответственно растительного и животного мира, а затем – «органические виды», «биоценозы» как надорганизменные структуры.

Структурные уровни организации материи в неживой природе обычно рассматриваются в следующей последовательности:

«элементарные частицы», «атомы», «молекулы», «поля и физический вакуум», «макротела», «планеты и их системы», «звезды и их системы», «галактики и их объединения (метagalактики)».

Следует отметить, что некоторое множество объектов воспринимается как целостная система в том случае, если энергия связи между объектами больше суммы их кинетической энергии и энергии внешних воздействий, направленных на разрушение структуры. С переходом от мегасистем к макросистемам и далее к молекулам и атомам над гравитационными силами начинают доминировать силы электромагнитные, обусловленные взаимодействием заряженных частиц.

Вообще, чем меньше размеры материальной системы, тем более прочно связаны между собой ее элементы. Так, в атомных ядрах действуют еще более мощные силы – ядерные, которые обуславливают существование высокостабильной структуры – атомного ядра.

## **2.2. Основные характеристики и особенности вещества и поля**

Приведенные выше варианты систематизации живой и неживой природы охватывают в основном системы, описывающие одну большую форму существования материи – *вещество*. Другой формой существования материи, как известно, является поле (*физическое поле*). Поэтому далее целесообразно рассмотреть их характеристики и особенности.

1. Вещество имеет *атомно-молекулярную структуру*, т. е. состоит из различного вида частиц, обладающих массой покоя. Физическое поле такой структуры не имеет. Однако подразделение материи на вещество, имеющее прерывистое (корпускулярное) строение, и непрерывное (континуальное) поле не является абсолютным. Каждому полю соответствуют *кванты действия* этого поля, роль которых выполняют те или иные виртуальные частицы. Так, в случае электромагнитного поля – это фотоны, в случае ядерного поля –  $\pi$ -мезоны, в случае гравитационного

поля – гравитоны (предположительно). При этом эти кванты поля могут иметь массу покоя как равную нулю (фотоны), так и отличную от нуля ( $\pi$ -мезоны,  $m_\pi \approx 270m_e$ ).

2. Физическим полям присуще свойство связывать частицы вещества в более сложные структурные единицы (в ядра атомов, атомы, молекулы, макротела, космические объекты) за счет того или иного фундаментального взаимодействия. Так, *сильные взаимодействия*, обладая максимальной интенсивностью ( $I = 1$  отн. ед.), удерживают нуклоны в атомных ядрах, обеспечивая тем самым их высокую стабильность, но имеют малый радиус действия ( $r \approx 10^{-15}$  м). Поэтому ядерные поля (поля сильных взаимодействий) не способны создавать макротела.

*Электромагнитные взаимодействия* осуществляются через электромагнитное поле, обладают значительно меньшей интенсивностью ( $I \approx 10^{-2}$  отн. ед.), но неограниченным радиусом действия ( $r \rightarrow \infty$ ). В связи с этим они определяют образование атомов и молекул вещества и ответственны за все электрические и магнитные эффекты, наблюдаемые нами в разных формах проявления (оптические, механические, тепловые, химические и др.).

*Гравитационные взаимодействия* – самые слабые из известных взаимодействий ( $I \approx 10^{-31}$  отн. ед.), но они универсальны (происходят с любыми вещественными структурными элементами материи) и вследствие неограниченного радиуса действия ( $r \rightarrow \infty$ ) являются определяющими в образовании космических объектов (и их систем).

3. Вещество и поле различаются проницаемостью. Вещество относительно мало проницаемо по сравнению с такими полями, как электромагнитное и гравитационное. В то же время на уровне процессов микромира это различие исчезает: для таких частиц, как нейтрино, вещество становится весьма «прозрачным», а для ядерных полей, наоборот, характерна очень малая проницаемость.

4. Вещество и поле различаются по степени концентрации массы и энергии. В макроявлениях наблюдается большая концентрация названных величин у частиц вещества и очень малая – у электромагнитного и гравитационного полей. Но в микромире это различие также стирается: ядерные поля обладают огромной концентрацией массы и энергии.

5. Вещество и поле различаются по своей корпускулярной и волновой природе. Это различие исчезает на уровне процессов микромира, где частицы вещества обладают волновыми свойствами, а непрерывное в макропроцессах электромагнитное поле проявляет свой корпускулярный характер (в виде фотона как кванта этого поля).

Таким образом, особенности вещества и поля достаточно точно характеризуют реальный мир в макроскопическом приближении. Однако эти особенности не являются абсолютными, и при переходе в область микромира обнаруживается их относительность. Здесь понятия «частица» и «волна» выступают как взаимодополняющие характеристики, отражающие сложную, двойственную, сущность самих микрообъектов.

### **2.3. Абсолютный и физический вакуум**

Как обобщающее понятие физическое поле включает в себя и понятие физического вакуума. При этом следует различать:

- *абсолютный вакуум* как некую абстракцию, определяющую абсолютную пустоту;
- *физический вакуум (по Дираку)* как особую форму существования материи.

Известно, что в 1928 г. английский физик П. Дирак записал релятивистское квантовомеханическое уравнение для свободного электрона. В качестве следствий из этого уравнения были получены такие важные характеристики, как спин и собственный магнитный момент

электрона, а также было предсказано существование антиэлектрона – позитрона.

Последнее предположение было связано с тем, что для полной энергии свободного электрона в уравнении Дирака реализуются как положительные, так и отрицательные значения. Иначе говоря, для заданного импульса частицы  $p$  возможны решения уравнения, отвечающие энергиям  $E = \pm\sqrt{p^2 \cdot c^2 + m_e^2 \cdot c^4}$  (см. энергетический инвариант релятивистской теории  $E^2 - p^2 \cdot c^2 = m_e^2 \cdot c^4$ ).

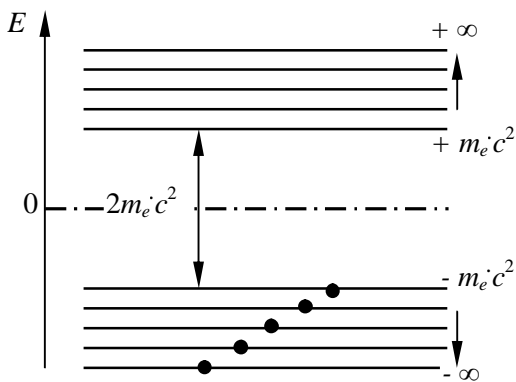


Рис. 2.1. Энергетическая диаграмма вакуума по Дираку

В соответствии с квантово-механическими положениями, а именно с дискретизацией (квантованием) энергии микрочастицы и ее возможными переходами между уровнями энергии энергетическая диаграмма для вакуума принимает вид, представленный на рис.

2.1. Видно, что есть две области возможных собственных значений энергии электрона: отрицательная  $[-\infty; -m_e \cdot c^2]$  и положительная  $[+m_e \cdot c^2; +\infty]$ , а также существует промежуточный интервал энергий величиной  $2m_e \cdot c^2$ , значения которого не доступны для частицы.

Кроме того, из фундаментального соотношения Эйнштейна  $E_0 = m_e \cdot c^2$  следует парадоксальный вывод, что у частицы с отрицательной энергией масса должна быть отрицательной, и излучать такая частица должна неограниченно много при переходах на все более низкие уровни энергии.

П. Дирак вышел из этого «трудного» положения следующим образом. Руководствуясь принципом запрета Паули, согласно которому электроны, как фермионы, не могут соседствовать на одном уровне с другими электронами, он высказал идею о ненаблюдаемости в обычных

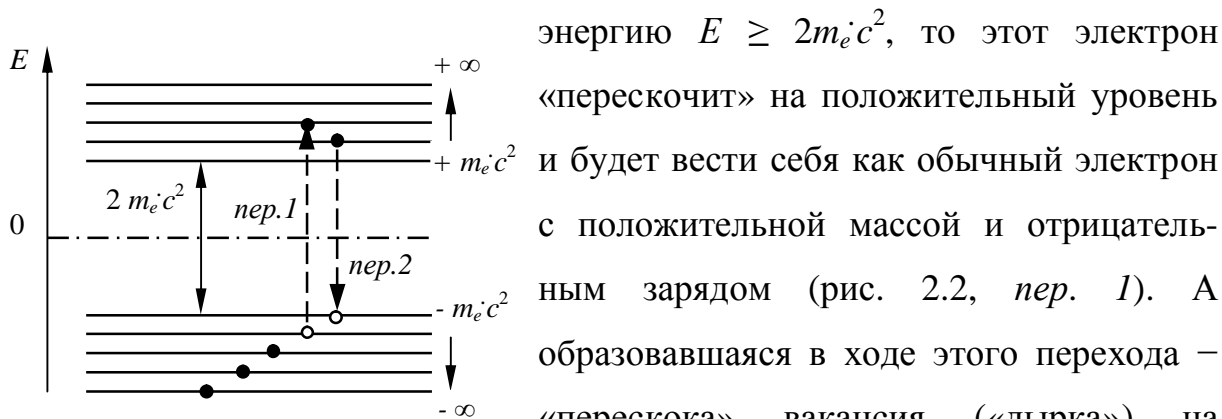


условиях квантовых переходов электронов в состоянии с отрицательной энергией в связи с тем, что все отрицательные уровни уже заняты (другими электронами).

**П р и м е ч а н и е.** Таким образом, П. Дирак определил «вакуум» как такое состояние квантовомеханической системы, когда все уровни с отрицательной энергией уже заселены электронами, а положительные энергетические уровни свободны.

В связи с этим, так как заняты абсолютно все уровни, расположенные ниже запрещенной зоны ( $2m_e c^2$ ), электроны, находящиеся там, никак себя не обнаруживают и не проявляют в обычных процессах.

Если же одному из электронов на отрицательных уровнях передать



**Рис. 2.2.** Квантовые переходы в вакууме

энергию  $E \geq 2m_e c^2$ , то этот электрон «перескочит» на положительный уровень и будет вести себя как обычный электрон с положительной массой и отрицательным зарядом (рис. 2.2, *пер. 1*). А образовавшаяся в ходе этого перехода – «перескока» вакансия («дырка») на соответствующем отрицательном энергетическом уровне уже будет проявлять себя как электрон с положительным зарядом.

Так теоретически была предсказана первая античастица – позитрон. Если электрон встречается с позитроном, то они аннигилируют (исчезают), иначе говоря, электрон переходит с положительного уровня на вакантный отрицательный уровень (рис. 2.2, *пер. 2*), становясь вновь «ненаблюдаемым».

В 1932 г. К. Андерсон с помощью камеры Вильсона, помещенной между полюсами электромагнита, обнаружил позитрон (по противоположной «закрутке» его следа по отношению к следу электрона) в космических лучах. Электронно-позитронные пары рождаются при

прохождении  $\gamma$ -фотонов через вещество земной атмосферы (при этом  $E_\gamma \geq 2m_e \cdot c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$ ).

В состоянии вакуума в любой точке свойства пространства определяются гравитацией, электромагнетизмом, а также другими полями, но их энергии не достаточно для того, чтобы они проявили себя через реальные частицы. Множество скрытых там частиц, в частности фотоны, носят название *нулевых колебаний*, а «дрожание» электрона на орбите атома объясняется его взаимодействием с виртуальными частицами окружающего атом вакуума (это проявляется в сдвиге энергетических уровней, отражаемом в спектре атома).

#### **2.4. Структурные уровни вещества в микромире**

В микромире различают следующие структурные уровни вещества:

- *молекулярный уровень* – уровень молекулярного строения вещества (рассматривается молекула как единая квантовомеханическая система, объединяющая атомы, и обладающая индивидуальными химическими свойствами);

- *атомный уровень* – уровень атомного строения вещества (рассматривается атом как структурный элемент микромира, состоящий из ядра и электронной оболочки);

- *нуклонный уровень* – уровень атомного ядра и составляющих его частиц (рассматриваются нуклоны, т. е. протоны и нейтроны, из которых синтезируются атомные ядра);

- *кварковый уровень* – уровень элементарных частиц (рассматриваются кварки и лептоны как элементарные структурные единицы вещества).

#### **Элементарные частицы. Их характеристики и систематика.**

**М а с с а ( $m_0$ ).** В зависимости от массы элементарные частицы подразделяются на легкие (*лептоны*), средние (*мезоны*) и тяжелые (*барионы*).

**П р и м е ч а н и е.** *Фотон* (или  $\gamma$ -квант) не имеет массы покоя.

В р е м я ж и з н и ( $t$ ). В зависимости от времени жизни различают *стабильные частицы* (электрон,  $t > 5 \cdot 10^{21}$  лет; протон,  $t > 5 \cdot 10^{31}$  лет; фотон; нейтрино), *квазистабильные частицы* – частицы, распадающиеся при слабом и электромагнитном взаимодействиях за время  $t > 5 \cdot 10^{-20}$  с (нейтрон,  $t \approx 900$  с), *резонансы* – частицы, распадающиеся за счет сильного взаимодействия за время  $t \leq 5 \cdot 10^{-23}$  с.

Э л е к т р и ч е с к и й з а р я д ( $q$ ). За основную единицу электрического заряда в микромире принят заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

П р и м е ч а н и е. Истинно нейтральные частицы – это частицы, у которых отсутствуют античастицы, например фотон,  $\pi^0$ -мезон,  $\eta^0$ -мезон.

С п и н ( $\tilde{s}$ ). Это собственный момент импульса частицы, имеющий квантовую природу (неотъемлемая характеристика частицы, такая же, как масса или заряд). В зависимости от спина все частицы, включая неэлементарные частицы и квазичастицы, подразделяют на *бозоны* – частицы с нулевым (мезоны) или целочисленным (фотоны, глюоны) спином и *фермионы* – частицы с полуцелым спином ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu$ ,  $p$ ,  $n$  и др.).

Д о п о л н и т е л ь н о к перечисленным выше характеристикам частиц вводят *внутренние квантовые числа*:

*лептонный заряд* (лептоны имеют  $L = 1$ , антилептоны –  $L = -1$ , а остальные частицы –  $L = 0$ );

*барионный заряд* (барионы имеют  $B = 1$ , антибарионы –  $B = -1$ , а остальные частицы –  $B = 0$ );

*четность* (определяет четность или нечетность  $\Psi$ -функции при пространственной инверсии);

*кварковые ароматы* (характеризуют тип кварка).

По характеру взаимодействия частицы объединяют в две большие группы:

- лептоны участвуют в процессах, обусловленных слабым и (за исключением нейтрино) электромагнитным взаимодействиями, но не участвуют в процессах сильного взаимодействия;

- адроны участвуют в процессах сильного взаимодействия (как правило, могут участвовать также в процессах электромагнитного и слабого взаимодействий).

Адроны подразделяют в соответствии с массой на мезоны и барионы.

Мезоны – это адроны с нулевым или целочисленным спином (иначе говоря, бозоны). К ним относят  $\pi$ -,  $K$ -,  $\eta$ -мезоны, а также *мезонные резонансы*.

Барионы – это адроны с полуцелым спином (иначе говоря, фермионы) и массой не менее массы протона. К ним относят нуклоны ( $p$ ,  $n$ ), *гипероны* и множество *барионных резонансов*.

Сводная классификация элементарных частиц приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Кванты полей	Лептоны	Адроны		
		Мезоны	Барионы	
Фотон, векторные бозоны, глюоны	$e, \mu, \tau, \nu$	$\pi, K, \eta$ и мезонные резонансы	Нуклоны	Гипероны
			$p, n$	$\Lambda, \Sigma, \Theta$ и барионные резонансы

**Кварковый уровень в микромире.** В 1964 г. американский физик, теоретик-экспериментатор из Калифорнийского технологического института М. Гелл-Манн для объяснения большого многообразия тяжелых частиц – адронов – предложил *кварковую модель* их строения. Согласно этой модели все адроны являются комбинациями кварков.

Сегодня принято говорить о шести типах кварков:  $d$  (down),  $u$  (up),  $s$  (strange),  $c$  (charm),  $b$  (beauty),  $t$  (truth). Каждый тип кварка является носителем определенного квантового свойства – аромата (strange –

странности, charm – шарма, beauty – красоты, truth – истинности) или не содержит такого вообще, как кварки  $d$ ,  $u$ .

Кварки – микрочастицы (не более  $10^{-15}$  м) со спином  $\check{s} = 1/2$  и электрическим зарядом  $q$ , кратным  $1/3^*$  ( $-1/3$  или  $+2/3$ ); в настоящее время они рассматриваются как элементарные бесструктурные образования.

Кварки, группируясь по двое либо по трое, образуют тот или иной адрон. При этом каждый барион состоит из трех кварков, а каждый мезон является композицией кварк – антикварк (соответствующий антикварк отличается от кварка знаками электрического заряда и аромата). В табл. 2.2 приведены кварковые формулы некоторых адронов.

Таблица 2.2

Частица	$p^+(1/2)$	$n^0(1/2)$	$\pi^+(0)$	$\pi^-(0)$	$\Omega^-(3/2)$
Кварковая формула	$uud (\uparrow\downarrow\uparrow)$	$udd (\uparrow\downarrow\uparrow)$	$u\bar{d} (\uparrow\downarrow)$	$\bar{u}d (\uparrow\downarrow)$	$sss (\uparrow\uparrow\uparrow)$
Примечание. В верхней строке в скобках указан спин частицы.					

На примере  $\Omega^-$ -гиперона возникает естественный вопрос о согласовании с принципом Паули, который, как известно, запрещает одинаковым фермионам (спин  $\check{s} = 1/2$ ) находиться в одном и том же состоянии. Чтобы устранить это «противоречие», вскоре после установления квантовых чисел кварков – ароматов ( $s$ ,  $c$ ,  $b$ ) – была введена дополнительная, внутренняя, степень свободы (внутреннее квантовое число), которую назвали *цветом*. Иначе говоря, каждый кварк может быть также охарактеризован в конкретном квантовом состоянии одним из трех цветов: красный ( $r$ ), зеленый ( $g$ ) и голубой ( $bl$ ). Получающаяся смесь разноцветных кварков – бесцветна, а цвет антикварка считается дополнительным (противоположным по знаку) к цвету соответствующего кварка, что также определяет бесцветность их композиции.

\* Электрический заряд  $q$  выражен в долях элементарного заряда  $e$ .

Таким образом, «противоречие» принципу Паули для кварковых композиций было устранено с помощью *принципа бесцветности адронов*. Этот принцип разрешает только те сочетания разноцветных кварков, которые дают в результате бесцветную смесь. В связи с этим  $\Omega^-$ -гиперон следует рассматривать как композицию из трех *s*-кварков разных цветов.

**Современные представления о формировании вещества.** На сегодня принято считать истинно элементарными частицами те, которые объединены в следующие три группы (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Лептоны	Кварки	Кванты полей
$e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ и соответствующие им античастицы (шесть видов), $\check{s} = 1/2$	$d, u, s, c, b, t$ и соответствующие им антикварки (шесть видов), $\check{s} = 1/2$	$\gamma$ -фотоны ( $m_0 = 0, \check{s} = 1$ ); векторные бозоны $W^-, W^+, Z^0$ ( $m_0 = 81 \dots 96$ ГэВ, $\check{s} = 1$ ); глюоны ( $m_0 = 0, \check{s} = 1$ ); гравитоны ( $m_0 = 0, \check{s} = 2$ )

По современным представлениям элементарные частицы со спином  $\check{s} = 1/2$  (лептоны и кварки) являются базовыми при формировании вещества, в связи с этим их часто называют *частицами вещества*.

Частицы с целым спином ( $\check{s} = 1, 2$ ) исполняют роль связующего звена: они обеспечивают образование сложных частиц (адронов) и взаимопревращение частиц с полуцелым спином  $\check{s} = 1/2$ , а также образование более сложных материальных структур (атомов, молекул и т. п.). Эти частицы – *кванты полей (виртуальные частицы)* – переносят фундаментальные взаимодействия между частицами вещества. В результате акта взаимодействия частица вещества приобретает импульс отдачи, а квант соответствующего поля (переносчик взаимодействия) поглощается ею. Виртуальные частицы нельзя зарегистрировать, но их действие можно оценить, измерить. Они проявляются, например, в виде световых и гравитационных волн, а иногда испускаются при

взаимодействии частиц вещества (например, испускание фотонов при аннигиляции пары электрон – позитрон).

Разнообразные эксперименты по прямому «просвечиванию» нуклонов ( $p$ ,  $n$ ) и других адронов электронами высоких энергий (около 1 ГэВ) позволили по результатам рассеяния электронов сделать вывод о сложном строении адронов, о наличии внутри адронов центров рассеяния – микрочастиц с электрическими зарядами  $q = -1/3$  или  $q = +2/3$ , т. е. кварков. Но многочисленные поиски свободных кварков оказались безуспешными: по-видимому, в свободном состоянии они не существуют. В соответствии с одной из гипотез кварк, получивший энергию в результате столкновения с электроном, не вылетает наружу из адрона, а затрачивает эту энергию на образование пар кварк – антикварк, т. е. на образование новых адронов, преимущественно мезонов. Так, например, образуются  $\pi$ -мезоны, которые сами участвуют в образовании ядра атома из нуклонов.

**Нуклонный, атомный и молекулярный уровни организации вещества.** Н у к л о н н ы й уровень организации материи представляет собой атомное ядро, состоящее из нуклонов (протонов и нейтронов). Порядковый номер химического элемента равен числу протонов  $Z$  в ядре данного элемента; число нейтронов  $N = A - Z$ , где  $A$  – массовое число элемента. Размер ядра примерно равен  $10^{-15} \dots 10^{-14}$  м. Заряд ядра  $q_y = +Ze$ , где  $+e$  – заряд протона.

А т о м н ы й уровень организации материи – это атом, который представляет собой единую квантовомеханическую систему, состоящую из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженной электронной оболочки. В нормальном (неионизированном) состоянии атом электрически нейтрален.

Электроны на своих орбитах удерживаются силами электрического притяжения между ними и ядром атома. Каждый электрон обладает

определенным запасом энергии, причем чем дальше электрон располагается от ядра, тем больше его энергия. Так как электрон не может пребывать в одном и том же энергетическом состоянии (на одной и той же орбите) наряду с другими электронами, то в оболочке электроны располагаются слоями. При этом в первом, ближайшем к ядру, слое может содержаться до двух электронов, во втором – до восьми, в третьем – до 18, в четвертом – до 32. После второго слоя орбиты также разделяются на подслои.

**Молекулярный** уровень организации вещества – это молекула как наименьшая структурная единица вещества, которая обладает его индивидуальными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединенных химическими связями. Различают одноатомные молекулы – атомы инертных газов, двухатомные молекулы, состоящие из одинаковых атомов, например  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $F_2$ ,  $Cl_2$ , и из разных атомов, например  $HCl$ ,  $NaCl$ ; молекулы сложных веществ ( $H_2O$ ,  $H_2SO_4$ ).

Среди внутримолекулярных связей отметим:

- *ионную связь*, образуемую в результате действия электростатических сил между противоположно заряженными ионами, из которых построены кристаллические решетки ионных веществ (ионные кристаллы);
- *ковалентную связь*, образуемую двумя или несколькими атомами в результате обобществления ими электронов.

## **2.5. Макроскопический уровень вещества и его состояния**

На этом уровне вещество может находиться в трех основных *агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом\**.

---

\* Часто эту классификацию дополняют «четвертым состоянием вещества» (по определению некоторых физиков) – *плазмой*, которая представляет собой частично или полностью ионизованный газ, где положительно и отрицательно заряженные частицы (обычно положительные ионы и свободные электроны) компенсируют свои электрические заряды. Плазма в целом электрически нейтральна (точнее,



Учение о строении и свойствах макротел (газ, жидкость, твердое тело), основанное на представлениях об атомах и молекулах, называется *молекулярно-кинетической теорией*.

Основными положениями теории являются:

1) вещество состоит из большого числа атомов и молекул;  
2) атомы и молекулы любого вещества находятся в постоянном хаотическом тепловом движении, интенсивность которого определяется температурой;

3) между атомами и молекулами действуют силы взаимного притяжения и отталкивания (при  $r \geq 10^{-9}$  м преобладают силы притяжения, а при  $r < 10^{-9}$  м – силы отталкивания).

Тепловое движение атомов и молекул имеет особенности, присущие тому или иному агрегатному состоянию вещества:

– межмолекулярное взаимодействие практически отсутствует (пренебрежимо мало) в газах ввиду больших расстояний между частицами;

– в твердых телах силы притяжения и отталкивания, действующие между атомами и молекулами, уравновешиваются, т. е. результирующая сила равна нулю;

– молекулы жидкости колеблются около положения равновесия, а по истечении некоторого времени скачкообразно переходят в новые положения равновесия, где и продолжают свои колебания. Эти периодические переходы молекул определяют характерное для жидкости свойство – текучесть.

## **2.6. Крупные структурные объединения материи.**

### **Пространственно-временная шкала объединений**

---

квaziнейтральна). Так, плазменное состояние возможно, если газ находится в сильном электрическом поле ( $E \geq 10^8$  В/см) или нагрет до очень высокой температуры ( $T \geq 10^3 \dots 10^4$  К).

В структуре материи принято выделять следующие крупные объединения (рис. 2.3).

*Микромир* – мир крайне малых, непосредственно (невооруженным глазом) не наблюдаемых объектов с характерными линейными размерами



**Рис. 2.3.** Пространственная шкала структурных объединений материи

$l$ , изменяющимися в пределах  $\sim 10^{-18} \dots 10^{-10}$  м, и временами жизни, находящимися в очень широком диапазоне  $\sim 10^{-24}$  с ...  $\infty$ .

*Макромир* – мир макрообъектов (макротел), размеры которых сопоставимы с земными масштабами (с масштабами обыденного человеческого опыта), т. е. выражаются в миллиметрах, сантиметрах, километрах, а продолжительность процессов измеряется в секундах, минутах, часах, годах.

*Мегамир* – мир мегаобъектов, характеризуемых космическими масштабами пространства и огромными скоростями (скорости соизмеримы со световой скоростью). Пространство измеряется в астрономических единицах (световой год, парсек; 1 парсек = 3,3 светового года  $\approx 3,1 \cdot 10^{16}$  м), время измеряется в миллионах и миллиардах лет.

## 2.7. Теории развития Вселенной

На рубеже XIX–XX вв. в космологических представлениях доминировало мнение, согласно которому за пределами нашей галактики («Млечный путь») нет никаких звездных систем (других галактик), а окружающая нас Вселенная находится в статическом состоянии (*теория*

*стационарного состояния*) и ее размеры с течением времени не изменяются.

Общим в разновидностях теории стационарного состояния было представление о стационарности Вселенной, т. е. предполагалось, что вся Вселенная не эволюционирует, изменяться могут только отдельные космические объекты.

Пространство и время обычно рассматривались метрически бесконечными, однородными и изотропными. Но еще И. Ньютон в конце XVII в., предполагая всеобщность сил притяжения между массами и исходя в своих рассуждениях о стационарном устройстве мира из первоначально равномерного распределения вещества в пространстве, не исключал при образовании скоплений космических тел (планетных и звездных систем) развития гравитационной неустойчивости.

В 1916 – 1917 гг. А. Эйнштейн при разработке общей теории относительности (релятивистская теория гравитации), в целом разделяя убеждение И. Ньютона о неподвижности звезд относительно друг друга, вводит в свою систему уравнений дополнительное слагаемое  $\lambda$ , которое в математической форме должно было отобразить наличие в космологическом плане сил отталкивания неведомой природы.

Ситуация изменилась к 1920-м годам, когда большой багаж накопленных экспериментальных данных (обнаружены другие галактики; открыто смещение спектров ряда звезд в красную область) не находился в согласии с результатами математических расчетов по существовавшим стационарным моделям. Ученые пришли к необходимости разработки новых моделей устройства мира – *динамических моделей*, которые предполагали *нестационарность* Вселенной. Были предложены следующие возможные варианты:

- Вселенная и ее пространство расширяются с течением времени;
- Вселенная сжимается;

- чередуются циклы сжатия и расширения пространства.

Дискутировались также изотропность и однородность свойств Вселенной.

Так, советский физик А.А. Фридман в 1924 г. на основании полученного им решения исходной системы уравнений Эйнштейна показал наличие гравитационной неустойчивости у Вселенной. По отношению средней плотности вещества во Вселенной к ее критическому значению он предложил делать заключение о расширении (или сжатии) пространства.

## 2.8. Состав Вселенной, структура и типы галактик

В составе обозримой Вселенной выделяют отдельные *галактики*, в которые входят звезды и звездные системы, скопления галактик, а также скопления газа и пыли (последние часто называют *диффузной материей*). Часто всё выше перечисленное называют *метагалактикой*\*.

В центре галактики (ядро галактики) обычно располагается звездное скопление, но может находиться и *черная дыра* – особый космический объект с чрезвычайно высокой плотностью (до  $10^{33}$  кг/м<sup>3</sup>), образовавшийся в результате гравитационного коллапса (схлопывания) некоторой неустойчивой звезды. Скопление большой массы в пределах относительно малой (по космическим масштабам) области\*\* пространства обеспечивает гравитационное притяжение и захват черной дырой любых материальных образований вокруг себя, включая даже фотоны как собственного, так и стороннего излучения. В результате данный объект становится невидимым буквально. Часто под черной дырой понимают область пространства-

---

\* Под метагалактикой обычно понимают ту часть Вселенной, которая доступна для наблюдения современными астрономическими средствами.

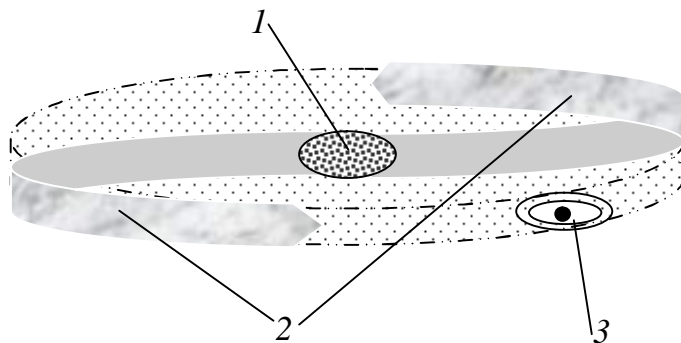
\*\* Размер области не превышает *гравитационного радиуса*  $r_g = 2Gm/c^2$ , где  $m$  – сколлапсировавшая масса,  $G$  – гравитационная постоянная,  $c$  – скорость света в вакууме.

времени, где вторая космическая скорость равна скорости света в вакууме, т. е.  $c = 3 \cdot 10^5$  км/с.

Характерный размер любой галактики намного меньше размера познанной Вселенной. Некоторые из галактик обнаруживаются лишь по очень сильному радиоизлучению (это *радиогалактики*).

Различают по форме следующие типы галактик:

- *спиральные*, к ним, в частности, относится наша галактика «Млечный путь» (рис. 2.4), имеющая два спиральных рукава и ядро, состоящее из скопления звезд;



**Рис. 2.4.** Схема галактики «Млечный путь»: 1 – ядро; 2 – спиральные рукава; 3 – Солнечная система.

- *эллиптические*;
- *неправильные*.

На сегодня установлено, что все пространство Вселенной равномерно заполнено галактиками, между которыми действует закон всемирного тяготения, а вся Вселенная расширяется (об этом свидетельствует «красное смещение» спектров излучения звезд в результате эффекта Доплера).

*Закон расширения* согласно Э. Хаббл (США) имеет вид

$$v = H \cdot r,$$

где  $v$  – скорость удаления объекта (например, галактики);  $r$  – расстояние до объекта, Мпк ( $1 \text{ Мпк} \approx 3,1 \cdot 10^{22}$  м);  $H = 65$  – постоянная Хаббла, км/(с·Мпк).

Он гласит: «Чем дальше от нас галактика, тем больше ее скорость и смещение спектра излучения в красную область». Так, например, квазары (по-видимому, активные ядра новых галактик) имеют субсветовые скорости. Принято считать, что закон, предложенный Э. Хабблом, выполняется для объектов, находящихся от нас на расстоянии  $r > 10 \dots 20$  Мпк. Поскольку постоянная Хаббла также определяет увеличение объема Вселенной, то по величине, обратной  $H$ , можно оценить возраст Вселенной:  $H^{-1} \approx 15,4$  млрд. лет.

## 2.9. Теория эволюции Вселенной и ее этапы

Рассмотрим модель горячей Вселенной, предложенную американским физиком Г. Гамовым в 1948 г. и оформившуюся в дальнейшем в *теорию Большого взрыва*.

В начале 1965 г. А. Пензиасом и Р. Вильсоном (США) было открыто так называемое *реликтовое* (остаточное) *излучение*, пронизывающее все пространство Вселенной и отвечающее средней температуре  $T \approx 3$  К. Это хорошо согласуется с исходным теоретическим положением о том, что около  $10^{10}$  лет назад вся метагалактика находилась в так называемом *сингулярном состоянии* с «бесконечно» большой плотностью ( $\rho \approx 10^{33}$  кг/м<sup>3</sup>) и чрезвычайно высокой температурой ( $T \approx 10^{12}$  К). Таким образом, в сингулярном состоянии Вселенная представляла собой точечный микрообъект размером порядка  $10^{-35}$  м.

Затем произошел, как сейчас принято говорить Большой взрыв, и Вселенная начала расширяться. По современным оценкам от Большого взрыва до наших дней прошло порядка 20 млрд лет.

В настоящее время эволюцию Вселенной от момента Большого взрыва до наших дней принято подразделять на четыре этапа.

1. *Адронная эра* (длилась до момента времени  $t = 10^{-4}$  с) – этап образования тяжелых частиц – барионов и мезонов; на этом этапе средняя

плотность материи  $\rho \geq 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>, температура  $T \leq 10^{12}$  К. Существуют протон и антипротон, нейтрон и фотон, но отсутствует полная зарядовая симметрия. Наличие избытка нуклонов определяет реликтовое излучение, которое регистрируется и сегодня.

2. *Лептонная эра* (длилась до момента времени  $t = 10$  с) – этап с характерными плотностью материи  $\rho \approx 10^7$  кг/м<sup>3</sup> и температурой  $T \approx 5 \cdot 10^9$  К. Началу этого этапа свойственно равномерное распределение энергии между фотонами, электронами и позитронами, мезонами, нейтрино и антинейтрино. Нейтрино, образовавшиеся в процессе распада протонов, обособлены от других частиц и несут информацию об этом периоде до наших дней. По мере уменьшения температуры в ходе термоядерных реакций образуются изотопы водорода и гелия.

3. *Эра фотонной плазмы* (длилась до момента времени  $t = 10^{13}$  с = 1 млн лет) – этап с характерными плотностью материи  $\rho \approx 10^{-18}$  кг/м<sup>3</sup> и температурой  $T \approx 3 \cdot 10^3$  К. На этом этапе шло интенсивное рассеяние фотонов на электронах, обеспечивающее зарядовую нейтральность вещества Вселенной. Так как при  $T \approx 3 \cdot 10^3$  К энергия  $\gamma$ -квантов значительно уменьшается, то они перестают ионизовать атомы водорода, которые начинают накапливаться во Вселенной. Происходит, как говорят, «отрыв» излучения от вещества, и главную роль начинает играть вещество, а не излучение, как это было на ранних этапах.

4. *Послерекомбинационная эра* – этап накопления и структуризации космического вещества, продолжается до настоящего времени. С некоторого момента времени этого периода при средней плотности материи  $\rho \approx 10^{-20}$  кг/м<sup>3</sup> начали формироваться галактики и звезды.

## 2.10. Единство микро- и мегамиров

Учитывая сказанное выше, можно заключить:

- микромир – это мир элементарных (первичных) частиц, из которых строится вещество;
- макромир – совокупность физических объектов, составляющих мир в пределах обозримой Вселенной;
- мегамир – понятие более широкое в сравнении со Вселенной, включает в себя и миры за пределами нашего реального восприятия.

Стыковка и взаимная обусловленность понятий «мегамир» и «микромир» приходятся на середину XX в., когда ученые стали получать данные о строении вещества и об эволюции Вселенной едиными методами, с помощью микрочастиц. Микрочастицы, например нейтрино, несут большую информацию о строении Вселенной и мегамире.

Вообще проблемы Вселенной и элементарных частиц тесно связаны между собой. Можно припомнить, что впервые с нейтрино столкнулись при исследовании  $\beta$ -распада ядер, но затем они были обнаружены в ходе изучения космических лучей. Иначе говоря, познание мегамира идет через освоение микромира, задачи физики элементарных частиц (регистрация нейтринных потоков) становятся задачами космологическими.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Как следует рассматривать природные объекты с позиций системности?
2. В каком случае множество природных объектов воспринимается как целостная система?
3. Назовите формы существования материи и их особенности.
4. Чем обусловлена высокая стабильность атомных ядер? Могут ли ядерные поля образовывать макротела?
5. Дайте определение физического вакуума в трактовке Дирака. При какой энергии фотонов в земной атмосфере образуются электронно-позитронные пары?



6. Перечислите основные уровни вещества в микромире.
7. Назовите основные характеристики элементарных частиц. Как проводится классификация элементарных частиц?
8. Перечислите принципы построения адронов согласно кварковой модели Гелл-Манна.
9. Какие элементарные частицы являются базовыми при формировании вещества?
10. Какую роль выполняют частицы с целым спином?
11. Какими силами удерживаются электроны на орбитах в атомах?
12. Назовите наименьшую структурную единицу вещества, обладающую его основными химическими свойствами.
13. Какая химическая связь определяет структуру кристалла NaCl ?
14. Что называют четвертым состоянием вещества, при каких условиях оно образуется?
15. Как объясняет молекулярно-кинетическая теория текучесть жидкостей?
16. Назовите характерные пространственно-временные масштабы, присущие микромиру, макромиру, мегамиру.
17. Какой теории развития Вселенной придерживались И. Ньютон и А. Эйнштейн?
18. Какие теории доминируют в современной космологии?
19. Перечислите основной состав Вселенной. К какому типу галактик относится галактика «Млечный путь»?
20. Что определяет закон, предложенный Э. Хабблом?
21. Назовите основные положения теории Большого взрыва. Какие факты подтверждают эту теорию?
22. Какие этапы прошла Вселенная в своей эволюции?
23. Что объединяет микро-, макро- и мегамиры?

### 3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДЕ И ИХ ОБЪЕДИНЕНИЯ

Существование материального объекта предполагает нахождение его в состоянии *движения и взаимодействия*. Движение и взаимодействие взаимно дополняют друг друга, их следует рассматривать как двуединое понятие.

Движение и взаимодействие являются *способом существования материи*.

Основные (внешние) *формы движения материи* – это *механическая, физическая, химическая, биологическая, социальная* формы.

Любая форма движения в ходе соответствующего анализа сводится к проявлению тех или иных *фундаментальных взаимодействий* материи (гравитационного, электромагнитного, сильного и слабого).

Взаимодействие любого типа обязательно предполагает наличие передающей среды, иначе говоря, физического поля.

Количественной мерой фундаментального взаимодействия (с позиций квантовой теории поля) является *заряд* как некая обобщенная характеристика.

#### 3.1. Силовые взаимодействия и их математическое

##### **описание: гамильтонов и лагранжев подходы**

При объяснении строения окружающего нас мира возникают (уже на уровне микромира) по крайней мере три проблемы:

- необходимость классификации элементарных частиц<sup>\*</sup>, из которых состоит материя;

---

<sup>\*</sup> Вопросы, связанные с классификацией (систематикой) частиц, были в основном рассмотрены в главе 2. В дальнейшем придется ввести еще некоторые дополнительные дефиниции для элементарных частиц при рассмотрении положений квантовых теорий.

- познание сил, действующих на частицы;
- расчет движения частиц под действием установленных сил.

Следует вспомнить, что силы в классической физике вводятся с помощью законов механики Ньютона. Так, второй закон Ньютона

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F} \quad (3.1)$$

используют, чтобы определить движение объекта, если задана любая сила  $\vec{F}$ , действующая на объект.

В другом математическом формализме классической механики используют уравнения Гамильтона (предложены ирландским математиком в 1834 г.)

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

где  $t$  – время;  $N$  – число степеней свободы;  $q_i$  и  $p_i$  – обобщенные координаты и обобщенные импульсы рассматриваемой механической системы (их совокупность называют каноническими переменными);  $H(q_i, p_i, t)$  – функция Гамильтона, равная (в случае независимости связей между элементами системы от времени и потенциальности действующих сил) сумме кинетической и потенциальной энергий системы, т. е. ее полной энергии.

И наконец, можно составить так называемые уравнения Лагранжа (предложены французским математиком в 1780 г.), которые в случае действия на механическую систему только потенциальных сил имеют вид

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.3)$$

где  $L(q_i, \dot{q}_i, t)$  – функция Лагранжа (или кинетический потенциал);  $q_i$  и  $\dot{q}_i$  – обобщенные координаты и обобщенные скорости для консервативной системы. Можно записать:  $L(q_i, \dot{q}_i, t) = K(q_i, \dot{q}_i, t) - U(q_i)$ , где  $K(q_i, \dot{q}_i, t)$  и  $U(q_i)$  – соответственно кинетическая и потенциальная энергии системы.

Часто выражение для функции  $L$  используют для нахождения важной характеристики движения механической системы – *действия* (действия по Гамильтону за промежуток времени  $t$ ), которое определяется интегралом  $\int_0^t L dt$ . Применяя *принцип наименьшего действия* при анализе возможных траекторий системы, записывают дифференциальные уравнения 2-го порядка вида (3.3), интегрируют их с использованием начальных и краевых условий и в итоге устанавливают закон движения системы, т. е. находят функции  $q_i(t)$ .

Понятие «функция Лагранжа»  $L$  распространяется также на системы с бесконечным числом степеней свободы, т. е. на классические физические поля, где в качестве обобщенных координат и импульсов используют соответствующие функции поля  $A_i$  и их производные по времени в каждой точке пространства-времени. В *классической теории поля*, как и в классической механике, используя функцию  $L$ , посредством принципа наименьшего действия получают уравнения движения самого поля.

**Примечание.** Существует связь между функциями Гамильтона и Лагранжа:  $H(q_i, p_i, t) = \left\{ \sum_i p_i \cdot \dot{q}_i - L(q_i, \dot{q}_i, t) \right\}_{\dot{q}_i \rightarrow p_i}$ . При расчетах по этой формуле проводится одновременное преобразование обобщенных скоростей в обобщенные импульсы. В целом по своему назначению (установление закона движения системы) уравнения Гамильтона и уравнения Лагранжа эквивалентны уравнению второго закона Ньютона.

В квантовой теории ситуация аналогична ситуации в классической физике. Так, в квантовой нерелятивистской механике используют уравнение Шрёдингера (получено австрийским физиком в 1926 г.)

$$i \cdot \hbar \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi, \quad (3.4)$$

которое по своему назначению подобно уравнению Ньютона. В уравнении (3.4)  $\hat{H}$  – *гамильтониан*, т. е. оператор, который определяет изменение во

времени состояния квантовой системы (через волновую функцию  $\Psi$ ), а в случае стационарного потенциального поля ( $U = \text{const}$ ) становится оператором полной энергии  $\hat{H} = (\hat{K} + \hat{U}) = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U \right)$  и определяет соответствующее стационарное уравнение Шрёдингера  $\hat{H}\Psi = E \cdot \Psi$ . Формально гамильтониан может быть получен заменой обобщенных координат и импульсов в функции Гамильтона  $H(q_i, p_i, t)$  классической механики соответствующими операторами  $(\hat{q}_i, \hat{p}_i)$ , подчиняющимися коммутационным соотношениям вида  $\hat{q}_i \cdot \hat{p}_i - \hat{p}_i \cdot \hat{q}_i = i \cdot \hbar$ .

В квантовой теории поля функции поля  $A_i$ , служащие обобщенными координатами в классической теории поля, сами становятся операторами.

Для системы взаимодействующих квантовых полей гамильтониан  $\hat{H}$  представляет собой сумму операторов энергии свободных полей и энергии их взаимодействия.

Гамильтониан определяет уравнения движения поля, однако *гамильтонов подход* является менее универсальным, чем *лагранжев подход*: гамильтониан не дает релятивистски-инвариантного описания системы (одна энергия в разных инерциальных системах отсчета неодинакова).

Релятивистской инвариантностью обладает функция Лагранжа (точнее, ее плотность – величина  $L$ , приходящаяся на единицу объема поля); кроме того,  $L$ -функция обладает рядом свойств, связанных с ее симметрией.

В квантовой теории поля роль  $L$ -функции играет *лагранжиан*  $\hat{L}$  – по сути, некоторый операторный комплекс. Вид лагранжиана  $\hat{L}$  связан с функцией Лагранжа  $L$  для классического поля принципом соответствия, согласно которому (с формальной точки зрения) в пределе, когда постоянная Планка  $\hbar \rightarrow 0$ , квантовомеханическое описание физических

объектов должно переходить в классическое. Это происходит, когда квантовые числа, характеризующие состояние физической системы (например, орбитальное квантовое число  $l$ ), становятся велики и система уже не воспринимается как микрообъект.

Лагранжиан  $\hat{L}$  полностью определяет ту или иную квантовую теорию, позволяет вывести уравнение для взаимодействующих квантовых полей и записать *матрицу рассеяния*, т. е. комплекс величин, отражающих процесс перехода квантовых микросистем из одних состояний в другие при их взаимодействии (иначе говоря, рассеянии).

Лагранжев подход является более универсальным, чем гамильтонов, в частности, он справедлив и в нелокальных теориях полей, в которых гамильтонов подход неприменим. *Нелокальная теория поля* рассматривается как обобщение квантовой теории поля, основанное на неточности взаимодействия и введении специальных форм-факторов (при этом предполагается особое «размазывание» взаимодействия частиц по некоторой области пространства-времени).

Для каждого типа фундаментального взаимодействия выводится и записывается свой лагранжиан. Запись лагранжиана  $\hat{L}$  достаточно сложна. Например, для электромагнитного взаимодействия частиц с электрическим зарядом  $Q$

$$\hat{L}_{\text{элм}} = Q \cdot A_{\mu} \cdot [\tilde{e}_L \cdot \gamma_{\mu} \cdot e_L + \tilde{e}_R \cdot \gamma_{\mu} \cdot e_R], \quad (3.5)$$

где  $A_{\mu}$  – операторная величина, описывающая векторное электромагнитное поле;  $\mu = 0, 1, 2, 3$ ;  $\gamma_{\mu}$  – матрицы Дирака;  $e_{L, R}$  и  $\tilde{e}_{L, R}$  – спинорные состояния электронов и позитронов с  $SU(2)$ -симметрией ( $L$  – «левые» и  $R$  – «правые» спиноры соответственно).

### 3.2. Графическая формализация фундаментальных взаимодействий.

#### Фейнмановские диаграммы

В квантовой физике часто применяется *метод теории возмущений*. Для анализа протекающих процессов с участием элементарных частиц этот метод предполагает постепенное включение в рассмотрение все большего числа актов взаимодействия свободных частиц. При этом каждый акт взаимодействия легко представить графически.

Такие графические иллюстрации впервые были введены американским физиком Р. Фейнманом и впоследствии были названы в честь него *фейнмановскими диаграммами*.

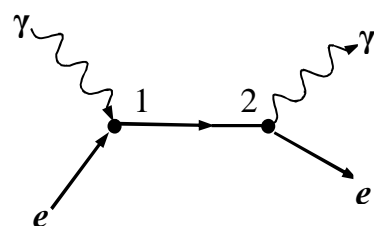
Правила построения диаграмм:

- сплошной линией со стрелкой (последняя указывает направление распространения) обозначают свободную частицу вещества (например, электрон);
- волнистой линией обозначают виртуальную частицу – квант поля;
- точками (1, 2, ...) обозначают акты взаимодействия частиц.

Обычно ось времени на этих диаграммах направляют слева направо, а количество актов взаимодействия частиц (точек на диаграмме) определяет порядок диаграммы.

□ **Пример 3.1.** *Эффект Комптона.*

На рис. 3.1 показана диаграмма 2-го порядка, она отражает рассеяние фотона на электроном: вначале присутствуют свободные электрон  $e$  и фотон  $\gamma$ , которые в точке 1 встречаются, происходит поглощение фотона электроном и переход последнего в промежуточное состояние (1 – 2); в точке 2 электрон испускает новый фотон  $\gamma'$  и переходит в новое состояние  $e'$ .

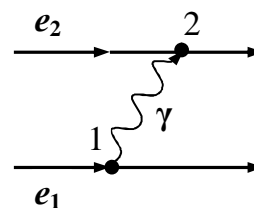


**Рис. 3.1.** Фейнмановская диаграмма эффекта Комптона

- **Пример 3.2.** Акт электромагнитного взаимодействия электронов.

На рис. 3.2 также показана диаграмма 2-го порядка, которая отражает процесс обмена фотоном между двумя электронами: один электрон  $e_1$  в точке 1 испускает фотон  $\gamma$ ,

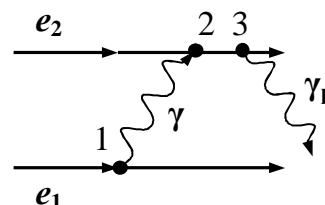
- который затем в точке 2 поглощается вторым электроном  $e_2$ .



**Рис. 3.2.** Фейнмановская диаграмма акта электромагнитного взаимодействия электронов

- **Пример 3.3.** Рентгеновское излучение

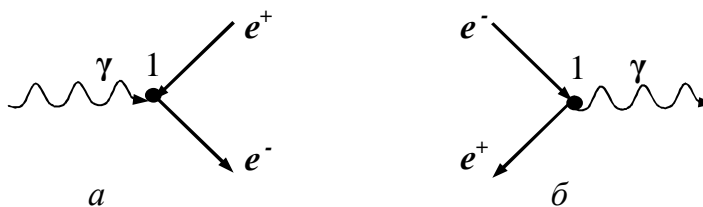
На рис. 3.3 приведена диаграмма 3-го порядка, она отражает взаимодействие двух электронов  $e_1$  и  $e_2$  с испусканием фотона рентгеновского излучения  $\gamma_p$ .



**Рис. 3.3.** Фейнмановская диаграмма акта рентгеновского излучения

- **Пример 3.4.** Рождение пары  $e^- - e^+$ . Аннигиляция пары  $e^- - e^+$ .

На рис. 3.4 – диаграммы 1-го порядка, они отражают элементарные процессы при прохождении космического излучения через земную атмосферу.



**Рис. 3.4.** Фейнмановские диаграммы:

$a$  – акт рождения пары  $e^- - e^+$ ;  $b$  – акт аннигиляции пары  $e^- - e^+$

Фейнмановская диаграмма позволяет также с помощью определенных математических правил записать выражение для соответствующего матричного элемента и по нему вычислить вероятность



рассматриваемого квантового перехода. Вклад каждой вершины (точки) диаграммы в амплитуду процесса (а квадрат амплитуды, как известно, определяет вероятность процесса) пропорционален *константе связи* тех частиц (или полей), линии которых сходятся в вершине.

На всех приведенных диаграммах такой константой связи является электрический заряд  $e$ . Чем больше вершин содержит диаграмма, тем в более высокой степени входит заряд в соответствующее выражение для амплитуды. Так, амплитуды процессов, изображенных на рис. 3.1 и 3.2, пропорциональны  $e^2$ , а амплитуда процесса, изображенного на рис. 3.3 пропорциональна  $e^3$ .

### **3.3. Понятия калибровочной симметрии и калибровочного преобразования**

Как известно, в физике различают четыре типа фундаментальных взаимодействий материи: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Соответственно выделяют четыре группы элементарных частиц:

- адроны, которые участвуют во всех типах взаимодействий;
- лептоны, не участвующие только в процессах сильного взаимодействия;
- фотоны, ответственные за процессы электромагнитного взаимодействия;
- гравитоны, служащие переносчиками гравитационного взаимодействия.

Каждая группа частиц характеризуется своими специфическими законами сохранения. Так, с большой точностью установлено сохранение электрического заряда  $Q$ , барионного заряда  $B$ , лептонных зарядов  $L_e$ ,  $L_\tau$ . При сильном взаимодействии выполняются также частные законы

сохранения изотопического спина  $I_s$ , аромата ( $s, c, b$ ), которые нарушаются в процессах электромагнитного и слабого взаимодействий.

Иначе говоря, каждый из названных законов сохранения отражает определенную *внутреннюю симметрию* уравнений движения для соответствующего квантового поля.

Если, например, каким-то образом удалось бы исключить электромагнитное и слабое взаимодействия, то оказалось бы, что протон и нейтрон, как представители адронов, неразличимы. А поскольку протон и нейтрон – квантовые объекты, описываемые волновыми функциями  $\psi_p(\vec{r}, t)$  и  $\psi_n(\vec{r}, t)$ , то невозможно различить не только эти частицы, но и любую их суперпозицию, которую можно представить как поворот на некоторый угол  $\varphi$  в так называемом изотопическом пространстве. Это и есть внутренняя симметрия уравнений, соответствующая закону сохранения изотопического спина  $I_s$  (иначе эту симметрию называют изотопической инвариантностью).

*Калибровочной симметрией* называют целый класс внутренних симметрий уравнений теории поля (симметрий уравнений движения в квантовой теории поля, где саму симметрию связывают со свойствами элементарных частиц), характеризуемых определенными параметрами, зависящими от пространственно-временной точки  $A(\vec{r}, t)$ .

Если в некоторой лабораторной системе отсчета протон (нейтрон) определяют как частицу, состояние которой описывается одной комбинацией (суперпозицией) волновых функций  $\psi_p$  и  $\psi_n$ , а в другой системе отсчета – иной комбинацией, т. е. сам угол поворота  $\varphi$  в изотопическом пространстве становится зависящим от координат пространства-времени:  $\varphi = \varphi(\vec{r}, t)$ , то такой поворот на угол  $\varphi(\vec{r}, t)$  принято называть *калибровочным преобразованием*. При этом если законы природы не зависят от такого локального произвола в выборе суперпозиций

функций  $\psi_p$  и  $\psi_n$ , то в уравнениях движения неизбежно появляется слагаемое, учитывающее взаимодействие частиц. Так, уравнение движения свободного релятивистского нуклона (уравнение Дирака) содержит производные волновой функции  $\psi$  по времени и по координате, поэтому при повороте на угол  $\varphi(\vec{r}, t)$  уравнение приобретет добавку, пропорциональную производным угла  $\varphi$  по времени  $t$  и по координате  $r$  (т. е. добавку с  $\dot{\varphi}$  и  $d\varphi/dr$ ). Эта добавка в преобразованиях Лоренца изменяется как четырехмерный вектор и, чтобы ее компенсировать, в уравнение движения добавляют специальные векторные поля с подобной добавкой ( $\dot{\varphi}$ ,  $d\varphi/dr$ ), но взятой с обратным знаком.

Следовательно, калибровочная симметрия приводит к необходимости введения особых *векторных калибровочных полей*, обмен квантами которых обуславливает рассматриваемые взаимодействия частиц.

### 3.4. Квантовая электродинамика

Совсем не обязательно, чтобы в ходе калибровочных преобразований происходило изменение комбинации разных частиц (таких, как протон и нейтрон). В *квантовой электродинамике* для этой цели служат действительная и мнимая части волновой функции электрона  $\psi_e$ , а вместо изотопического пространства используется плоскость комплексного переменного, где по одной оси откладывается действительная часть  $\psi_e$ , а по другой – мнимая часть.

Комплексную функцию  $\psi_e$  можно представить в виде произведения ее модуля и соответствующего фазового множителя. Поворот в плоскости комплексного переменного на угол  $\varphi$  сведется к изменению фазового множителя, т. е. к умножению  $\psi_e$  на новый фазовый множитель:

$$\psi_e(\vec{r}, t) \rightarrow \psi_e' = \psi_e(\vec{r}, t) \exp[i e \varphi(\vec{r}, t)], \quad (3.6)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $\psi_e'$  – преобразованная волновая функция.

При последующей подстановке преобразованной  $\psi_e'$ -функции в уравнение Дирака, описывающее движение свободного релятивистского электрона, т. е. в уравнение вида

$$\sum_{\mu=0}^3 \gamma_{\mu} \frac{\partial \psi_e(q^{\mu})}{\partial q_{-\mu}} - \frac{mc}{i\hbar} \psi_e(q^{\mu}) = 0 \quad (3.7)$$

появляется добавка  $\left[ i e \sum_{\mu=0}^3 \gamma_{\mu} \frac{\partial \phi(q^{\mu})}{\partial q_{\mu}} \psi_e(q^{\mu}) \right]$ , нарушающая его калиб-

ровочную симметрию (калибровочную инвариантность). Здесь  $\gamma_{\mu}$  –

матрицы Дирака:  $\gamma_0 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix}$ ,  $\gamma_{\alpha=1,2,3} = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_{\alpha} \\ -\sigma_{\alpha} & 0 \end{pmatrix}$ , в которых

$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $\sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ ,  $\sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ ;  $q^{\mu}$  – обобщенная четырех-

мерная координата с компонентами  $q^0 = t$ ,  $q^1 = x$ ,  $q^2 = y$ ,  $q^3 = z$ ;

$\partial / \partial q_{-\mu} = (\partial / \partial t; -\partial / \partial x, -\partial / \partial y, -\partial / \partial z)$ ,  $\partial / \partial q_{\mu} = (\partial / \partial t; \partial / \partial x, \partial / \partial y, \partial / \partial z)$  –

операторы частных производных.

Чтобы обеспечить симметрию и компенсировать возникшую добавку, необходимо приписать к правой части уравнения (3.7) следующее

выражение  $\left[ i \cdot e \cdot \sum_{\mu=0}^3 \gamma_{\mu} \cdot A_{\mu}(q^{\mu}) \cdot \psi_e(q^{\mu}) \right]$ , где  $A_{\mu}(q^{\mu})$  – векторное калибровочное

поле, которое в ходе соответствующих калибровочных преобразований переходит в сумму  $[A_{\mu}(q^{\mu}) + \partial \phi(q^{\mu}) / \partial q_{\mu}]$ .

Таким образом, для выполнения требования калибровочной инвариантности электрон должен взаимодействовать с некоторым векторным полем  $A_{\mu}$ . Если записать уравнения для этого поля так, чтобы они сами были калибровочно-инвариантными, то получим в итоге хорошо известные уравнения Максвелла. Следовательно, компенсирующим (калибровочным) полем для калибровочного преобразования  $\psi_e$ -функции

является электромагнитное поле, а калибрующей частицей – фотон (безмассовая частица со спином  $\check{s} = 1$ ).

### 3.5. Квантовая хромодинамика

В *квантовой хромодинамике*\* (квантовой теории сильных взаимодействий), описывающей динамику кварков, все изложенные выше рассуждения остаются в силе, а к калибровочным преобразованиям кроме изменения фазы добавляется изменение цвета (цветности кварков). Последнее объясняется тем, что при наличии симметрии цвет не наблюдаем, как и фаза. Указанное преобразование может быть записано через волновые функции следующим образом:

$$\psi^\alpha(q^\mu) \rightarrow \psi' = \sum_{\beta} \psi^\beta(q^\mu) \cdot \exp[i \cdot \varphi_{\beta}^{\alpha}(q^\mu)] \quad (3.8)$$

где индекс  $\mu = 0, 1, 2, 3$  – определяет одну из обобщенных координат  $q^\mu$ ; индексы  $\alpha$  и  $\beta = 1, 2, 3$  – соответствуют трем возможным значениям цвета кварков (красный, зеленый, синий). Поскольку цвет кварка выполняет функцию заряда, то в результате преобразований вида (3.8) вместо одной фазы (как в случае электромагнитного взаимодействия) появляются восемь изменяющих цвет фаз  $\varphi_{\beta}^{\alpha}(q^\mu)$  и девятая компонента фазы  $\varphi_{\alpha}^{\alpha}(q^\mu)$ , соответствующая общей фазе; при этом сумма  $\sum_{\alpha} \varphi_{\alpha}^{\alpha}(q^\mu)$  соответствует условию сохранения барионного заряда ( $B = \text{const}$ ).

Чтобы компенсировать (прокалибровать) изменение в уравнениях движения, в этом случае приходится вводить восемь цветных *глюонных полей* (их также называют полями Янга – Миллса), т. е. восемь векторных калибровочных полей. Квантами этих полей являются цветные безмассовые *глюоны* – частицы со спином  $\check{s} = 1$ . Именно посредством

---

\* *Хромос* в переводе с греческого – цвет.

обмена глюонами осуществляются взаимодействие между кварками и образование адронов.

Поскольку в отличие от фотонов – истинно нейтральных частиц – глюоны, как и сами кварки, оказываются заряженными определенным цветом, они также должны взаимодействовать посредством испускания и поглощения глюонов. Таким образом, уравнения для глюонного поля (по сравнению с уравнениями Максвелла в вакууме) становятся нелинейными. Такие калибровочные поля называют *неабелевыми*.

### 3.6. Теории слабого и электрослабого взаимодействий

Слабое взаимодействие занимает особое положение в структуре фундаментальных взаимодействий. Обладая самым малым радиусом действия  $r \approx 10^{-18}$  м (примерно на три порядка меньше радиуса сильного взаимодействия), слабое взаимодействие отличается также и очень низкой интенсивностью ( $I \approx 10^{-14}$  отн. ед.), что проявляется в относительной медлительности связанных с ним процессов.

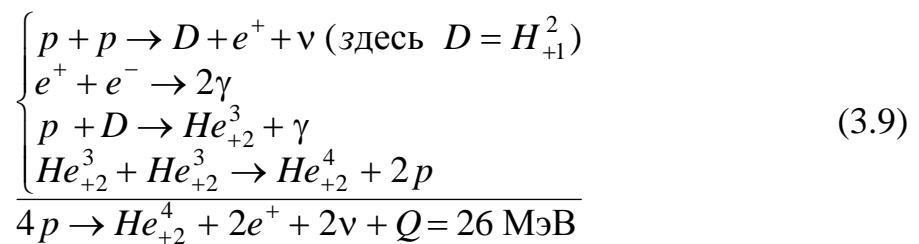
Рассмотрим ряд свойств и характеристик слабого взаимодействия в сравнении со свойствами и характеристиками других взаимодействий.

Обычно сравнивают между собой скорости процессов при энергии  $\sim 1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$ . При таком значении энергии процесс, обусловленный сильным взаимодействием, идет  $\sim 10^{-24}$  с, электромагнитным взаимодействием  $\sim 10^{-21}$  с, слабым взаимодействием  $\sim 10^{-10}$  с.

Другая характеристика взаимодействия – длина свободного пробега частицы в веществе. Так, сильно взаимодействующие частицы – адроны – можно задержать стальной плитой толщиной  $\sim (3 \dots 5) \cdot 10^{-1}$  м, а нейтрино, участвующее лишь в слабых взаимодействиях, проходит без столкновений через стальную плиту воображаемой толщиной  $\sim 10^{12}$  м (для сравнения радиус Солнца  $R_{\text{C}} \approx 7 \cdot 10^8$  м).

Несмотря на крайне малые радиус действия  $r$  и интенсивность  $I$ , слабое взаимодействие играет очень важную роль в природе. Оно ответственно: а) за  $\beta^\pm$ -распад ядер (иначе говоря, за распад нейтрона и протона); б) за распад многих других частиц (мезонов, гиперонов).

Если бы удалось исключить слабое взаимодействие, то погасло бы Солнце (и большинство других гомогенных звезд), так как стал бы в принципе невозможен процесс  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ , а также в целом водородный термоядерный цикл, который служит источником энергии таких звезд.



Процессы слабого взаимодействия, сопровождающиеся испусканием нейтрино (антинейтрино), исключительно важны в эволюции звезд, обуславливая потери энергии очень горячими звездами (голубые карлики  $T_{\text{эф}} \approx 4 \cdot 10^4 \text{ К}$ ), при взрывах сверхновых (звезд) с образованием пульсаров и т. п.

Следует отметить, что интенсивность слабых процессов быстро увеличивается с ростом энергии.

Так,  $\beta$ -распад нейтрона ( $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$ ) с энергосвободением 1 МэВ длится  $\sim 10^3 \text{ с}$ , а аналогичный распад  $\Lambda$ -гиперона ( $\Lambda \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$ ) с энергосвободением 100 МэВ длится  $\sim 10^{-10} \text{ с}$ . Сечение взаимодействия с нуклонами для нейтрино, обладающих энергией 100 ГэВ, приблизительно в  $10^6$  раз больше, чем для нейтрино с энергией 1 МэВ.

**Теория  $\beta$ -распада.** В 1934 г. итальянский физик Э. Ферми предложил теорию  $\beta$ -распада, которая, по существу, аналогична электромагнитной теории. Ферми положил в основу своей теории взаимодействие двух слабых токов не на расстоянии, т. е. путем обмена

виртуальной частицей – квантом поля (фотоном, как в случае электромагнитного взаимодействия), а контактно. Это взаимодействие между четырьмя фермионными полями (или фермионами  $p, n, e, \nu$ ) в современных обозначениях отражается формулой

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} (\hat{p} \hat{n}) (\hat{e} \hat{\nu}), \quad (3.10)$$

где  $G_F \approx 10^{-62}$  Дж·м<sup>3</sup> – постоянная Ферми,  $\hat{p}$  – оператор рождения протона (или уничтожения антипротона),  $\hat{n}$  – оператор уничтожения нейтрона (или рождения антинейтрона),  $\hat{e}$  – оператор рождения электрона (или уничтожения позитрона),  $\hat{\nu}$  – оператор уничтожения нейтрино (или рождения антинейтрино). Ток  $(\hat{p} \hat{n})$ , переводящий нейтрон в протон, позже был назван *нуклонным током*, а ток  $(\hat{e} \hat{\nu})$  – *лептонным током*.

Существенное отличие этих слабых токов от электромагнитного тока заключается в том, что слабый ток меняет заряды частиц: он превращает нейтрон в положительный протон, нейтрино – в электрон, а электромагнитный ток оставляет протон протоном, электрон электроном. В связи с последним свойством слабые токи  $(\hat{p} \hat{n})$  и  $(\hat{e} \hat{\nu})$  стали называть также *заряженными токами*. Согласно этой терминологии обычный электромагнитный ток  $(\hat{e} \cdot \hat{e})$  является *нейтральным током*. Существуют и другие нейтральные токи, например  $(\hat{\nu} \hat{\nu})$ ,  $(\hat{\mu} \hat{\mu})$ ,  $(\hat{\tau} \hat{\tau})$ .

Впоследствии было установлено, что заряженный лептонный ток является суммой трех токов:  $(\hat{e} \hat{\nu}) = (\hat{e} \hat{\nu}_e) + (\hat{\mu} \hat{\nu}_\mu) + (\hat{\tau} \hat{\nu}_\tau)$ , а заряженный адронный (нуклонный) ток является суммой кварковых токов:  $(\hat{p} \hat{n}) = (\hat{u} \hat{d}') + (\hat{c} \hat{s}') + (\hat{t} \hat{b}')$ , где  $\hat{d}', \hat{s}', \hat{b}'$  – линейные комбинации операторов  $\hat{d}, \hat{s}, \hat{b}$  для соответствующих кварков (поэтому кварковый заряженный ток состоит из девяти компонентов).

Лагранжиан слабого взаимодействия заряженных токов имеет вид



$$L_{\text{зар}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \hat{j}_W \hat{j}_W^+ \quad (3.11)$$

где  $\hat{j}_W^+$  – ток, сопряженный с током  $\hat{j}_W$  (например,  $(\hat{d} \hat{u}) \rightarrow (\hat{u} \hat{d})$  или  $(\hat{e} \hat{\nu}_e) \rightarrow (\hat{\nu}_e \hat{e})$ ). Такое взаимодействие заряженных токов количественно описывает огромное число слабых процессов (распадов):

- лептонные процессы  $\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$ ,  $\tau^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau$ ,  $\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$ ;
- полулептонные процессы  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ ,  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ,  $\Lambda \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ ;
- нелептонные процессы  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ,  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ,  $D^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^+$  и т. п.

Взаимодействие слабых нейтральных токов задается соответствующим выражением в общем лагранжиане слабого взаимодействия как

$$L_{\text{нейтр}} = \frac{G_F \rho}{2\sqrt{2}} \hat{j}^0 \hat{j}^0 \quad (3.12)$$

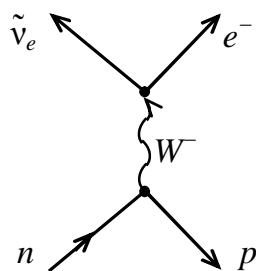
где  $\rho$  – безразмерный параметр (в *стандартной теории*  $\rho = 1$ ),  $\hat{j}^0$  – полный нейтральный ток (содержит 12 компонент всех нейтральных лептонных и кварковых токов). Отметим очень важное свойство нейтральных токов – диагональность. Эти токи переводят лептоны (и кварки) самих в себя, а не в другие лептоны (кварки), как в случае взаимодействия заряженных токов.

**Теория электрослабого взаимодействия.** По теоретическим представлениям сечение слабого взаимодействия должно увеличиваться вплоть до энергий порядка 500 ГэВ (в системе центра масс сталкивающихся частиц). При такой энергии и больших передачах импульсов должны проявиться эффекты, связанные с существованием так называемых промежуточных векторных бозонов, для которых комптоновская длина волны принимает очень малые значения:  $\lambda_K \leq 2 \cdot 10^{-18}$  м, а

слабое и электромагнитное взаимодействия имеют практически одинаковую интенсивность.

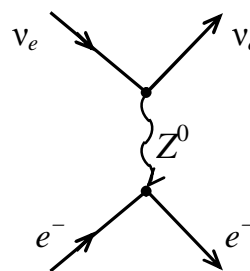
Идея калибровочной инвариантности оказалась наиболее плодотворной в единой теории слабого и электромагнитного взаимодействий, так называемой *теории электрослабого взаимодействия*. Эта теория была разработана в 1967 г. Ш. Глэшоу, С. Вайнбергом (США) и А. Саламом (Пакистан), согласно представлениям которых слабое взаимодействие не является контактным, а происходит путем обмена промежуточными векторными бозонами ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  – тяжелыми частицами со спином  $\check{s} = 1$ ). При этом  $W^\pm$ -бозоны осуществляют взаимодействие заряженных токов (рис. 3.5), а  $Z^0$ -бозоны – нейтральных токов (рис. 3.6).

Реакция  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$



**Рис. 3.5.** Взаимодействие заряженных токов  $(\hat{n} \hat{p}) \rightarrow W^- \rightarrow (\hat{e} \hat{\nu}_e)$

Реакция  $\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$



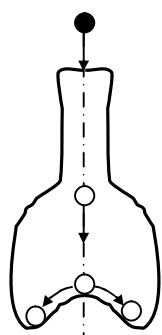
**Рис. 3.6.** Взаимодействие нейтральных токов  $(\hat{\nu}_e \hat{e}^-) \rightarrow Z^0 \rightarrow (\hat{\nu}_e \hat{e}^-)$

В теории электрослабого взаимодействия три промежуточных бозона и фотон являются квантами калибровочных векторных полей, выступающими при больших передачах импульсов (при энергии  $\sim 500$  ГэВ) совершенно равноправно.

**Частицы Хиггса. Эффект Хиггса.** Характерная медлительность слабого взаимодействия объясняется наличием массы у промежуточных бозонов (у  $W^\pm$ -бозонов  $m_W \approx 81$  ГэВ, у  $Z^0$ -бозона –  $m_Z \approx 94$  ГэВ). Однако согласно общим теоретическим представлениям о калибровочной

симметрии кванты полей должны быть безмассовыми, а появление у них массы нарушает калибровочную инвариантность уравнений движения.

Выход из этого затруднения был предложен в 1964 г. англичанином П. Хиггсом и состоит в том, что в дополнение к векторным полям промежуточных бозонов вводят (без нарушения калибровочной симметрии) связанные друг с другом калибровочными преобразованиями самодействующие скалярные поля (*поля Хиггса*) с соответствующими квантами – бозонами (*частицы Хиггса* – безмассовые частицы). Причем самодействие полей Хиггса выбирается так, чтобы калибровочно-инвариантное решение было неустойчивым, т. е. не соответствующим минимуму потенциальной энергии. При этом минимальной энергии будет соответствовать непрерывная серия решений, каждое из которых в



**Рис. 3.7.** Спонтанное нарушение симметрии

отдельности не инвариантно относительно калибровочных преобразований, но серия в целом будет калибровочно-инвариантной. Здесь при калибровочных преобразованиях одно решение переходит в другое.

Нарушение симметрии состоит в том, что в природе реализуется спонтанно только одно из этих решений. Такое явление называют *спонтанным нарушением симметрии*, или *эффектом Хиггса*. Оно позволяет сделать исходные, безмассовые, калибровочные бозоны (частицы Хиггса  $W^\pm$ ,  $W^0$ ,  $B^0$ ) тяжелыми без нарушения калибровочной симметрии в самих уравнениях движения. Таким образом образуются промежуточные векторные бозоны.

Спонтанное нарушение симметрии в механике – падение шарика строго по оси бутылки на ее выпуклое дно (рис. 3.7). Положение шарика на вершине дна неустойчиво и практически сразу же спонтанно нарушается скатыванием шарика в одно из мест углубления дна бутылки, которому

соответствует минимум потенциальной энергии. Таких мест – бесчисленное множество, каждое возможное положение шарика в отдельности несимметрично, но весь комплекс положений симметричен относительно оси бутылки.

**П р и м е ч а н и е:** С начала 1980-х годов и по настоящее время электрослабые и сильные взаимодействия рассматривают с единых калибровочных позиций и описывают так называемой *стандартной моделью*, т.е. современной калибровочной теорией электрослабых и сильных взаимодействий.

### 3.7. Теория великого объединения

Интересной проблемой квантовой теории поля является включение в единую калибровочную схему (вместе с электрослабым взаимодействием) сильного взаимодействия. Эта так называемая *теория великого объединения* предполагает разработку единой константы такого калибровочного взаимодействия (наподобие заряда электрона  $e$  в электромагнитном взаимодействии или константы слабого взаимодействия  $g = e / \sin \theta_w$ , где  $\theta_w$  – угол Вайнберга).

Согласно моделям великого объединения сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия должны объединяться при очень высоких энергиях ( $\sim 10^{14} \dots 10^{16}$  ГэВ). В этом случае константы всех трех взаимодействий становятся сравнимыми, а кванты соответствующих полей (глюоны, промежуточные бозоны, фотоны) – квантами единого калибровочного поля великого объединения.

В большинстве моделей великого объединения кварков и лептонов показывается несохранение барионного заряда, а такие квантовые переходы могут вызывать распады протона. Эти модели предсказывают время жизни протона не менее  $10^{32}$  лет. Несохранение барионного заряда связано с важными космологическими последствиями: наблюдаемую

сейчас барионную асимметрию Вселенной (отсутствие заметного количества антибарионов во Вселенной) можно объяснить нарушением закона сохранения барионного заряда на ранней стадии развития. В этих моделях возникают определенные соотношения между массами кварков и лептонов, даются объяснения очень малой, ненулевой, массы нейтрино. Если экспериментально будет обнаружен распад протона, то теория великого объединения получит подтверждение.

### **3.8. Гравитационное взаимодействие, идеи и теории суперобъединения**

**Гравитационное взаимодействие.** Оно имеет универсальный характер и рассматривается как всеобщее притяжение. Это взаимодействие является самым слабым из всех известных фундаментальных взаимодействий ( $I \approx 10^{-31}$  отн. ед.). Так, сила электростатического отталкивания электронов в  $10^{40}$  раз больше силы их гравитационного притяжения.

В классической физике гравитационное взаимодействие описывается законом всемирного тяготения Ньютона:  $F_{\text{гр}} = G(m_1 m_2) / r^2$ , где  $G \approx 6,7 \cdot 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup> – гравитационная постоянная.

В *общей теории относительности* Эйнштейна гравитация трактуется как проявление кривизны пространственно-временного континуума (поле тяготения создает искривление пространства тем больше, чем больше тяготеющая масса). Релятивистская теория гравитации – общая теория относительности – была создана А. Эйнштейном в 1916 г. на основе идеи о том, что вид взаимодействия должен определяться требованием инвариантности уравнений относительно произвольных преобразований четырехмерного пространства-времени.

Предполагается, что в квантовой теории гравитационное взаимодействие должно осуществляться квантами этого поля –

*гравитонами*, которые в силу чрезвычайной слабости самого взаимодействия (достоверно) до сих пор не обнаружены, как не обнаружены и гравитационные волны.

Отсутствие законченной квантовой теории гравитации можно также объяснить ее наивысшей сложностью (по сравнению с другими физическими теориями), которая обусловлена наличием большого спина у гравитона:  $\check{s} = 2$ . Также по этой причине (спин  $\check{s} = 2$ ) интенсивность гравитационного взаимодействия увеличивается с ростом энергии и становится существенной при энергии  $E \sim m_{\text{П}}c^2$ , где  $m_{\text{П}} = \sqrt{\hbar c/G} \approx 1,22 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}/c^2$  – так называемая *масса Планка*. Масса Планка определяет масштаб всей фундаментальной физики.

По некоторым гипотезам электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное взаимодействия должны объединяться при энергии  $\sim 10^{19} \text{ ГэВ}$ , что соответствует температуре Первовселенной (сразу после Большого взрыва)  $T \approx 10^{32} \text{ К}$  (температура Планка).

В соответствии с теорией Большого взрыва в начальный момент своей истории Вселенная была сверхгорячей и сверхплотной ( $\rho \approx 10^{97} \text{ кг/м}^3$ ), существовало единственное объединенное взаимодействие. По мере того как Вселенная расширялась, остывала и становилась все менее плотной, развивался процесс нарушения симметрии. Это объединенное взаимодействие (часто его называют *суперобъединением*) стало распадаться, превратившись сначала в электрослабое и сильное взаимодействия, а затем в четыре «разрозненных» взаимодействия при энергии не более  $10^{12} \text{ эВ}$  и температуре менее  $10^{15} \text{ К}$ .

**Теория суперструн.** Одной из реализаций идеи суперобъединения явилось создание теории суперструн (М. Грин, Дж. Шварц). Приставка «супер» указывает на то, что спектр частиц, описываемых суперструной, обладает суперсимметрией (в частности, числа бозонных и фермионных

возбуждений одинаковы, а их массы вырождены). Сами суперструны – это гипотетические одномерные объекты, имеющие линейные размеры  $\sim l_{\text{П}} = 1/m_{\text{П}} \approx 10^{-35}$  м и характерное натяжение (энергия на единицу длины)  $\sim m_{\text{П}}^2$ .

С квантовополевой точки зрения теория одной суперструны является теорией бесконечно большого числа квантовых полей. Незамкнутым, открытым суперструнам (их называют *палочками*) отвечают частицы со спином  $\check{s} = 1$  и  $1/2$ ; замкнутым суперструнам (их называют *колечками*) отвечают частицы со спином  $\check{s} = 2, 3/2, 1, 1/2$  и  $0$ . Минимальная размерность пространства-времени для построения теории струны - 10.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что является способом существования материи? Назовите основные формы движения материи.
2. Какие уравнения используются в классической механике для определения закона движения материального объекта?
3. Как интерпретируются уравнения Лагранжа для классических физических полей?
4. Как рассчитывается действие в классической механике? Для каких целей используется принцип наименьшего действия?
5. Какое уравнение применяется для описания движения нерелятивистских квантовомеханических объектов? Запишите это уравнение в операторном виде.
6. Дайте определение гамильтониана. Как и для каких целей используется гамильтониан в квантовой механике?
7. Как определяется и как используется лагранжиан в квантовой теории? Какими преимуществами обладает лагранжиан в сравнении с гамильтонианом?
8. В чем заключается метод теории возмущений? Как в квантовой физике графически иллюстрируются акты взаимодействия свободных

частиц? Перечислите основные правила построения фейнмановских диаграмм.

9. Изобразите фейнмановскую диаграмму, отвечающую аннигиляции электронно-позитронной пары, укажите, чему пропорциональна вероятность этого процесса.

10. С чем связана внутренняя симметрия уравнений движения в квантовой теории поля?

11. В чем заключается калибровочное преобразование?

12. Для чего предназначены векторные калибровочные поля?

13. Какое поле используется в квантовой электродинамике в качестве калибровочного поля?

14. Сколько калибровочных полей вводится в квантовой теории сильных взаимодействий, какие частицы являются квантами этих полей?

15. Перечислите основные особенности слабых взаимодействий.

16. Назовите основные положения теории  $\beta$ -распада, предложенной Э. Ферми. Что определяет нуклонный ток, лептонный ток?

17. Чем отличается заряженный слабый ток от электромагнитного тока?

18. Приведите пример взаимодействия заряженных токов, объясняющий лептонный процесс распада мюона.

19. При каких условиях слабое и электромагнитное взаимодействия имеют одинаковую интенсивность?

20. Назовите кванты калибровочных векторных полей в теории электрослабого взаимодействия.

21. В чем заключается самодействие полей Хиггса?

22. В каких явлениях наблюдается спонтанное нарушение симметрии (эффект Хиггса)?



23. Какой процесс в ходе соответствующих экспериментов рассматривается как акт, подтверждающий теорию великого объединения кварков и лептонов?

24. Какие проблемы затрудняют разработку квантовой теории гравитации?

25. Что определяет масса Планка? Когда, согласно гипотезам, имело место объединение всех фундаментальных взаимодействий?

26. Что отражают, какую ситуацию моделируют суперструны?

## 4. ПРИНЦИПЫ СИММЕТРИИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

### 4. 1. Обобщенное понятие симметрии.

#### Проявления симметрии в неживой и живой природе

*Симметрия* – это инвариантность\* (неизменность) тех или иных свойств рассматриваемой системы при изменении (преобразовании) физических условий, в которых она изучается.

Если законы, устанавливающие связь между характеристиками системы (или определяющие изменение этих характеристик с течением времени), не изменяются в ходе определенных преобразований над системой, то говорят, что эти законы обладают симметрией (или инвариантны) относительно данных преобразований.

Симметрия и *асимметрия* взаимодополняемы, и рассматривать их нужно одновременно.

В естествознании преобладают определения категорий симметрии и асимметрии, основанные на перечислении соответствующих признаков. Например, симметрия определяется через совокупность свойств порядка, однородности, соразмерности, гармоничности.

Наиболее разработанной и совершенной является *теория симметрии* для *кристаллов*. В этой теории под симметрией понимается такое свойство кристаллов, которое позволяет им совмещаться самим с собой при поворотах, отражениях, параллельных переносах и других подобных действиях (операциях) или при их комбинации.

---

\* Например, инвариантность – это постоянство определенных физических величин относительно преобразований системы координат.

Симметричность в атомном, трехмерно-периодическом строении кристаллов определяет *симметрию их внешней формы* (или, как иногда говорят, *огранки*), а также – симметрию их физических свойств.

Поскольку кристаллы являются объектами трехмерного пространства, теория их симметрии – это теория симметричных преобразований самого пространства в себя с учетом вида конкретной объемной структуры кристалла. При этом само пространство не деформируется, а преобразуется как единое целое. Такие *преобразования* принято называть *ортогональными*.

Каждой операции симметрии  $g_i$  соответствует определенный *элемент симметрии* (прямая, плоскость или точка), относительно которого осуществляется данная операция.

Совокупность операций симметрии  $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$  для данного кристалла образует *группу симметрии*  $G$ .

Число операций, образующих группу  $G$ , принято называть *порядком группы*.

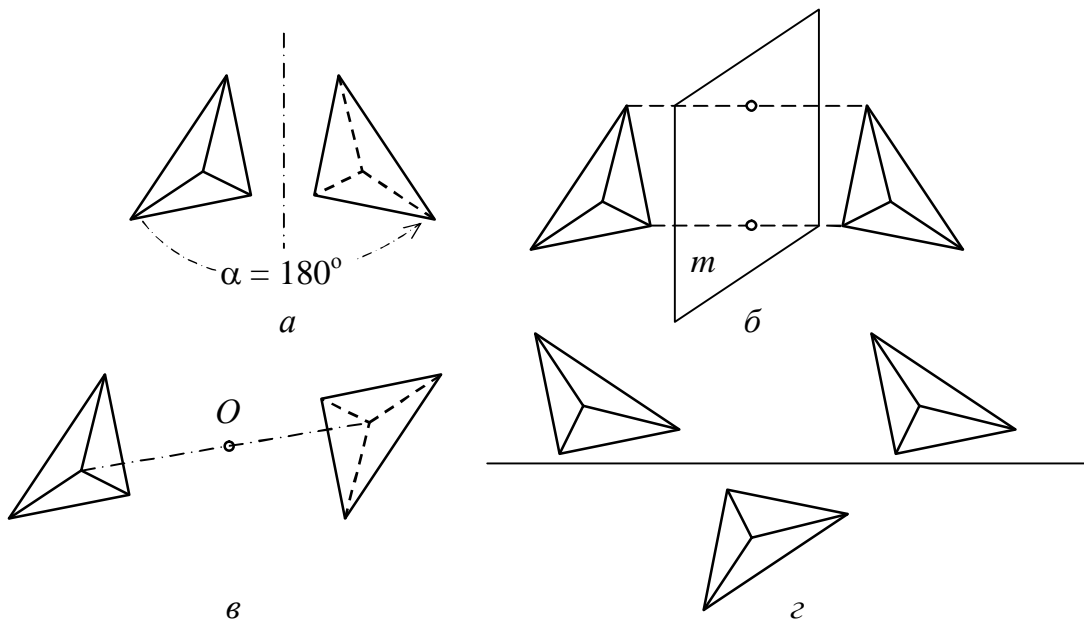
Группы симметрии обычно подразделяют в соответствии с числом  $n$  измерений пространства, в рамках которых они полностью определены, и числом  $m$  измерений пространства, относительно которых объект (кристалл) периодичен. В связи с этим группы принято обозначать как  $G_m^n$ .

При описании кристаллов применяют разные группы симметрии, наиболее важными из которых являются *пространственные группы*  $G_3^3$ , отражающие атомную структуру кристаллов, и *точечные группы*  $G_0^3$ , отражающие их огранку (последние также называют кристаллографическими классами).

К точечным группам симметрии относятся:

- поворот вокруг оси симметрии  $N$ -го порядка на угол  $\alpha$ , равный  $360^\circ/N$  (рис. 4.1, *a*);

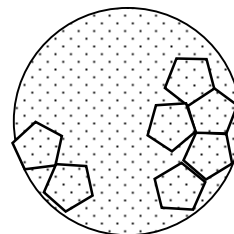
- отражение в плоскости симметрии  $m$ , или зеркальное отражение (рис. 4.1, б);
- инверсия  $I$  (т. е. симметрия относительно точки  $O$ ) (рис. 4.1, в);
- скользящее отражение (рис. 4.1, г);
- инверсный поворот  $N$ -го порядка (т. е. комбинация поворота на угол  $\alpha$ , равный  $360^\circ/N$ , с одновременной инверсией);
- винтовой поворот  $N$ -го порядка.



**Рис. 4.1.** Точечные группы симметрии:  
 а - поворот вокруг оси 2-го порядка; б – зеркальное отражение; в – инверсия; г – скользящее отражение

Число точечных групп  $G_0^3$ , вообще говоря, с геометрических позиций бесконечно. Однако само существование объемной решетки у кристаллов устанавливает ограничения для этих групп на возможную вариацию операций и на максимальный порядок для оси симметрии (до 6-го порядка). Причем исключается ось 5-го порядка, так как с помощью образующихся в ходе соответствующих операций пятиугольников не удастся заполнить пространство кристалла без промежутков. Таким образом, у кристаллов с учетом исходных (1, 2, 3, 4, 6) и инверсных ( $\bar{1}$ ,  $\bar{2}$ ,  $\bar{3}$ ,  $\bar{4}$ ,  $\bar{6}$ ) осей имеется всего 32 группы точечной симметрии.

Точечные группы позволяют описывать симметрию не только кристаллов, но и любых конечных объектов. Так, в живой природе встречаются даже запрещенные в кристаллографии виды симметрии с осями 5-го, 7-го порядков. Например, при описании структуры сферических вирусов, строение оболочек которых подчинено принципу плотной «упаковки» молекул, оказалась очень полезной икосаэдрическая точечная группа с пятиугольником в своей основе (рис. 4.2).



**Рис. 4.2.** Схема структуры вируса иммунодефицита человека

Пространственные группы симметрии  $G_3^3$  отражают трехмерную периодичность атомной структуры кристаллов. В связи с этим обстоятельством в кристаллической решетке возможны операции-преобразования в виде трех некопланарных переносов  $a, b, c$ .

Перенос (сдвиг) структуры кристалла на соответствующие векторы  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  или любой вектор  $\vec{t} = p_1 \vec{a} + p_2 \vec{b} + p_3 \vec{c}$  ( $p_1, p_2, p_3$  – любые целые положительные или отрицательные числа), который совмещает саму структуру с собой, рассматривается как операция симметрии, или *трансляция*.

Из-за возможности сочетания в кристаллической решетке трансляций с операциями точечной симметрии для групп  $G_3^3$  также характерны операции и соответствующие им элементы симметрии с трансляционной компонентой (это плоскости скользящего отражения, винтовые оси различных порядков).

Всего известно 230 пространственных групп симметрии, и любой кристалл можно отнести к одной из этих групп.

**П р и м е ч а н и е.** Часто говорят о симметрии слоев и цепей. Так, для описания объектов с периодичностью в одном или двух направлениях

используются группы  $G_1^3$  и  $G_2^3$  – соответственно одномерно и двумерно периодические в трехмерном пространстве.

Эти группы играют важную роль в изучении биологических структур и макромолекул, периодичность которых может достигать 100 нм и более. Например, молекулы ДНК, палочкообразные вирусы, трубчатые биокристаллы, построение которых идет по «цепной» схеме с явной винтовой симметрией, относят к группе  $G_1^3$ , а строение биологических мембран описывают группой  $G_2^3$ .

## 4.2. Симметрия пространства-времени

Как показывает опыт, физические законы симметричны относительно наиболее общих преобразований пространства-времени. Далее рассмотрим так называемые непрерывные и дискретные преобразования.

**Непрерывные преобразования пространства-времени.** К ним относят следующие операции симметрии.

- Перенос (сдвиг) системы как единого целого в пространстве\*.

Симметрия физических законов относительно переносов в пространстве означает эквивалентность всех точек пространства, т. е. предполагает *однородность пространства* (отсутствие в нем особых точек со специальными свойствами).

- Поворот системы как единого целого в пространстве.

---

\* Пространственно-временные преобразования будем рассматривать в двух аспектах: 1) как активное преобразование, т. е. реальный перенос физической системы относительно выбранной системы отсчета; 2) как пассивное преобразование, т. е. параллельный перенос самой системы отсчета.

Симметрия физических законов относительно поворотов в пространстве означает эквивалентность всех направлений в пространстве, т. е. предполагает *изотропность пространства*.

- Изменение начала отсчета времени (сдвиг во времени).

Симметрия относительно сдвига во времени означает, что физические законы не изменяются с течением времени.

- Переход к системе отсчета, движущейся относительно данной системы с постоянной скоростью.

Симметрия относительно этого преобразования предполагает *эквивалентность всех инерциальных систем отсчета*.

Следует отметить, что указанные выше симметрии проявляют себя в четырехмерном пространстве-времени (пространственно-временном континууме).

**Дискретные преобразования пространства-времени.** В ходе разработки релятивистской квантовой теории была открыта новая, *дискретная симметрия*.

До начала 1960-х годов считалось, что законы физики (природы) инвариантны одновременно относительно трех симметричных *преобразований*  $C$ ,  $P$ ,  $T$ , суть которых заключается в следующем:

- $C$  – все законы физики одинаковы для частиц и соответствующих им античастиц, т. е. должно выполняться *зарядовое сопряжение*;

- $P$  – законы инвариантны для любого явления (объекта) и его зеркального образа (отражения), т. е. допускается *пространственная инверсия*;

- $T$  – возможность *обращения времени*, иначе говоря, законы одинаковы при движении системы, состоящей из частиц и античастиц, как вперед, так и назад. При изменении направления движения всех частиц и античастиц на обратное система возвращается в исходное состояние.

Релятивистская инвариантность и локальность фундаментальных взаимодействий вызывают появление *CPT-симметрии*. Установлено, что симметричными относительно отдельных дискретных *C*-, *P*- и *T*-преобразований являются физические процессы, определяемые сильными и электромагнитными взаимодействиями. Анализ процессов слабого взаимодействия выявил нарушение симметрии относительно пространственной инверсии *P* и зарядового сопряжения *C*, но при этом сохраняется симметрия относительно преобразования *комбинированной инверсии* (*CP*) и, следовательно, согласно *CPT*-теореме – относительно обращения времени *T*.

Формулировка *CPT-теоремы* была дана в 1954 г. Г. Людерсом, а ее полное доказательство было проведено в 1955 г. В. Паули. Ниже приведена одна из современных формулировок этой теоремы.

Если в природе происходит некоторый процесс, то точно так же в ней может происходить и *CPT*-сопряженный процесс, в котором все частицы заменены античастицами, проекции спинов изменили знак, а начальные и конечные состояния, относительно исходного процесса, поменялись местами.

Следствиями из *CPT*-теоремы являются подтвержденные экспериментально положения о том, что массы и времена жизни частицы и соответствующей античастицы равны, их магнитные моменты различаются знаками, а их взаимодействия с гравитационным полем одинаковы.

**Космологический аспект *T*-преобразования.** Считается, что на ранней стадии развития Вселенной (момент  $t \geq 10^{-34}$  с) нарушилась *T*-симметрия, возникли силы, не инвариантные относительно обращения времени. В связи с этим по мере расширения Вселенной антиэлектроны (позитроны) должны были превращаться в кварки чаще, чем электроны – в антикварки. Таким образом, по мере расширения и охлаждения Вселенной антикварки и кварки не проаннигилировали полностью, кварков оказалось



больше, что и сделало мир вещественным (антиматерии в мире практически нет). Это согласуется с теорией великого объединения электрослабого и сильного взаимодействий на стадии ранней, сверхгорячей, Вселенной ( $t \leq 10^{-36}$  с,  $T \geq 10^{27}$  К).

### 4.3. Внутренние симметрии

Под *внутренними симметриями* понимают симметрии между частицами и соответствующими квантовыми полями.

Причем принято рассматривать глобальные и локальные симметрии.

Симметрия называется *глобальной*, если соответствующий параметр преобразования не зависит от пространственно-временных координат точки, в которой рассматривается поле.

Требование от симметрии не только глобальности, но и *локальности*, когда параметры преобразований становятся произвольными функциями пространственно-временной точки, может быть выполнено при условии, что одновременно преобразуются и поля, источниками которых служат соответствующие «заряды».

Требованиям глобальной и локальной симметрий удовлетворяет калибровочная симметрия, означающая, что некоторые сохраняющиеся физические величины, обобщенно называемые зарядами (например, электрический заряд, изотопический спин, цвет и др.), являются одновременно источниками особых калибровочных полей, переносящих взаимодействия между частицами с данным типом заряда. При этом закону сохранения данного заряда отвечает инвариантность лагранжиана рассматриваемой системы относительно группы калибровочных преобразований.

К внутренним симметриям относят:

- *изотопическую инвариантность*, которая наблюдается при сильных взаимодействиях, симметричных поворотам в особом

изотопическом пространстве (проявлением этой симметрии, например, является зарядовая независимость ядерных сил);

- *цветовую симметрию*, свойственную сильному взаимодействию кварков в ходе образования адронов;

- *симметрию между кварками и лептонами*, замеченную в ходе изучения их электрослабого взаимодействия;

- гипотетическую *суперсимметрию*, т. е. симметрию, предположительно связывающую особые поля, которым отвечают как бозоны, так и фермионы (эта симметрия рассматривается в различных моделях построения единой теории поля).

#### **4.4. Обобщенные понятия «закон» и «теория»**

Понятие *закон* предполагает установление внутренней существенной и устойчивой связи между рассматриваемыми явлениями (процессами), определяющей их упорядоченное изменение.

В зависимости от типа рассматриваемого объекта различают: динамические и статистические законы.

*Динамический закон* управляет поведением определенного объекта и позволяет устанавливать однозначную связь его состояний (временную последовательность состояний).

Полное описание физической системы возможно лишь в рамках динамических законов, которые детально определяют изменение ее состояния.

*Статистический закон* управляет поведением больших совокупностей микрообъектов (ансамблями микрочастиц), а в отношении отдельного объекта позволяет делать лишь вероятностные выводы о поведении (позволяет определять средние значения его характеристик).

Под *динамической* понимают теорию, представляющую собой совокупность динамических законов.

Динамическими теориями являются:

- классическая механика (три закона ньютоновской механики и закон всемирного тяготения);
- классическая теория излучения (электромагнитная теория Максвелла);
- релятивистская механика (специальная теория относительности и преобразования Лоренца со следствиями).

*Статистической* называют теорию, представляющую собой совокупность статистических законов.

К статистическим теориям относят:

- квантовую механику;
- квантовую теорию излучения (квантовую электродинамику);
- релятивистскую квантовую механику.

Количество законов природы велико, и они неравнозначны по широте применения. Наиболее многочисленны законы, описывающие электрические явления (и их следствия). Упомянем лишь сформулированные на основе обобщения экспериментальных данных законы Кулона, Био – Савара, Фарадея.

#### **4.5. Частные и общие (фундаментальные) законы**

Часто бывает, что закон, установленный изначально для определенных внешних проявлений (например, для механических процессов), имеет совершенно другую, более глубокую, внутреннюю физическую природу. Так, известный закон Гука  $\vec{F} = -k \cdot \Delta\vec{x}$  относится к области малых упругих деформаций  $\Delta\vec{x}$  (закон ограничен пределом текучести материала тела). На самом деле он отражает только внешний наблюдаемый эффект, а внутренняя природа явления заключается в том, что атомы и молекулы упругого тела состоят из электрически заряженных

частиц, силы притяжения и отталкивания которых уравновешены. Деформирование тела нарушает их внутреннее равновесие, которое после снятия нагрузки восстанавливается. Таким образом, силы упругости – это электромагнитные силы, и отражают они электрический эффект.

Другой пример касается проявления закона валентности при образовании химических соединений. Внутреннее содержание закона связано с созданием общих электронных пар у синтезируемых молекул, а это – также электрический эффект.

Однако обычно не прибегают к рассмотрению соответствующих уравнений электродинамики, а ограничиваются для описания внешнего поведения системы перечисленными законами. Эти законы называют *частными*, так как они выполняются для определенной частной области естествознания.

Когда же исследователи абстрагируются от внешней стороны эффекта и раскрывают его внутренний механизм, то в ходе такого анализа на первый взгляд не связанные явления объединяются в группы и классы. И уже эти классы явлений могут быть описаны одними *общими законами*, которые также называют *фундаментальными*. Так, фундаментальные законы Ньютона в механике действуют лишь в области макромира, а в случае микрочастиц невозможно точно указать значения ускорений и сил, следовательно, теряется сам смысл понятий, используемых при формулировке этих законов.

Другое дело, когда рассматриваются так называемые законы сохранения, они не теряют своего смысла при замене одной системы другой.

*Законы сохранения* – это физические закономерности, согласно которым числовые значения некоторых физических величин не изменяются с течением времени (сохраняются) в любых процессах или в определенном классе процессов.

Поскольку во многих случаях динамический закон для данной системы не известен (или слишком сложен), то именно соответствующий закон сохранения позволяет сделать некоторые заключения о характере поведения системы (о возможных ее состояниях).

Важнейшими законами сохранения, справедливыми для любых изолированных систем, являются:

- закон сохранения энергии  $E = K + U = \text{const}$  (в механике равенство выполняется в отсутствие неконсервативных сил);
- закон сохранения импульса  $\vec{p} = \sum_i m_i \vec{v}_i = \text{const}$ ;
- закон сохранения момента импульса  $\vec{L} = \sum_i (\vec{r}_{iO} \times m_i \vec{v}_i) = \text{const}$ ;
- закон сохранения электрического заряда  $Q = \sum_i q_i = \text{const}$ .

Перечисленные законы сохранения относят к всеобщим.

#### 4.6. Эволюция закона сохранения энергии

Сама идея сохранения появилась сначала как чисто философская догадка о наличии (существовании) чего-то неизменного (стабильного) в постоянно изменяющемся мире. Еще античные философы ввели понятие «материя», под которым понимали неуничтожимую и несотворимую основу всего сущего. А наблюдение постоянных изменений в природе складывалось в представление о вечном движении материи как важнейшем ее свойстве.

С развитием математики, астрономии, механики, химии и других наук было открыто немало частных законов материального мира, что побудило ученых и философов более глубоко заняться разработкой «общего закона природы».

В 1775 г. французский химик А. де Лавуазье устанавливает закон сохранения массы вещества. Следует напомнить, что еще в 60-е годы

XVIII в. М.В. Ломоносов развил принцип сохранения количества вещества и движения, а идеи сохранения механической энергии просматриваются в трудах Г. Лейбница начала XVIII в.

В 1842 г. немецкий естествоиспытатель, врач Ю.Р. Майер выпускает в свет работу «Органическое движение в связи с обменом веществ», где последовательно излагает учение о сохранении и превращении энергии. Суть этого учения заключается в следующем: в природе есть весома и непроницаемая материя, а остальное – силы (или энергия). Движение есть сила, оно измеряется количеством «живой силы», т. е. кинетической энергией, поэтому возможны только превращения этих сил (энергии). Солнце генерирует все силы на Земле, а жизнедеятельность живых организмов рассматривается как превращения видов энергии. Записанное Майером уравнение  $C_p - C_v = R$  ( $R$  – газовая постоянная), по сути, становится первой формулировкой закона сохранения и превращения энергии (в термодинамике это первое начало). Майер также впервые рассчитал механический эквивалент теплоты: 4,19 Дж/кал.

В начале 40-х годов XIX в. англичанин Джеймс Джоуль и независимо от него русский физик Эмилий Ленц открывают закон  $Q = I^2 R t$ , устанавливающий связь между электрическими и тепловыми явлениями в природе. А в 1872 г. Джоуль в работе «Механический эквивалент теплоты» экспериментально обосновал закон сохранения энергии и определил механический эквивалент теплоты, равный 4,185 Дж/кал. Также в 1843 г. он установил, что внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры и не зависит от его плотности, т. е.  $U = C_v T$ .

В 1847 г. немецкий ученый, биофизик и физиолог Герман Гельмгольц математически обосновал закон сохранения и превращения энергии применительно к разработанной им термодинамической теории химических процессов. Он ввел понятия *свободной энергии* ( $F = U - TS$ ) и *связанной энергии* ( $TS$ ), при этом работу термодинамической системы в

равновесном изотермическом процессе считал равной убыли свободной энергии.

Таким образом, к середине XIX в. были сформированы законы сохранения массы и энергии, которые трактовались как сохранение материи и движения.

В начале XX в. оба эти закона сохранения подверглись коренному пересмотру в связи с появлением в 1905 г. специальной теории относительности Эйнштейна (наступил период развития релятивистской механики). Установленный Эйнштейном закон  $E = mc^2$  также относится к законам сохранения, является фундаментальным и определяющим границы применимости классических представлений при описании свойств микромира.

Закон сохранения энергии в специальной теории относительности естественным образом объединил законы сохранения массы и энергии, существовавшие порознь в классической механике. По отдельности эти законы в теории относительности не выполняются: невозможно охарактеризовать количество материи (массу), не принимая во внимание ее движение и взаимодействие (энергию).

Рассмотренная эволюция закона сохранения энергии показывает, что почерпнутые из опыта законы нуждаются в экспериментальной проверке и уточнении.

#### **4.7. Законы сохранения в микромире**

Большую роль законы сохранения играют в микромире, квантовой теории поля, физике элементарных частиц.

При этом работают *правила отбора*, согласно которым реакции с элементарными частицами, приводящие к нарушению того или иного закона сохранения, не могут осуществляться в природе. В дополнение к перечисленным выше фундаментальным законам сохранения,

выполняющимся в макромире, в физике элементарных частиц сформулировано много специфических законов сохранения, позволяющих интерпретировать наблюдаемые в эксперименте правила отбора.

К строгим законам сохранения в микромире относят:

- закон сохранения электрического заряда, с которым связывают правило отбора  $\Delta Q = 0$ ;

- закон сохранения барионного заряда, выполняющийся во всех известных сегодня типах взаимодействий, которому соответствует правило отбора  $\Delta B = 0$ ;

- закон сохранения лептонного заряда и выполнение соответствующего правила отбора  $\Delta L = 0$ .

К нестрогим законам сохранения относят:

- закон сохранения изотопического спина ( $\Delta I = 0$ ), выполняемый только при сильном взаимодействии;

- законы сохранения странности ( $\Delta s = 0$ ), шарма ( $\Delta c = 0$ ), красоты ( $\Delta b = 0$ ), т. е. в целом закон сохранения аромата; эти законы выполняются при сильном и электромагнитном взаимодействиях, но нарушаются в слабых процессах.

Таким образом, исследования в физике элементарных частиц также напоминают о необходимости проверки известных законов сохранения в каждой области природы.

Некоторые современные мыслители считают, что абсолютны не законы сохранения, а сама идея сохранения. Так, например академик Н.Ф. Овчинников заявляет: «Абсолютность принципов сохранения заключается не в том, что тот или иной принцип сохранения вызывает сомнения в его общности и является абсолютно строгим на вечные времена, но в том, что любой общий принцип сохранения при его нарушении в какой-либо области природы сменяется другим принципом, действующим в этой области. Можно сказать, что абсолютен не тот или иной конкретный закон



сохранения, а абсолютна идея сохранения: ...ни одна физическая теория не может быть построена без тех или иных сохраняющихся величин, вещей, свойств или отношений...»

#### **4.8. Связь законов сохранения со свойствами симметрии физических систем. Теорема Нётер**

Законы сохранения тесно связаны со свойствами симметрии физических систем. При этом сама симметрия понимается как инвариантность физических законов относительно некоторой группы преобразований входящих в законы величин. Наличие какой-либо симметрии приводит к тому, что для данной системы существует некоторая сохраняющаяся физическая величина.

Если известны свойства (параметры) симметрии некоторой физической системы, то, как правило, можно установить для нее законы сохранения, и наоборот. В этом случае очень важна сформулированная немецким математиком Эмми Нётер в 1918 г. теорема, устанавливающая связь между симметрией и законами сохранения.

**Теорема Нётер.** Формулировка: в физической системе каждому непрерывно зависящему от одного параметра преобразованию, оставляющему инвариантным действие\*, соответствует закон сохранения.

Согласно теореме Нетер каждому преобразованию, при котором действие  $D$  не изменяется ( $D = \text{const}$ ,  $\delta D = 0$ ), соответствует дифференциальный закон сохранения. Интегрирование уравнения этого закона приводит к интегральному закону сохранения.

Ранее отмечалось, что законы сохранения энергии, импульса и момента импульса обладают всеобщностью. Это связано с тем, что

---

\* Действием (по Гамильтону) за промежуток времени  $[t_0, t]$  называют величину  $D = \int_{t_0}^t L dt = \int_{t_0}^t (K - U) dt$ , где  $L$  – функция Лагранжа;  $K$  – кинетическая энергия;  $U$  – потенциальная энергия системы.

соответствующие симметрии для них можно рассматривать как *симметрии* самого *пространства-времени*, в котором движутся материальные объекты.

Например, согласно теореме Нётер:

- из инвариантности относительно сдвига во времени следует закон сохранения энергии;
- из инвариантности относительно пространственных сдвигов (обусловлено однородностью самого пространства) следует закон сохранения импульса;
- из инвариантности относительно пространственного вращения (обусловлено изотропностью пространства) следует закон сохранения момента импульса.

Теорема Нетер распространяется не только на пространственно-временные симметрии, но и на внутренние симметрии, обусловленные внутренними свойствами элементарных частиц (так называемые калибровочные симметрии).

Так, из независимости динамики заряженных частиц в электромагнитных полях от соответствующих калибровочных преобразований следует закон сохранения электрического заряда. Релятивистская инвариантность заряда и закон сохранения заряда изолированной системы взаимно обуславливают друг друга и принимаются в качестве исходного положения классической электродинамики.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Определите понятия «симметрия» и «асимметрия».
2. Чем определяется симметрия внешней формы у кристаллов?
3. Какие элементы симметрии Вам известны?

4. Дайте определения группы симметрии, порядка группы. Как обозначают группу симметрии?
5. Какие группы симметрии характеризуют атомную структуру кристаллов? Какие группы симметрии описывают внешнюю форму (огранку) кристаллов?
6. Какое преобразование связано с симметрией относительно точки (центра)?
7. Какая группа симметрии используется при описании структуры сферических вирусов? Где применяется группа симметрии  $G_2^3$ ?
8. Какие операции-преобразования называются трансляциями?
9. Перечислите непрерывные преобразования пространства-времени. Какие свойства пространства связаны с соответствующими симметриями?
10. Назовите основные дискретные преобразования пространства-времени. Где они используются?
11. Что предполагает *CPT*-теорема?
12. Что понимают под внутренними симметриями? Приведите примеры внутренних симметрий.
13. Чем управляет динамический закон, статистический закон?
14. Приведите примеры динамических и статистических теорий.
15. Какой закон называется частным? Что описывает фундаментальный закон?
16. Какой закон сохранения связан с релятивистской инвариантностью электрического заряда?
17. С чего началось формирование закона сохранения энергии? Какой закон объединил в рамках одной теории законы сохранения массы и энергии?

18. Какие законы сохранения выполняются в микромире? Чем пользуются при анализе возможности реакции с элементарными частицами?

19. Какая теорема устанавливает связь между симметрией и законами сохранения?

20. Какой закон сохранения связан с изотропностью пространства?

## **5. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКОНОВ ПРИРОДЫ**

### **5.1. Современный подход к построению единой естественнонаучной теории**

В развитии естествознания и, в частности физики как фундаментальной науки, просматриваются две противоположные тенденции:

- с одной стороны, экспоненциально увеличивается число исследуемых и изученных явлений (эффектов), и в связи с этим растет специализация и дифференциация накопленных знаний и идет формирование новых научных дисциплин;
- с другой стороны, интенсивно идет противоположный процесс – объединение, синтез, интеграция результатов научных поисков, с каждым годом все теснее и прочнее связь между отдельными научными направлениями (науками), между явлениями, которые ранее казались не имеющими между собой ничего общего.

Процессы специализации и объединения только на первый взгляд могут показаться взаимоисключающими. На самом деле в ходе накопления и получения естественнонаучного знания они как бы подпитывают друг друга.

Так, например, физика – достаточно конкретная наука, и поэтому каждый шаг на пути синтеза обобщенной физической картины мира требует все более сложных и специализированных средств (инструментария). Причем это относится не только к методике проведения эксперимента, но и к математическому аппарату (при составлении той или иной теории). В свою очередь, каждый этап на пути объединения разрозненных физических знаний приводит к возникновению новых направлений, причем не только в науке, но и в других сферах деятельности людей, например в технике. Так, разработка электромагнитной теории

стала началом развития радиотехники, зарождению ядерной техники (техники высоких энергий) предшествовало создание релятивистской квантовой механики.

Разработка и создание теорий великого объединения и суперобъединения, как представляется, также открывают захватывающие перспективы для человечества.

Современный подход к построению единой естественнонаучной теории базируется на:

- механике Ньютона (она объединила движение земных и небесных тел);
- электродинамике Максвелла (она объединила электрические, магнитные и оптические явления);
- специальной теории относительности Эйнштейна (она объединила пространство и время);
- квантовой механике (она в концептуальном плане объединила понятия частицы и волны, детерминизм и вероятность);
- квантовой теории поля (она объединила частицы и силы, т. е. взаимодействия).

К сожалению, на сегодня полностью универсальных законов не установлено (даже законы сохранения имеют ограничения по области применения и возможностям), поэтому мы рассмотрим основные принципы, используемые при формировании всеобщих законов природы.

## **5.2. Принцип относительности**

*Принцип относительности* рассматривается как фундаментальный, согласно ему любой процесс протекает одинаково в изолированной материальной системе, находящейся в состоянии покоя, и в такой же системе, находящейся в состоянии равномерного прямолинейного движения.

Состояние движения или покоя определяется по отношению к произвольно выбранной инерциальной системе отсчета (ИСО). Физически эти состояния равноправны, как равнозначны сами ИСО.

*Примечание.* Эквивалентная формулировка принципа относительности: законы физики (законы природы) имеют одинаковую форму во всех ИСО или, другими словами, законы природы инвариантны относительно преобразований движения (при переходе от одной ИСО к другой).

Различают: а) преобразования Галилея в классической механике и б) более общие преобразования Лоренца в релятивистской механике, которые при скорости  $v \ll c$  переходят в преобразования Галилея.

Преобразования Лоренца для пространственно-временной точки  $K'\{x', y', z', t'\}$  в некоторой ИСО, движущейся со скоростью  $v$  вдоль оси  $x$  другой, лабораторной, ИСО, в которой та же точка определена как  $K\{x, y, z, t\}$ , имеют вид

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Следует напомнить, что основные постулаты специальной теории относительности (инвариантность скорости света в вакууме; инвариантность всех законов и явлений природы относительно преобразований Лоренца) были сформулированы А. Эйнштейном в 1905 г., а в 1916 г. при разработке общей теории относительности (часто рассматривается как теория гравитации) им же была высказана идея эквивалентности (*принцип эквивалентности*) гравитационной и инерционной масс. А. Эйнштейн показал, что поле сил инерции оказывает на физические процессы такое же воздействие, как и поле тяготения, обладающее структурой подобной конфигурации инерционных сил.

Таким образом, устанавливается равенство ускорений всех тел в одном и том же гравитационном поле, т. е. динамика рассматривается в достаточно небольшой области пространства-времени, где это поле можно считать однородным и постоянным во времени. В целом (в

космологическом отношении) согласно теории гравитации пространственно-временной континуум претерпевает искривления.

### 5.3. Принцип неопределенностей

Этот принцип установлен в 1927 г. В. Гейзенбергом при разработке основных положений квантовой механики. В настоящее время он рассматривается как один из фундаментальных принципов квантовой теории, который определяет границы применимости классических представлений при описании свойств объектов микромира.

**П р и м е ч а н и е.** Любая квантовомеханическая система (в простейшем случае даже одна микрочастица, обладающая корпускулярно-волновыми свойствами) не может находиться в состоянии, когда координаты ее центра инерции и импульс одновременно принимают определенные и точные значения.

Количественно это выражается через соотношения неопреде-

ленностей Гейзенберга  $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar / 2$ ,  $\Delta y \Delta p_y \geq \hbar / 2$ ,  $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar / 2$ , записанные для соответствующих

сопряженных координат и импульсов. Если в классической механике можно точно определить положение (координаты) и импульс материальной точки на ее траектории в любой момент времени по известному уравнению движения, то в квантовой механике в результате проявления волновых свойств у микрочастиц и действия названного принципа понятие траектории вырождается, а задача по определению (измерению) местоположения и импульса частицы становится разрешимой только с некоторой степенью вероятности. К приведенным соотношениям следует также добавить и энергетическое неравенство  $\Delta E \Delta t \geq \hbar / 2$ , которое допускает измерение энергии микрочастицы даже в случае стационарного состояния, лишь с точностью, не превышающей величины  $\hbar / (2 \Delta t)$ , где  $\Delta t$  - длительность процесса измерения. Причина этой



неопределенности заключается в активном взаимодействии исследуемой системы (микрообъекта) с самим измерительным средством.

#### 5.4. Принцип дополнительности

Этот принцип был сформулирован Н. Бором в 1927 г. в ходе разработки ряда положений квантовой механики.

**П р и м е ч а н и е.** Получение экспериментальной информации об одних физических величинах, описывающих микрообъект, неизбежно связано с потерей информации о некоторых других величинах, дополнительных к первым.

В общем случае дополнительными одна ( $A$ ) к другой ( $B$ ) являются физические величины, которым соответствуют квантовые операторы, не коммутирующие между собой, т. е. для них не выполняется условие перестановок  $\hat{A} \cdot \hat{B} \neq \hat{B} \cdot \hat{A}$ . Такими взаимно дополнительными величинами являются, например, координата частицы  $x$  и ее импульс  $p_x$ , направление и величина момента импульса  $\vec{L}$ , кинетическая энергия  $K$  и потенциальная энергия  $U$ , напряженность электрического поля в данной точке  $\vec{E}$  и число фотонов  $N_\gamma$ .

Следовательно, принцип дополнительности разрешает получать данные о микрочастицах либо в виде *энергетически-импульсной картины* (значения энергий и соответствующих импульсов частицы), либо в виде *пространственно-временной картины* (данные о положениях и состояниях частицы в пространстве и во времени).

Эти взаимоисключающие (согласно принципу неопределенностей) картины не могут использоваться одновременно, однако названные характеристики в равной мере описывают микрообъект, а поэтому в ходе экспериментального изучения их целесообразно применять как взаимодополняющие. Так, в экспериментах с микрочастицами обычно используют приборы двух типов: одни позволяют изучать волновые

свойства частиц (спектрографы, интерферометры), а другие – их корпускулярные свойства (фотоприемники, счетчики частиц).

### **5.5. Принцип запрета (принцип Паули)**

Этот принцип сформулирован в 1925 г. швейцарским физиком В. Паули для электронов в атоме, а впоследствии он был распространен на все *фермионы* – частицы с полуцелым спином.

**П р и м е ч а н и е.** Две тождественные частицы с полуцелым спином (два одинаковых фермиона) не могут одновременно находиться в одном квантовом состоянии, т. е. иметь одинаковый набор четырех квантовых чисел  $n, l, m, m_s$ .

В 1940 г. В. Паули показал, что принцип запрета – это следствие существующей в релятивистской квантовой механике связи спина частицы и квантовой статистики. Иначе говоря, частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми – Дирака, и их волновая функция антисимметрична относительно перестановки любых двух фермионов системы, а следовательно, в одном состоянии не может находиться более одного фермиона.

Принцип Паули сыграл решающую роль в понимании закономерностей заполнения электронных оболочек атома и стал отправным пунктом в объяснении атомных и молекулярных спектров. Важна фундаментальная роль этого принципа в окончательном понимании явлений пара- и диамагнетизма, а также в квантовой теории твердого тела и атомного ядра, теории ядерных реакций и реакций между элементарными частицами.

### **5.6. Принцип соответствия**

Этот принцип был сформулирован в 1923 г. Н. Бором для квантовой механики, но на самом деле он выходит за ее границы и носит общий

методологический характер, в связи с чем используется при формировании любой новой теории.

**П р и м е ч а н и е.** Любая новая, более общая, теория, являющаяся развитием предыдущих классических теорий, справедливость которых была экспериментально установлена для определенной группы явлений, не отвергает эти старые теории, а включает их в себя. При этом предыдущие теории в свете новой теории рассматриваются как предельная форма или частный случай.

Таким образом, новая теория определяет границы применимости старых теорий, в определенных условиях возможен переход новой теории в старую. Так, при малых скоростях изучаемых объектов ( $v \ll c$ ) положения и уравнения релятивистской механики переходят в соответствующие каноны механики Ньютона. Положения квантовой физики (квантовой механики) выполняются для объектов микромира, у которых характерные физические величины соизмеримы с постоянной Планка  $\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Для макроскопических объектов значение  $\hbar \rightarrow 0$  (пренебрежимо мало) и уже квантовые свойства оказываются несущественными, а представления классической физики – вполне справедливыми.

### **5.7. Принцип симметрии-асимметрии**

Этот принцип напрямую связан с тем или иным законом сохранения (с инвариантностью законов относительно преобразований симметрии).

**П р и м е ч а н и е.** Законы природы в своем содержании, в связях друг с другом и с условиями своего действия предполагают определенные формы симметрии и асимметрии.

Асимметрия – понятие, противоположное симметрии, отражающее существующие в объективном мире нарушения порядка, равновесия, относительной устойчивости, пропорциональности и соразмерности между

частями некоторого целого объекта и связанное с изменениями последнего, его развитием и организационной перестройкой.

Асимметрия – столь же существенный момент законов, как и симметрия. Наличие асимметрии в содержании законов не исключает в их структуре форм симметрии. Ярким примером, подтверждающим сказанное, является хорошо известная система уравнений Максвелла для электродинамики.

Асимметричные положения устраняют наличие резкой грани между законами и условиями их действия. Поэтому разрабатываемые законы по возможности должны включать в себя эти положения.

### **5.8. Дополнительные принципы, используемые при описании законов природы**

При формулировании законов, описании явлений природы используется ряд принципов, носящих общенаучный характер.

**Вариационный принцип.** Этот принцип изначально применялся в классической механике для изучения общих закономерностей движения механических систем и при составлении дифференциальных уравнений, описывающих их движения. Из условия обращения в нуль вариации действия, т. е.  $\delta D = 0$  (иначе этот принцип называется принципом наименьшего действия), получают уравнения движения системы.

Каждому симметричному преобразованию, например преобразованию пространства-времени, при котором действие  $D$  не меняется, соответствует, как утверждает теорема Нётер, определенный закон сохранения. Таким образом, вариационный принцип связывает свойства пространства-времени с законами сохранения.

На практике наряду с самим принципом часто используют *метод вариаций*. Например, при установлении состояний равновесия термодинамических систем находят вариации энтропии исследуемой

системы, подчиняющиеся равенству  $\delta S = 0$ , затем определяют вторую производную  $\delta^2 S$  и при условии ее отрицательности ( $\delta^2 S < 0$ ) делают вывод об устойчивости найденного состояния равновесия.

**Принцип суперпозиции.** Принцип суперпозиции (или принцип наложения) трактуется как допущение, согласно которому результирующий эффект сложного процесса ряда воздействий представляет собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности, при условии, что последние не влияют один на другой.

Этот принцип очень хорошо себя зарекомендовал в теории поля. Так, если среда, в которой распространяется негармоническая волна  $\zeta$ , линейна (свойства среды не меняются под действием волновых возмущений), то все эффекты, вызываемые этой волной, могут быть определены как сумма эффектов, создаваемых каждой из ее гармонических составляющих:  $\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n = \sum_i^n \zeta_i$ . В квантовой теории принцип суперпозиции утверждает, что если возможны отдельные квантовые состояния микросистемы с волновыми функциями  $\psi_i$ , то возможно и состояние в виде линейной комбинации этих функций:  $\psi = C_1 \psi_1 + C_2 \psi_2 + \dots + C_n \psi_n = \sum_i^n C_i \psi_i$ , где  $C_i$  – произвольные комплексные числа.

**Принцип положительной обратной связи.** Принцип работает для открытых неизолированных систем и предполагает развитие и усиление неравномерностей и неустойчивостей, возникающих в таких системах вследствие их постоянного взаимодействия с внешней средой. Это приводит в конечном счете к разрушению существовавших симметричных конфигураций в системах и, как следствие, к возникновению новых структур.

**Принцип корреляций (принцип Кювье).** Принцип предполагает, что ни одна часть единой системы (или организма) не может изменяться без соответствующих изменений других частей.

Здесь следует отметить, что наиболее фундаментальной областью исследований является область, связанная со структурой материи и выяснением законов взаимодействия составляющих ее частиц.

Уже в обозримой перспективе можно прогнозировать создание единого теоретического естествознания с общими для него физико-математическими основами, но при сохраняющейся специфике и относительной самостоятельности его фундаментальных разделов: физики, химии, биологии и др.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. На чем базируется современный подход к построению единой естественнонаучной теории?

2. Сформулируйте фундаментальный принцип относительности. В чем заключается принцип эквивалентности?

3. Как квантовая механика объясняет вырождение понятия «траектория микрочастицы»? Какое неравенство, относящееся к соотношениям неопределенностей, связано с взаимодействием микрообъекта с измерительным средством?

4. Какие величины в квантовой теории называются дополнительными? Какую информацию о микрочастицах (в виде каких картин) разрешает получать в эксперименте принцип дополнительности?

5. Для каких частиц сформулирован принцип запрета? Какие явления удалось объяснить с помощью принципа Паули?

6. Какой принцип регулирует отношения между новой и старой теориями, как это осуществляется?

7. С какой целью используется принцип симметрии-асимметрии в естествознании? Что позволяют реализовать асимметричные положения в процессе изучения объекта, при выяснении закономерности природного явления?

8. С помощью какого принципа определяется положение (состояние) равновесия материальной системы и как оно проверяется на устойчивость?

9. Как формулируется обобщенный принцип суперпозиции?

10. Для каких систем работает принцип положительной обратной связи?

11. Какой принцип регулирует взаимообусловленность изменений в разных частях сложных систем?

## 6. ДИНАМИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ. ТЕРМОДИНАМИКА РАВНОВЕСНЫХ И НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ

### 6.1. Основные определения, понятия, принципы термодинамики

Современное естествознание рассматривает *термодинамику* как науку о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем (*макросистем\**), находящихся в состояниях равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Термодинамика построена на фундаментальных принципах (*началах*), которые являются обобщением многочисленных экспериментальных наблюдений и выполняются независимо от конкретной природы образующих систему тел. Поэтому закономерности и соотношения между физическими величинами, которыми оперирует термодинамика, имеют универсальный характер.

Обоснование законов термодинамики, их связь с законами движения отдельных частиц, из которых построены тела, даются в *статистической физике* (с привлечением соответствующих законов статистики).

Макросистема, включающая в себя одно или несколько тел, выделенных из окружающей среды с помощью определенной оболочки, называется *термодинамической системой*. В зависимости от характера рассматриваемой задачи оболочки могут быть проницаемыми или непроницаемыми, жесткими или деформируемыми.

Термодинамическая система, обменивающаяся с внешней средой как энергией, так и массой (веществом), называется *открытой*.

---

\* Макросистемы – системы, состоящие из большого числа частиц и их совокупностей в форме макротел, взаимодействующих между собой и с внешней средой посредством энергообмена.



Система, обменивающаяся с внешней средой только энергией, называется *закрытой*.

Система, не обменивающаяся с внешней средой ни энергией, ни массой, называется *изолированной*.

Изучение термодинамических систем проводится путем анализа их состояний, которые описываются совокупностью макроскопических величин (термодинамических параметров): числом частиц в системе  $N$ , объемом  $V$ , температурой  $T$ , давлением  $p$  и др.

Исходным положением термодинамики, проистекающим из результатов огромного числа экспериментов, является постулат о существовании термодинамического равновесия (так называемое *нулевое начало термодинамики*).

**П р и м е ч а н и е.** Всякая изолированная термодинамическая система по истечении конечного промежутка времени переходит в состояние термодинамического равновесия, в котором ее макропараметры ( $p$ ,  $V$ ,  $T$  и др.) остаются вполне определенными и неизменными сколь угодно долго. Саму ее в этом случае принято называть *равновесной термодинамической системой*.

Время перехода системы в равновесное состояние зависит от природы ее вещества, взаимодействия частиц, а также характера исходного неравновесного состояния. Состояние равновесия у системы можно изменить, только воздействуя на нее извне, т. е. нарушая ее изолированность и накладывая ту или иную связь с внешней средой.

Термодинамика изучает равновесные состояния различных по составу и структуре объектов.

*Гомогенные* (однородные) *системы* в отсутствие внешних полей (например, поля сил тяжести) полностью характеризуются заданием любых двух из трех параметров  $p$ ,  $V$ ,  $T$ . Связь между этими параметрами для рассматриваемой системы задается уравнением состояния, т. е. соответствующей зависимостью  $F(p, V, T) = \text{const}$ . Примером равновесной

гомогенной системы может служить газ или жидкость, состоящие из химически инертных компонентов, которые равномерно перемешаны по всему ограниченному изолирующими стенками объему.

*Гетерогенные системы* представляют собой физически неоднородные системы, состоящие из нескольких однородных частей, на границах которых скачкообразно изменяются свойства систем. В состав гетерогенных систем могут входить тела, находящиеся в разных агрегатных состояниях (твердое тело, жидкость, газ, плазма). Если при этом тела (отдельные части системы) соприкасаются друг с другом и находятся в равновесии одно с другим (например, вода и водяной пар), то говорят, что вещество в системе находится в разных *фазах*. Понятие «фаза» – более универсальное, чем понятие «агрегатное состояние», так как может определять различные кристаллические модификации, наблюдаемые в твердом растворе одного вещества (например, серое и белое олово). В общем случае в гетерогенных системах могут находиться как разные фазы одного вещества (вода и водяной пар), так и разные вещества (вода и воздух над ее поверхностью). Для полного описания состояния гетерогенных систем приходится использовать не только параметры  $p$ ,  $V$ ,  $T$ , но и дополнительные величины, например концентрацию, напряженность электрического поля и др.

Бесконечно медленный термодинамический процесс, состоящий из последовательности равновесных состояний, принято называть *равновесным* или квазистатическим. Сам процесс перехода от состояния к состоянию может происходить под влиянием различных внешних воздействий.

Равновесные процессы, протекающие в изотропных системах, являются *обратимыми*, т. е. они могут совершаться в обратном направлении и при этом в окружающей среде не произойдет никаких изменений.

Равновесная термодинамика представляет полное количественное описание именно обратимых процессов, а для необратимых – устанавливает лишь определенные неравенства и указывает направления протекания.

*Примечание.* В общем случае переход системы из одного состояния в другое (близкое состояние) связан с передачей системе элементарного количества теплоты  $\delta Q$ , которое идет на элементарное приращение внутренней энергии системы  $dU$  и совершение системой элементарной работы  $\delta A$  над внешними телами.

Сказанное является одной из формулировок *первого начала термодинамики* и аналитически выражается уравнением  $\delta Q = dU + \delta A$ .

Первое начало термодинамики отражает закон сохранения энергии для систем, в которых существенную роль играют тепловые процессы. Причем энергетическая эквивалентность теплоты и работы, входящих в выражение этого фундаментального начала, была установлена и экспериментально доказана еще в 1840-х годах Ю. Майером и Дж. Джоулем (в их работах был определен механический эквивалент теплоты – 4,185 Дж/кал).

Первое начало термодинамики вроде не исключает возможности создания тепловой машины циклического действия, которая была бы способна превращать в полезную работу практически всю подводимую к ней теплоту. Однако весь опыт конструирования тепловых машин, имевшийся уже к началу XIX в., указывал на то, что их КПД всегда меньше единицы.

Первым это показал в 1824 г. французский инженер С. Карно в работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу»: тепловая машина должна обязательно содержать помимо нагревателя и рабочего тела также холодильник. Причем для осуществления циклической работы машины температура холодильника  $T_x$

должна быть меньше температуры нагревателя  $T_n$ , а КПД даже идеального, обратимого термодинамического цикла (цикла Карно) должен подчиняться соотношению  $\eta = 1 - T_x / T_n < 1$ .

Затем Р. Клаузиус в 1850 г. обобщает выводы С. Карно на произвольные термодинамические процессы, протекающие в природе, в виде очень важного заключения.

**П р и м е ч а н и е.** Невозможен процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от тел менее нагретых к телам более нагретым.

Это высказывание принято считать одной из первых формулировок *второго начала термодинамики*.

В 1851 г. У. Томсон (лорд Кельвин) предложил еще одно определение этого закона: невозможно построить периодически действующую тепловую машину, вся функция которой сводилась бы к совершению механической работы и соответствующему охлаждению теплового резервуара. Таким образом, исключается возможность отбора некоторого количества теплоты от резервуара и превращение его полностью в полезную работу.

## **6.2. Энтропия как мера неравновесности состояний.**

### **Статистический смысл второго начала термодинамики**

Понятие *энтропии* как функции состояния было впервые введено Р. Клаузиусом в 1876 г. при рассмотрении обратимых процессов и выражалось через соответствующий дифференциал  $dS = \delta Q / T$ , где отношение справа – приведенное количество теплоты. После этого второе начало термодинамики приобрело еще одно важное звучание: в реальных (необратимых) адиабатических процессах  $dS \geq 0$ , т. е. энтропия в изолированной системе не убывает, достигая максимума в состоянии равновесия.

Часто говорят, что энтропия является мерой неравновесности состояния: чем выше значение  $S$  для данного состояния, тем это состояние ближе к равновесному.

Таким образом, закон возрастания энтропии в изолированной системе определяет направления тепловых процессов и устанавливает наличие в природе фундаментальной асимметрии (однонаправленность всех самопроизвольных процессов).

Казалось бы, что в изолированной системе возможны любые процессы, в ходе которых сохраняется внутренняя энергия системы, однако это не так. Дело в том, что различные состояния, отвечающие одной и той же энергии, обладают разной вероятностью. Естественно, что изолированная система будет самопроизвольно переходить из менее вероятных в более вероятные состояния либо пребывать преимущественно в состоянии с максимальной вероятностью.

□ **Пример 6.1.** *Процесс распространения газа.*

Пусть в одной из половин разделенного перегородкой сосуда находится газ, а в другой – вакуум. Если убрать перегородку, газ распространится на весь объем. Обратный процесс, в результате которого газ самопроизвольно собрался бы в одной из половин сосуда, невозможен. Это обусловлено тем, что вероятность состояния, при котором молекулы газа распределены поровну между частями сосуда, очень велика, а вероятность их свободного нахождения в одной половине сосуда практически равна нулю.

Следовательно, чтобы определить, какие процессы могут протекать в изолированной системе, нужно знать вероятность различных состояний этой системы.

Состояние макросистемы, которое может быть охарактеризовано заданием таких макропараметров как объем, давление, температура и т. п., принято называть *макросостоянием*.

Если удастся через соответствующие кинематические характеристики описать состояния всех молекул (частиц системы), то в этом случае говорят о задании *микросостояния* всей системы.

Любое макросостояние системы может быть представлено разными способами или, иначе говоря, реализовано через разные микросостояния. Так, состоянию равновесия в системе отвечает одно конкретное макросостояние, а микросостояния при этом могут изменяться.

Общее число различных микросостояний системы, посредством которых осуществляется данное макросостояние, называется *статистическим весом макросостояния* и обозначается  $W$ .

Статистический вес обычно выражается огромными числами. Например, для 1 моль кислорода при стандартных условиях  $W \geq 10^{24}$ .

В основе статистической физики лежит гипотеза, согласно которой все микросостояния данной термодинамической системы равновероятны. Отсюда следует, что вероятность макросостояния пропорциональна его статистическому весу  $W$ .

Оперировать в процессе определения вероятности состояния статистическим весом крайне трудно не только потому, что эта величина принимает большие значения, но и потому, что она не является аддитивной величиной. На практике используют логарифм статистического веса  $\ln W$ , который уже обладает аддитивным свойством. Так, если макросистема состоит из двух практически не взаимодействующих подсистем, находящихся в состояниях со статистическими весами  $W_1$  и  $W_2$  соответственно, то для всей системы можно записать:  $\ln W = \ln W_1 + \ln W_2$ .

В связи с этим в качестве характеристики вероятности состояния системы принимают величину  $\sigma = \ln W$ , которую называют *статистической энтропией* или *термодинамической вероятностью*. В статистической физике доказывается, что в ходе обратимого процесса

передачи системе количества теплоты  $\delta Q$  при температуре  $T$  энтропия  $\sigma$  получает элементарное приращение  $d\sigma = \delta Q / (kT)$  (здесь и далее  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К). Это выражение подобно соотношению  $dS = \delta Q / T$ , введенному Клаузиусом, поэтому обычно от энтропии  $\sigma$  переходят к термодинамической энтропии с помощью формулы Больцмана  $S = k \ln W$ .

Таким образом, основываясь на принципе возрастания энтропии в изолированной системе (второе начало термодинамики), Л. Больцман пришел к заключению: все замкнутые макросистемы стремятся переходить от менее вероятных состояний к более вероятным. Энтропия  $S$  приобретает значение степени беспорядка в макросистеме: состояниям с бóльшим беспорядком\* отвечает бóльшая вероятность  $\ln W$  (соответственно бóльшая  $S$ ), чем у более упорядоченного состояния.

### **6.3. Использование аппарата термодинамических потенциалов для установления устойчивости термодинамического равновесия в системе**

Используя основное уравнение термодинамики  $T dS = dU + p dV$  и ряд дополнительных термодинамических функций, таких, как *энтальпия*  $H = U + p V$ , свободная энергия  $F = U - T S$ , *энергия Гиббса*  $G = H - T S$ , определим условия, которым должно отвечать положение устойчивого термодинамического равновесия в системе.

Для этого предварительно определим полные дифференциалы указанных функций. Так как  $dU = T dS - p dV$ , то  $dH = T dS + V dp$ , т. е. здесь внутренняя энергия  $U$  и энтальпия  $H$  являются функциями двух независимых параметров состояния:  $(S, V)$  и  $(S, p)$ . Дифференциалы  $dF = -S dT - p dV$  и  $dG = -S dT + V dp$  являются функциями параметров  $(T, V)$

---

\* В состоянии равновесия наблюдается максимальный беспорядок в макросистеме (тепловой хаос молекул).

и  $(T, p)$  соответственно. Функции состояний  $U, H, F, G$  часто называют *термодинамическими потенциалами* системы для соответствующих независимых переменных.

Метод термодинамических потенциалов, разработанный американским физиком Дж. Гиббсом в 1874–78 гг., основан на совместном использовании первого и второго начал термодинамики и позволяет получить ряд важных термодинамических соотношений между различными физическими свойствами системы. Так, использование независимости вторых смешанных производных от порядка дифференцирования приводит к соотношению между изобарическим коэффициентом теплового расширения  $(\partial V / \partial T)_p$  и изотермическим коэффициентом сжатия  $(\partial V / \partial p)_T$ , т. е.  $(c_p - c_v) = -T (\partial V / \partial T)_p^2 / (\partial V / \partial p)_T$ , и к соотношению между адиабатическим и изотермическим коэффициентами сжатия  $(\partial V / \partial p)_S = c_v / c_p (\partial V / \partial p)_T$ .

Из положения о том, что изолированная система в равновесном состоянии обладает максимальным значением энтропии, вытекает условие минимальности термодинамических потенциалов в этом состоянии по отношению к произвольно малым отклонениям от равновесия при фиксированных значениях соответствующих независимых переменных. А это приводит к важным неравенствам – условиям устойчивости равновесия в системе:  $(\partial p / \partial V)_S < (\partial p / \partial V)_T < 0$ ;  $c_p > c_v > 0$ .

#### 6.4. Связь энтропии и информации

Энтропия в статистической физике тесно связана с так называемой *информационной энтропией*, которая служит мерой неопределенности сообщений. Сами сообщения описываются множеством дискретных величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и соответствующих вероятностей  $P_1, P_2, \dots, P_n$  появления этих величин в сообщении.



Для определенного (дискретного) статистического распределения вероятностей  $P_k$  информационной энтропией называют величину

$$H_{\text{inf}} = - \sum_{k=1}^n P_k \ln P_k \quad (\text{при условии нормировки } \sum_{k=1}^n P_k = 1). \quad (6.1)$$

Согласно (6.1)  $H_{\text{inf}} = 0$ , если какая-либо из вероятностей  $P_k$  становится равной единице, а все остальные равны нулю, в этом случае полученная информация является полностью достоверной и какая-либо неопределенность в сообщении отсутствует. И наоборот,  $H_{\text{inf}}$  принимает наибольшее значение  $H_{\text{max}}$ , когда все вероятности  $P_k$  одинаковы, в этом случае неопределенность информации максимальна.

Информационная энтропия  $H_{\text{inf}}$ , как и термодинамическая энтропия  $S$ , обладает свойством аддитивности, т. е. энтропия нескольких сообщений равна сумме энтропий отдельных сообщений  $H_{\text{inf}} = \sum_i H_i$ .

Из вероятностной трактовки информационной энтропии следует ее связь с основными распределениями статистической физики, установленными Дж. Гиббсом в 1901 г.

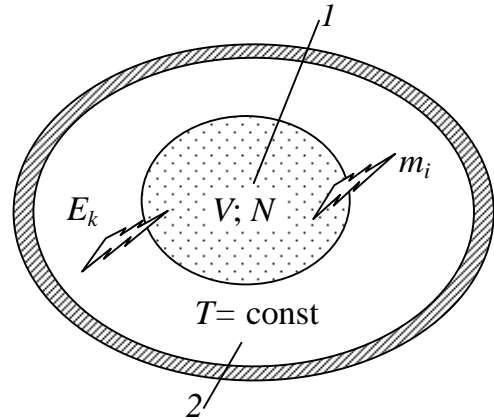
### 6.5. Распределения Гиббса для статистических систем

В статистической теории рассматриваются системы из очень большого числа тождественных частиц, не обладающих индивидуальными особенностями и, следовательно, являющихся неразличимыми. При исследовании таких систем используется подход Дж. Гиббса, заключающийся в следующем.

В обширной изолированной системе (рис. 6.1) выделяют малую часть (подсистему, сохраняющую свойства макросистем), заключенную в оболочку с жесткими неподвижными стенками, но, в общем случае, проницаемыми для вещества ( $m_i$ ) и допускающими свободный энергообмен ( $E_k$ ) с остальной частью всей системы, имеющей

фиксированную температуру  $T$  и называемой *термостатом*. Таких подсистем может быть несколько.

Дальнейший анализ проводится по отношению к самим подсистемам, которые подразделяются в зависимости от характера протекающих в них процессах на особые ансамбли частиц. Для ансамблей используются соответствующие распределения Гиббса.



**Рис. 6.1.** Модель ансамбля Гиббса: 1 – подсистема; 2 – термостат.

*Каноническое распределение Гиббса* применимо для подсистем постоянного объема  $V$  с неизменным числом частиц  $N$ , находящихся в контакте с термостатом и обменивающимися с ним энергией  $E_k$ . Такие подсистемы принято называть *каноническим ансамблем Гиббса*.

Для канонического ансамбля записывается функция равновесного распределения вероятностей состояний

$$f(q, p) = \exp\left[\frac{F - H(q, p)}{k T}\right], \quad (6.2)$$

где  $F$  – свободная энергия, как функция переменных  $(V, T, N)$ ;  $H(q, p)$  – функция Гамильтона (функция полной энергии) в фазовом пространстве обобщенных координат  $q$  и импульсов  $p$ . При этом вероятность нахождения частицы в рассматриваемом состоянии в элементе фазового пространства  $(dqdp)$  определяется по формуле  $dP = f(q, p) \frac{dq dp}{N! h^{iN}}$ , где  $i$  – число степеней свободы частицы,  $h$  – постоянная Планка, равная  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Энтропия для классических (неквантовых) подсистем при непрерывной функции  $f(q, p)$  вычисляется по формуле Гиббса  $S = -k \int f(q, p) \ln f(q, p) d\Gamma$ , где  $d\Gamma = \frac{dq dp}{N! h^{iN}}$  – число возможных

состояний подсистемы в элементе фазового пространства (с учетом условия нормировки  $\int f(q, p) d\Gamma = 1$ ). Для квантовых (дискретных) систем интеграл заменяется соответствующей суммой вероятностей  $P_i$  нахождения системы в некотором квантовом состоянии с энергией  $E_i$ , характеризуемом определенным набором квантовых чисел  $\{l\}$  без указания координат и импульсов, т. е.  $S = -k \sum_i P_i \{l\} \ln P_i \{l\}$  (с учетом условия нормировки  $\sum_i P_i \{l\} = 1$ ).

**П р и м е ч а н и е.** Для дискретного потока информации можно записать аналогичное формуле (6.2) распределение вероятностей появления отдельных информационных данных, которому соответствует максимальное значение информационной энтропии при заданной средней плотности информации.

*Большое каноническое распределение Гиббса* применимо для подсистем постоянного объема  $V$ , находящихся в контакте с термостатом и обменивающихся с ним энергией и веществом. Такие подсистемы называют *большим каноническим ансамблем Гиббса*. Объем этих подсистем поддерживается постоянным за счет полупроницаемости стенок.

Для большого канонического ансамбля функция равновесного распределения вероятностей состояний принимает вид

$$f(q, p) = \exp \left[ \frac{\Phi - H(q, p) + \mu N}{k T} \right], \quad (6.3)$$

где  $\Phi$  – термодинамический потенциал, как функция переменных  $(V, T, \mu)$ ;  $\mu$  – химический потенциал (термодинамическая функция состояния, определяющая изменение термодинамического потенциала при изменении числа частиц в подсистеме).

## 6.6. Флуктуации

В статистической физике изучаются процессы, связанные с флуктуациями, в ходе которых система переходит из более вероятного

состояния в менее вероятное, при этом уменьшается энтропия системы. Присутствие флуктуаций сказывается даже на проявлении общего закона возрастания энтропии: он выполняется только в среднем за большой промежуток времени.

Под *флуктуациями*\* понимают случайные отклонения физических величин от их средних значений.

Среднее значение непрерывно изменяющейся величины  $x$  для классических систем определяется по формуле  $\bar{x} = \int_{V_p, V_q} x(q, p) f(q, p) dq dp$ , а для квантовых систем –  $\bar{x} = \sum_i x_i \cdot P_i \{l\}$ .

Флуктуациям подвержены величины, которые зависят от случайных факторов. В качестве количественных характеристик флуктуаций используются величины, заимствованные из математической статистики и теории вероятностей, а именно:

- *дисперсия*  $\sigma_x^2$ , т. е. средний квадрат отклонения величины  $x$  от ее среднего значения  $\bar{x}$ ,  $\sigma_x^2 = \overline{(x_i - \bar{x})^2} = \overline{x_i^2} - \bar{x}^2$  (здесь сверху длинной чертой обозначено статистическое усреднение);
- *среднее квадратичное отклонение*  $\sigma_x$ , равное  $\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$ , или его относительное значение  $\delta_x = \sigma_x / \bar{x}$ .

Статистическая физика определяет в качестве источника флуктуаций тепловое хаотическое движение частиц, образующих систему. Как показывает эксперимент значения экстенсивных величин, пропорциональных объему системы (это, например, энергия), незначительно отличаются от их средних значений. Иначе говоря, реализуемые флуктуации обычно очень малы: так, относительная флуктуация  $\delta_x \sim 1/\sqrt{N}$ , где  $N$  – большое число частиц.

---

\* В переводе с латыни fluctuation – колебание.

Однако вблизи так называемых критических точек в системе – точек фазовых переходов, например вблизи тройной точки воды, для выделенных относительно малых объемов (подсистем) флуктуации могут быть установлены по заметному рассеянию видимого света, рентгеновского излучения или пучков медленных нейтронов.

Так, рост флуктуаций концентрации частиц в критической точке равновесной системы «жидкость – пар» приводит к заметному усилению рассеяния света даже в химически чистых жидкостях. В этом случае флуктуации могут достигать размеров  $\sim 0,1$  мкм, что сравнимо с длиной волны излучения, и жидкая среда становится совершенно непрозрачной (мутной).

Рост флуктуаций плотности стимулирует такие явления, как дисперсия и поглощение звука, замедляет процесс релаксации в системе, изменяет характер броуновского движения, приводит к аномалиям вязкости, теплопроводности и других свойств.

Рассмотренные ранее распределения Гиббса как для классического, так и для квантового случая позволяют вычислять флуктуации\* в состоянии равновесия для систем, отвечающих условиям функционирования соответствующих ансамблей. Так, для канонического ансамбля Гиббса флуктуация энергии (в форме дисперсии  $\sigma_x^2$ ) принимает значение  $\overline{(E_i - \bar{E})^2} = \overline{\Delta E^2} = (kT)^2 c_v$ .

Кроме вычисления самих флуктуаций изучаемых величин  $x_i$ ,  $x_k$  можно определять также *корреляции* между этими величинами, т. е. выражения вида  $\overline{\Delta x_i \Delta x_k}$ , определяющие влияние изменения одной из

---

\* Основы теории флуктуаций были заложены в работах Дж. Гиббса (1902 г.), А. Эйнштейна (1905-06 гг.), М. Смолуховского (1906 г.).

величин на изменение другой. Например, корреляция объема и давления равна  $\overline{\Delta V \Delta p} = -kT$ .

В заключении следует отметить, что сфера применения общих термодинамических понятий и положений в случае действия флуктуаций ограничена большими системами (макросистемами, где значение  $N$  очень велико), для которых, как было показано ранее, флуктуации оказываются значительно меньше самих флуктуирующих величин.

Учет действия флуктуаций в системе приводит к необходимости дополнения содержания второго начала термодинамики. Утверждение о невозможности вечного двигателя 2 рода остается справедливым, но одновременно допускаются частные флуктуации системы из равновесного состояния в неравновесные состояния с меньшей энтропией. Для средних же величин по-прежнему работает закон возрастания энтропии в изолированной системе.

### **6.7. Основные положения, методы и законы термодинамики неравновесных процессов**

*Термодинамика неравновесных процессов* – это общая теория описания неравновесных процессов, протекающих в макросистемах, ее также называют неравновесной термодинамикой.

Следует напомнить, что рассмотренная ранее равновесная термодинамика предоставляет полное количественное описание равновесных (обратимых) процессов, а для неравновесных процессов устанавливает только возможное направление их развития.

Поэтому основной задачей термодинамики неравновесных процессов становится их количественное описание для состояний, не сильно отличающихся от равновесных.

В термодинамике неравновесных процессов рассматривают системы, представляющие собой непрерывные среды, а их параметры состояния – полевые переменные, т. е. непрерывные функции координат и времени.

Используют следующий метод описания изучаемых процессов: систему представляют состоящей из элементарных объемов (элементов среды), которые все же остаются достаточно большими, так как содержат по-прежнему большое число частиц. При этом состояние каждого элемента среды определяется термодинамическими параметрами ( $T$ ,  $p$ ,  $n$  и др.), которые зависят от координат и времени.

Количественное описание неравновесных процессов при таком методе сводится к составлению уравнений баланса для элементарных объемов на основе законов сохранения массы, импульса, энергии, а также уравнения баланса энтропии и так называемых феноменологических уравнений рассматриваемых процессов.

Метод неравновесной термодинамики позволяет сформулировать первое и второе начала термодинамики в локальной форме (положение элемента среды зависит от координат и времени), получить полную систему уравнений процессов переноса для простых и сложных систем (например, для систем с химическими реакциями между их компонентами).

**Закон сохранения массы.** В случае многокомпонентной системы скорость увеличения массы  $k$ -го компонента в элементарном объеме равна потоку массы в этот объем  $\rho_k \vec{v}_k$ , где  $\rho_k$  и  $\vec{v}_k$  – плотность и скорость частиц  $k$ -го вида. Поскольку поток в бесконечно малый объем можно определить как дивергенцию, взятую с обратным знаком, то уравнение баланса массы  $k$ -го компонента имеет вид  $\partial \rho_k / \partial t = -\text{div}(\rho_k \vec{v}_k)$ , а для суммарной плотности системы  $\rho = \sum_k \rho_k$  закон сохранения массы принимает форму уравнения неразрывности:  $\partial \rho / \partial t = -\text{div}(\rho \vec{v})$ , где  $\vec{v}$  – гидродинамическая

скорость всей среды. Для концентрации  $k$ -го компонента среды  $n_k = \rho_k / \rho$  закон сохранения массы принимает форму:

$$\rho (dn_k / dt) = -\operatorname{div} \vec{J}_k, \quad (6.4)$$

где  $\vec{J}_k = \rho_k (\vec{v}_k - \vec{v})$  – диффузионный поток  $k$ -го компонента;  $(d/dt) = \partial/\partial t + \vec{v} \nabla$  – полная производная по времени.

**Закон сохранения импульса.** Импульс в элементарном объеме может изменяться под воздействием внешних сил  $F_k$  и сил, обусловленных градиентом внутренних напряжений в среде,  $P_{\beta\alpha}$ . В связи с этим закон сохранения импульса позволяет получить основное уравнение динамики сплошных сред – уравнение Навье – Стокса:

$$\rho (dv_\alpha / dt) = -\sum_{\beta=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_\beta} P_{\beta\alpha} + \sum_k \rho_k F_k, \quad (6.5)$$

где  $x_\beta$  – декартовы координаты (т. е.  $x, y, z$ );  $v_\alpha$  – декартовы компоненты вектора скорости среды (т. е.  $v_x, v_y, v_z$ );  $P_{\beta\alpha}$  – тензор внутренних напряжений;  $F_k$  – внешняя сила, действующая на  $k$ -й компонент среды.

**Закон сохранения энергии.** Для изучаемых неравновесных процессов в элементарных объемах этот закон отражает первое начало термодинамики. При этом следует учитывать, что плотность полной энергии (на единицу объема) включает в себя плотность кинетической энергии, плотность потенциальной энергии в поле действия внешних сил  $F_k$  и плотность внутренней энергии  $u$ .

В результате такой записи закона сохранения энергии получается уравнение баланса для внутренней энергии:

$$\rho (du / dt) = -\operatorname{div}(\rho u \vec{v}) - \operatorname{div} \vec{J}_q - \sum_{\alpha, \beta} P_{\beta\alpha} \frac{\partial v_\alpha}{\partial x_\beta} + \sum_k \vec{J}_k \vec{F}_k, \quad (6.6)$$



где  $\text{div}(\rho u \vec{v})$  – дивергенция потока внутренней энергии;  $\text{div} \vec{J}_q$  – дивергенция потока теплоты;  $\sum_{\alpha\beta} P_{\beta\alpha} \frac{\partial v_\alpha}{\partial x_\beta}$  – работа сил, обусловленных внутренними напряжениями;  $\sum_k \vec{J}_k \vec{F}_k$  – работа внешних сил.

### 6.8. Уравнение баланса энтропии и производство энтропии

В термодинамике неравновесных процессов рассматривается энтропия элементарного объема  $s$  как функция внутренней энергии  $u$ , удельного объема  $v = 1/\rho$  и концентрации  $n_k$ , т. е.  $s = f(u, v, n_k)$ , а, следовательно, для нее справедливы обычные термодинамические соотношения. Эти положения с учетом законов сохранения массы, импульса и энергии для рассматриваемого элемента среды позволяют записать уравнение баланса энтропии:

$$\rho (ds/dt) = -\text{div} \vec{J}_s + \sigma, \quad (6.7)$$

где  $\vec{J}_s$  – плотность потока энтропии;  $\sigma$  – локальное *производство энтропии* (на единицу объема в единицу времени). Плотность потока энтропии выражается через плотность потока теплоты  $\vec{J}_q$ , плотность диффузионного потока  $\vec{J}_k$  и ту часть тензора внутренних напряжений  $P_{\beta\alpha}$ , которая определяет неравновесность процессов, т. е. тензор вязких напряжений  $\Pi_{\beta\alpha}$ . Так как вследствие действия необратимых процессов энтропия в элементарном объеме не остается неизменной, а возрастает, то это положение в уравнении (6.7) задается всегда положительной скоростью нарастания энтропии ( $\sigma > 0$ ), что согласуется со вторым началом термодинамики.

Производство энтропии  $\sigma$  в элементе среды определяется только необратимыми процессами, такими, как процессы переноса (диффузия, теплопроводность, вязкость и т. п.), и представляется в общем виде как:

$$\sigma = \sum_i \vec{J}_i \vec{X}_i, \quad (6.8)$$

где  $\vec{J}_i$  – соответствующие термодинамические потоки ( $\vec{J}_k, \vec{J}_q$ ) и тензор вязких напряжений  $P_{\beta\alpha}$ ;  $\vec{X}_i$  – сопряженные с потоками термодинамические силы (градиенты соответствующих термодинамических параметров  $\partial n_k / \partial x_\beta, \partial T_k / \partial x_\beta$ ).

**Феноменологические уравнения.** В неравновесной термодинамике для получения замкнутой системы уравнений потоки физических величин  $\vec{J}_i$  выражают через термодинамические силы  $\vec{X}_i$ , при этом используется допущение малых отклонений системы от термодинамического равновесия. Возникающие термодинамические потоки линейно зависят от термодинамических сил и описываются особыми *феноменологическими уравнениями* вида:

$$\vec{J}_i = \sum_k L_{ik} \vec{X}_k, \quad (6.9)$$

где  $L_{ik}$  – соответствующий кинетический коэффициент (коэффициент переноса),  $\vec{X}_k$  – термодинамическая сила.

В так называемых *прямых процессах* сила  $\vec{X}_k$  вызывает поток  $\vec{J}_k$ . Например, градиент температуры вызывает поток теплоты (обеспечивает теплопроводность), градиент концентрации – поток вещества (обеспечивает диффузию), градиент скорости – поток импульса (определяет вязкостные свойства среды), градиент электрического потенциала – электрический ток (обеспечивает электропроводность). Для каждого из названных процессов определяется соответствующий кинетический коэффициент  $L_{ik}$ : коэффициент теплопроводности, коэффициент диффузии, коэффициент вязкости, коэффициент электропроводности.

Термодинамическая сила  $\vec{X}_k$  может вызвать и несопряженный с ней поток  $\vec{J}_i$  при  $i \neq k$ , например, градиент температуры вызывает поток вещества  $\vec{J}_k$  в многокомпонентной системе (проявление так называемой *термодиффузии*), градиент концентрации – поток теплоты  $\vec{J}_q$  (проявление *диффузионного термоэффекта*). Такие процессы принято называть *перекрестными процессами* (или налагающимися эффектами), они характеризуются особыми коэффициентами  $L_{ik}$  с  $i \neq k$ .

С учетом определенных феноменологических уравнений производство энтропии определяется как

$$\sigma = \sum_{i,k} \vec{X}_i L_{ik} \vec{X}_k \geq 0 \quad (6.10)$$

**Теорема Пригожина.** В 1947 г. бельгийский физик И. Пригожин при разработке основных положений неравновесной термодинамики (за это в 1977 г. ему присуждена Нобелевская премия) сформулировал и доказал следующую теорему.

При заданных внешних условиях, препятствующих достижению системой равновесного состояния, *стационарному* (не изменяемому во времени) *состоянию* системы соответствует минимальное производство энтропии  $\sigma_{min}$ .

Если внешних препятствий нет (система изолирована), то  $\sigma \rightarrow 0^*$  и в состоянии термодинамического равновесия  $\sigma = 0$ . Теорема Пригожина справедлива, если кинетические коэффициенты постоянны, для реальных систем эта теорема выполняется лишь приблизительно.

Пригожин при доказательстве своей теоремы воспользовался установленными в 1931 г. американским физиком Л. Онсагером соотношениями между кинетическими коэффициентами  $L_{ik}$  для перекрестных процессов. Онсагер показал, что в отсутствие внешнего магнитного поля с напряженностью  $\vec{H}$  и вращения системы с угловой

---

\* Минимальность  $\sigma$  для стационарного состояния не является столь общим принципом, как максимальность энтропии  $s$  для равновесного состояния.

скоростью  $\vec{\omega}$  существует равенство коэффициентов  $L_{ik} = L_{ki}$ , а когда действуют магнитное и инерционное поля, следует пользоваться преобразованиями

$$\begin{aligned}L_{ik}(\vec{H}) &= L_{ki}(-\vec{H}); \\L_{ik}(\vec{\omega}) &= L_{ki}(-\vec{\omega}).\end{aligned}$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Что изучает термодинамика? На чем основана феноменологическая термодинамика? Какие термодинамические системы Вам известны?
2. Что объединяет термодинамику и статистическую физику?
3. Что представляют собой гомогенные термодинамические системы? Какие тела могут входить в состав гетерогенных систем?
4. Дайте определение фазы. Может ли в структуре твердого тела быть более одной фазы?
5. Какие термодинамические процессы называются равновесными? Каким требованиям должны удовлетворять системы, чтобы в них протекали обратимые процессы?
6. В чем состоит предназначение равновесной термодинамики?
7. Приведите дифференциальную форму записи первого начала термодинамики и дайте ее толкование.
8. Сформулируйте второе начало термодинамики. Почему не возможен перпетуум-мобиле 2-го рода?
9. Почему энтропию рассматривают как меру неравновесности состояния? Какой закон устанавливает наличие в природе общей асимметрии?
10. Какое состояние системы называют макросостоянием, микросостоянием?

11. Что называется статистическим весом макросостояния? Какая гипотеза относительно микросостояний лежит в основе статистической физики?

12. Какую величину принято называть статистической энтропией (термодинамической вероятностью), какими свойствами она обладает?

13. Запишите формулу Больцмана для энтропии и объясните ее. Какое состояние в замкнутой макросистеме отвечает максимальному беспорядку?

14. Какие функции состояний принято называть термодинамическими потенциалами? Что является условиями равновесного состояния в системе и устойчивости этого равновесия?

15. Какую величину принято называть информационной энтропией, какими свойствами она обладает?

16. Что такое термостат с позиций сложной термодинамической системы?

17. Какие системы принято называть каноническим ансамблем Гиббса, что им присуще?

18. Как в статистических теориях принято рассчитывать энтропию для классических (неквантовых) систем и как – для квантовых?

19. Какие системы принято называть большим каноническим ансамблем Гиббса, что им присуще?

20. Дайте определение флуктуаций. Какие величины подвержены флуктуациям? Какие количественные характеристики используются при анализе флуктуаций?

21. В каких случаях флуктуации имеют решающее значение в эволюции систем? Как флуктуации уточняют смысл второго начала термодинамики? Какую величину рассчитывают, если хотят установить взаимное влияние флуктуаций двух отдельных величин?

22. Каково предназначение неравновесной термодинамики?

23. В чем заключается метод исследования (описания) процессов в неравновесной термодинамике? Какая система уравнений при этом составляется?

24. Запишите выражение для диффузионного потока некоторого  $k$ -го компонента сложной многокомпонентной системы. Как записывается уравнение баланса массы для этого компонента?

25. С каким законом сохранения связано уравнение Навье – Стокса?

26. Определите качественный состав уравнения баланса внутренней энергии макросистемы.

27. Запишите и объясните уравнение баланса энтропии. Какие термодинамические потоки определяют плотность потока энтропии? Чем обусловлено положительное производство энтропии в системе, как оно рассчитывается?

28. Как (в форме каких уравнений) в неравновесной термодинамике принято записывать термодинамические потоки?

29. Сформулируйте теорему Пригожина; для каких условий она справедлива? Какой принцип является более общим: минимальность производства энтропии в стационарном состоянии или максимальность энтропии для равновесного состояния?

30. Что отражают соотношения Онсагера для кинетических коэффициентов перекрестных процессов?

## 7. ПОРЯДОК И ХАОС В ПРИРОДЕ

### 7.1. Стрела времени

Термодинамика XX–XXI вв. исследует открытые системы в состояниях, далеких от равновесия. В неравновесной термодинамике ставится серьезная задача – доказать то, что сама неравновесность может служить причиной установления порядка в системе.

Введенное еще в 1928 г. английским астрофизиком А. Эддингтоном понятие «стрела времени»<sup>\*</sup> для характеристики течения времени из прошлого в будущее на самом деле носит концептуальный характер в естествознании и позволяет охарактеризовать направление необратимой динамики (эволюции) рассматриваемой системы (образование – существование – распад).

Сейчас установлено, что необратимость вызывает множество новых явлений, таких, как образование вихрей в слое жидкости, колебательные химические реакции, лазерное излучение и др. Необратимость, таким образом, играет заметную конструктивную роль. Невозможно представить жизнь в мире, лишенном связей с необратимыми процессами. Как говорит И. Пригожин<sup>\*\*</sup>, «мы дети стрелы времени, эволюции, но отнюдь не ее создатели».

Можно предполагать, что при разработке фундаментальных положений *эволюционного естествознания* (которое сейчас стремительно развивается) будут использованы такие неклассические представления, как неконтролируемое воздействие, флуктуации, необратимость. Причем, как показывает практика, существенно важными оказываются только большие

---

\* Понятие «стрела времени» возникло в физике при описании переносных процессов (диффузии, теплопроводности, вязкости и т. п.).

\*\* Пригожин И., Стенгерс И. *Время, хаос, квант. К решению парадокса времени*: Пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС, 2001.

флуктуации, возникающие в условиях, когда исследуемая система находится вдали от состояния равновесия (система неустойчива).

Подобные ситуации, как утверждает современная наука, являются обязательными для любых открытых *динамических систем*.

## **7.2. Классификация динамических систем: устойчивые и неустойчивые системы**

Системы, предрасположенные к изменению своей структуры, принято называть динамическими. Эти *системы* подразделяют на *устойчивые* и *неустойчивые*.

Например, идеальный маятник (без трения) – устойчивая динамическая система, так как слабые внешние возмущения практически не сказываются на характере его движения.

Для большинства динамических систем слабые возмущения усиливаются, придавая системе неустойчивость, таким образом формируется неустойчивая динамическая система.

**Хаотические системы.** В качестве наиболее неустойчивых динамических систем следует рассматривать *хаотические системы*, описание движения которых с позиций классических траекторий становится недостаточным, поскольку рассматриваемые траектории таких систем, изначально практически совпадающие, с течением времени экспоненциально расходятся.

Так как для хаотических систем понятие «траектория» становится вырожденным, то для них используется *вероятностное описание* в терминах *ансамбля траекторий*, т. е., по сути, применяется подход, разработанный и развитый Дж. Гиббсом и А. Эйнштейном в статистической физике.

Важное свойство вероятностного описания хаотических систем – несводимость, иначе говоря, неприменимость его к отдельной траектории.



В связи с этим можно утверждать и обратное, а определению рассматриваемых систем придать следующую форму: все системы, допускающие несводимое вероятностное описание, являются хаотическими.

Таким образом, хаотические системы описываются не в терминах отдельных траекторий (или отдельных волновых функций в случае квантовых систем), а в терминах ансамблей (или пучков) траекторий.

Кроме того, динамические системы в соответствии с подходом А. Пуанкаре (французский математик доказал в 1889 г. теорему об общей неинтегрируемости динамических систем) подразделяют на:

- *интегрируемые*, для которых удастся исключить взаимодействие частей *системы*;
- *неинтегрируемые*, для которых не удастся исключить взаимодействие частей *системы*.

Интегрируемые системы – это, по существу, изоморфные системы свободных частиц, т. е. все движения таких систем изоморфны (подобны по форме) движению свободных (невзаимодействующих) частиц, а простейшая форма их уравнений движения позволяет путем интегрирования получить в явном виде траектории частиц.

**П р и м е ч а н и я.** 1. Пуанкаре в своей теореме доказал принципиальную неинтегрируемость динамических систем в общем случае и указал причину этого – возникновение резонансов.

2. Если бы природные динамические системы были интегрируемыми, то не наблюдалось бы никакого согласия между ними.

### **7.3. Стационарные состояния.**

#### **Понятия порядка и беспорядка**

Утверждение Р. Клаузиуса о том, что все природные процессы приводят к росту энтропии, на самом деле относится к физико-химическим

процессам (химические реакции, перенос импульса и теплоты, диффузия и т. п.). Эти процессы увеличивают энтропию, и для их описания используется особая терминология, несвойственная обратимым преобразованиям, к которым относятся, например, колебания маятника. Так, химическая реакция подчеркивает различие между прошлым и будущим: она развивается в направлении равновесного состояния, которое должно наступить. Аналогично в изолированной системе согласно нулевому началу термодинамики все исходные неоднородности в термодинамических параметрах выравниваются, и в перспективе в такой системе устанавливается однородное распределение параметров. Получается, что эволюция имеет ограниченное смысловое содержание – она ведет к устранению порождающих ее причин.

Равновесие в системе соответствует вполне конкретной ситуации (изоляции системы). Если же наложить извне ограничения (например, обеспечить постоянный теплообмен системы с внешней средой), то можно помешать системе достичь равновесия. При этом система может перейти в не зависящее от времени *стационарное состояние*, в котором энтропия системы не изменяется, несмотря на продолжающуюся в ней *физико-химическую активность* и, следовательно, генерацию энтропии.

Согласно уравнению баланса энтропии изменение энтропии с течением времени всегда можно подразделить на два вклада: 1) поток энтропии  $\vec{J}_s$ , зависящий от обмена системы с внешней средой, 2) производство энтропии  $\sigma$ , обусловленное необратимыми процессами в самой системе. В соответствии со вторым началом термодинамики производство энтропии должно быть положительным или обращаться в нуль при достижении состояния равновесия. На поток энтропии  $\vec{J}_s$  второе начало не накладывает никаких ограничений.

Следовательно, в стационарном состоянии положительное производство энтропии ( $\sigma > 0$ ) компенсируется отрицательным потоком энтропии извне ( $-\text{div}\vec{J}_s$ ). При этом сама физико-химическая активность в системе поддерживается в ходе постоянного обмена с внешней средой. Равновесие в системе наблюдается в том случае, когда и поток энтропии  $\vec{J}_s \rightarrow 0$ , и ее производство  $\sigma \rightarrow 0$ .

Для примера рассмотрим термодиффузию. Два сосуда одинакового объема  $V$  соединены трубкой и заполнены смесью двух газов, например водорода и азота (рис. 7.1). В состоянии равновесия диагностируем в обоих сосудах однородную смесь заданных газов.

Выведем систему из равновесия путем дополнительного нагрева

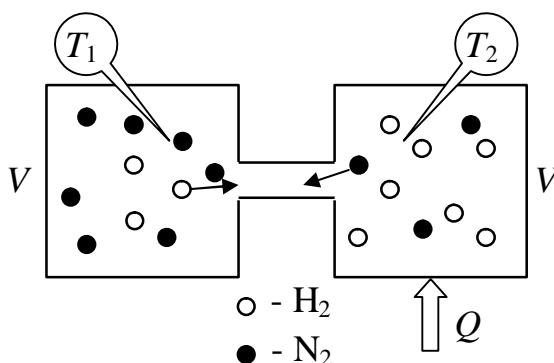


Рис. 7.1. Схема термодиффузии

правого сосуда и будем поддерживать эту наложенную на систему связь  $Q$ , постоянно подогревая этот сосуд. Таким образом, мы обеспечиваем в системе отрицательный поток (приток) энтропии.

В этом случае тепловой поток, подводимый к правому сосуду, вызывает термодиффузию легкой ( $H_2$ ) и тяжелой ( $N_2$ ) компонент смеси, что приводит к разделению двух газов между сосудами. А именно: при достижении в системе стационарного состояния (температура  $T$  и концентрация  $n$  внутри системы перестают изменяться с течением времени) в горячем сосуде с  $T_2$  окажется больше молекул водорода, а в холодном сосуде с  $T_1$  – больше молекул азота, разность концентраций

газов в сосудах будет пропорциональна разности температур, т. е.  $(n_H - n_N) \sim (T_2 - T_1)$ .

Активность системы, обуславливающая производство энтропии, связана не только с выравниванием температур за счет теплового потока, но и с созданием особого *порядка* (неоднородные распределения газов по всей системе, состоящей из двух сосудов). Причем за создание такого порядка приходится, как говорят, расплачиваться энтропией: для поддержания системы в стационарном состоянии необходимо организовывать постоянный энтропийный обмен между системой и внешней средой, т. е. необходимо постоянно подогревать горячий сосуд. При этом растущий молекулярный *беспорядок*, порождаемый тепловым потоком, следует рассматривать как цену за возможность создания порядка, который в приведенном примере представляет собой различие в составе газовой смеси в сосудах.

Другие примеры. На протяжении долгих лет турбулентность в потоке жидкости рассматривалась исключительно с позиций беспорядка. Напротив, структура кристалла идеализировалась с позиций порядка.

На самом деле турбулентная система упорядочена, так как движения даже двух молекул, разделенных макроскопическим расстоянием ( $\sim 1$  см), остаются коррелированными в рамках всего течения. Наоборот, атомы, образующие кристалл, в ходе теплового движения колеблются около своих равновесных положений несогласованным образом, поэтому с точки зрения мод колебаний кристалл оказывается неупорядоченной системой.

Уже при рассмотрении термодиффузии встает вопрос о цене за создание необходимого порядка. Также в случае с кристаллом: хотя тот и может быть изолирован от внешней среды, но порядок в нем зависит от постоянной упорядочивающей активности, т. е. от процесса производства энтропии. Аналогичная ситуация характерна и для живых организмов. Так,

построение сложных биомолекул происходит за счет разрушения других молекул при метаболических процессах.

Следовательно, порядок и беспорядок являются неотъемлемыми частями и продуктами коррелированных эволюционных процессов.

#### 7.4. Диссипативные структуры

Диссипативными структурами принято называть структуры, которые образуются и существуют в макросистеме, когда последняя диссипирует (рассеивает) свою энергию и соответственно нарабатывает энтропию.

Например, рассмотрим отопление жилого дома зимой. При наличии хорошей (идеальной) теплоизоляции отопление вообще можно выключить после того, как в помещении установится комфортная температура. Эту ситуацию можно рассматривать как состояние равновесия в системе (жилое помещение). Если же в оконных рамах есть щели и изоляция далека от идеала, то для поддержания баланса между потерями и подводом теплоты придется топить постоянно. Такой баланс уже следует рассматривать как стационарное состояние в системе. И чем несовершенней теплоизоляция, тем все больше приходится подводить теплоты. При этом сама система все больше удаляется от равновесия, и, следовательно, приходится платить большую цену за растущие потери теплоты.

Но такое наблюдается не всегда. Для ряда систем может существовать порог, начиная с которого их поведение коренным образом изменяется.

Под термином «диссипативные структуры» часто понимают (по выражению И. Пригожина<sup>\*</sup>) некоторое «организованное поведение системы, которое может при этом возникнуть, знаменуя поразительную

---

<sup>\*</sup> Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени: Пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС, 2001.

взаимосвязь двух противоположных аспектов равновесной термодинамики: диссипации, обусловленной порождающей энтропию активностью, и порядка, нарушаемого, согласно традиционным представлениям, этой самой диссипацией».

Изначально изучением диссипативных структур интенсивно занимались две науки – гидродинамика и химическая кинетика. Рассмотрим возникновение диссипативных структур на ряде примеров.

**Неустойчивость Бенара.** Этот эффект проявляется в следующей гидродинамической системе. В тонком слое жидкости (рис. 7.2) внешним образом поддерживается разность температур между нижней, подогреваемой, поверхностью (с температурой  $T_2$ ) и верхней, свободной, поверхностью, находящейся при комнатной температуре ( $T_1$ ).

При малой разности температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  (вблизи равновесия) перенос теплоты происходит вследствие теплопроводности, т. е. посредством столкновений молекул при их хаотическом движении.

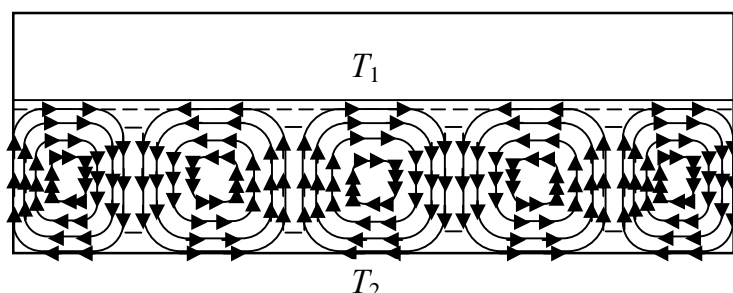


Рис. 7.2. Вихри Бенара

Выше определенной пороговой разности температур, т. е. при  $\Delta T > \Delta T_{\text{пор}}$  теплота начинает переноситься за счет конвекции, когда молекулы наряду с хаотическим движением участвуют в коллективном вихревом движении. Образующиеся вихри разделяют рассматриваемый слой жидкости на регулярные ячейки – ячейки Бенара. Сами вихри также принято называть *вихрями Бенара*.

Современная теория рассматривает такое коллективное движение молекул как проявление спонтанного нарушения пространственной

симметрии. Вблизи состояния равновесия слой жидкости однороден, движение молекул несогласованно и подчиняется вероятностным законам. Но при наступлении *неустойчивости Бенара* ситуация кардинально меняется: в одной локальной области жидкости большие группы молекул поднимаются, а в другой – опускаются, поскольку вовлечены в общее конвективное движение.

Таким образом, в результате единственной внешней тепловой связи, наложенной на слой жидкости, целые колонии молекул, взаимодействующих все время посредством случайных столкновений, могут включиться в общее согласованное движение.

**Структуры Тьюринга.** Химическими диссипативными структурами, также нарушающими пространственную симметрию, являются *структуры Тьюринга*, названные в честь А. Тьюринга. Он первым в 1952 г. высказал гипотезу о взаимодействии между нелинейными химическими реакциями и диффузией, которое ведет к образованию пространственных структур, различающихся концентрациями реагентов.

В конце 80-х годов XX в. было проведено численное двумерное моделирование химически реагирующей системы, удовлетворяющей требованиям, необходимым для появления диссипативных структур. Результаты моделирования позволили проследить переход от пространственно однородного, равновесного, состояния системы к ее пространственно структурированным состояниям по мере того, как

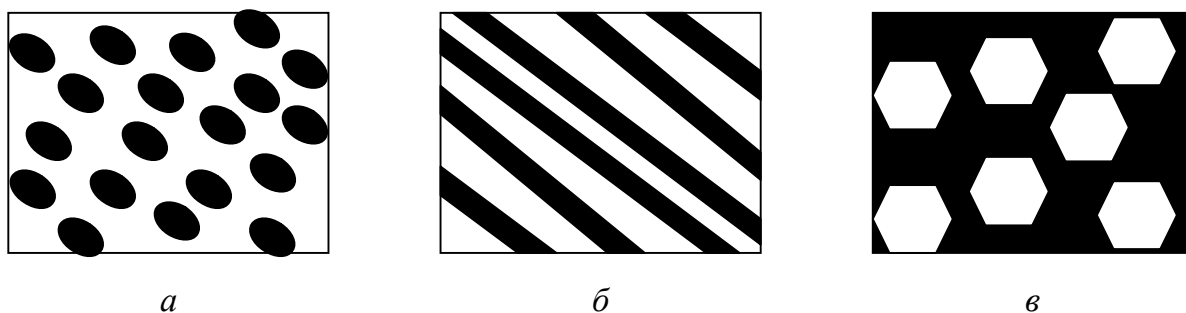


Рис. 7.3. Структуры Тьюринга

система удалялась от своего равновесия. Причем в системе наблюдалась последовательная смена пространственных структур, обладающих определенной областью устойчивости. На рис. 7.3 изображены характерные структуры Тьюринга, возникающие в различные периоды динамики системы. По мере изменения концентрации реагентов смеси сначала появляется структура «пчелиные соты» (рис. 7.3, а), затем – «полосы» (рис. 7.3, б) и, наконец, – «гексагональная структура» (рис. 7.3, в). На рисунке белые зоны соответствуют максимальной концентрации реагентов.

Таким образом, диссипативные структуры можно рассматривать как пространственные, временные или пространственно-временные структуры, которые возникают вдали от состояния равновесия в нелинейной области (среде) при критических (пороговых) значениях параметров системы.

### **7.5. Динамический и диссипативный хаос**

Как заявляют основоположники физики неравновесных процессов, например И. Пригожин, в хаосе можно выделить две разновидности: *динамический хаос* на микроскопическом уровне, *диссипативный хаос* на макроскопическом уровне.

Так, в основании молекулярной физики находится динамический хаос. Он предполагает нарушение симметрии во времени и определяет базу для развития макроскопических явлений.

Диссипативный хаос проявляет себя в макросистемах, относящихся к диссипативным структурам (рассеивающих энергию и производящих энтропию  $\sigma$ ). Такой хаос соответствует промежуточной ситуации в системе между «чистым случаем» и «избыточным порядком» (по определению И. Пригожина). Под избыточным порядком следует понимать сверхсложную упорядоченность в системе; при этом среда, в которой устанавливается такая упорядоченность, внешне выглядит как



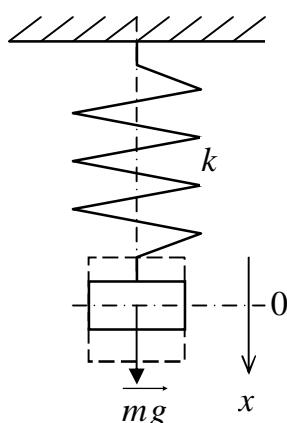
беспорядочное, случайное скопление элементов (частей), представляющее собой разнообразные структуры, сколь угодно сложные и законченные.

## 7.6. Фазовые траектории как способ описания эволюции динамических систем. Понятие аттрактора

Эволюцию динамических систем во времени удобно анализировать в *фазовом пространстве*.

Фазовое пространство – это абстрактное пространство с числом измерений, равным числу переменных, полностью характеризующих состояние (положение) рассматриваемой системы.

В качестве примера рассмотрим линейный гармонический осциллятор (рис. 7.4; груз массой  $m$  подвешен на пружине с жесткостью  $k$ ).



Он имеет одну степень свободы, а размерность его фазового пространства равна двум. Фазовое пространство в этом случае представляет собой плоскость, на которой эволюция осциллятора отражается через непрерывное задание его координаты  $x$  и скорости  $v_x$  (или импульса). Точка, изображающая состояние осциллятора на фазовой плоскости, будет двигаться по так называемой *фазовой траектории*.

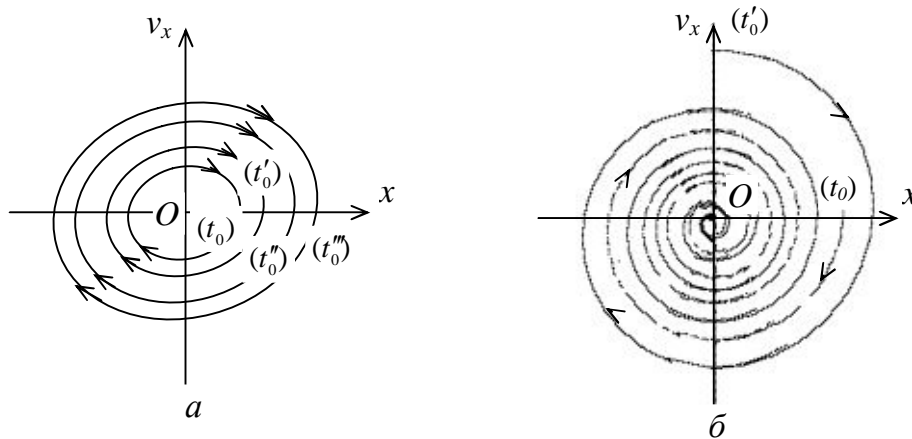
**Рис. 7.4.** Гармонический осциллятор

В случае идеального осциллятора (колебания которого не затухают) в зависимости от начальных условий (при  $t_0, t'_0, t''_0, t'''_0 = 0$ ) будем иметь на фазовой плоскости в качестве траекторий систему концентрических эллипсов (рис. 7.5, а) с общим уравнением

$$\frac{m v_x^2}{2} + \frac{k x^2}{2} = \text{const} .$$

В случае реального осциллятора (колебания затухают) при любых начальных условиях  $(t_0, t'_0)$  фазовая траектория представляет собой

некоторую закручивающуюся спираль, которая оканчивается в одной точке, отвечающей покою в положении равновесия (рис. 7.5, б). Эта точка  $O$ , или *аттрактор\**, как бы притягивает к себе с течением времени все фазовые траектории и является обобщением понятия «равновесие».



**Рис. 7.5.** Фазовые траектории идеального (а), реального (б) осцилляторов

Идеальный осциллятор (маятник) не имеет аттрактора и колеблется бесконечно.

Для изолированной макросистемы аттрактором является состояние термодинамического равновесия, к которому неизбежно эволюционирует система.

Теперь рассмотрим маятник в автоколебательном режиме. В более сложных движениях, например, маятника часов с грузом (гиря на цепочке) груз играет роль аккумулятора энергии, подкачиваемой определенными порциями к диссипирующему маятнику. Если запустить такие часы энергичным толчком самого маятника (рис. 7.6: момент запуска  $t_0$ ), то вскоре его ход замедлится до темпа, который обусловлен массой и моментом инерции маятника, после чего характер его движения останется неизменным. Если же толчок будет слабым (момент  $t''_0$ ), то маятник, замедляясь, вскоре остановится. Ситуации с сильным начальным толчком

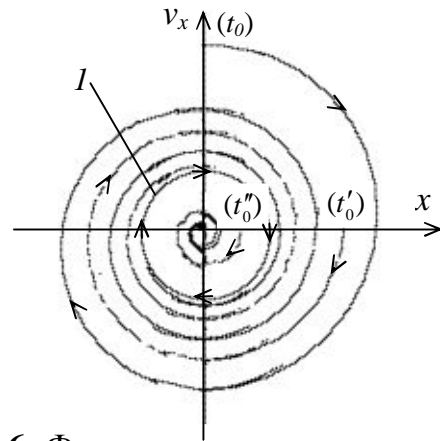
---

\* Аттрактор – конечное состояние в эволюции диссипативной системы.

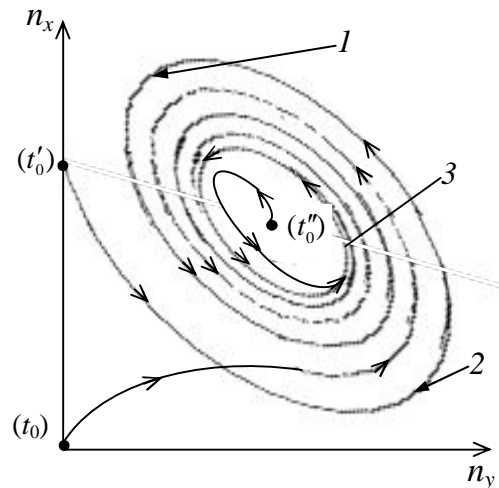
на фазовой плоскости будет соответствовать спираль, обвивающаяся все более плотно вокруг круговой орбиты, т. е. для данного маятника аттрактором является окружность.

В этом примере все фазовые траектории, соответствующие начальным условиям  $(t_0$  и  $t'_0)$ , выходят на одну периодическую траекторию – *предельный цикл*, который отвечает установившемуся движению.

Рассмотрим еще один пример – «химические часы». Так часто называют макросистему, относящуюся к неравновесным диссипативным структурам, которая в своем развитии движется не к устойчивому состоянию, а к устойчивому периодическому режиму. Эта структура представляет собой химически реактивный раствор, состоящий из двух компонентов, в котором развивается так называемая реакция Белоусова – Жаботинского, при которой реакционная среда (химический раствор) периодически изменяет цвет. При подходящих условиях жидкость становится с периодом  $\sim 1$  мин то красной, то синей (в зависимости от доминирования того или иного компонента).



**Рис. 7.6.** Фазовые траектории для автоколебательного режима маятника при разных начальных условиях  $(t_0, t'_0, t''_0)$ :  $I$  – предельный цикл.



**Рис. 7.7.** Фазовые траектории «химических часов» при разных начальных условиях  $(t_0, t'_0, t''_0)$ :  $1$  – «красный» раствор,  $2$  – «синий» раствор,  $3$  – предельный цикл.

В рассматриваемом случае аттрактором становится линия на соответствующей фазовой плоскости (рис. 7.7), координатными осями которой являются концентрации химических реагентов ( $n_x$ ,  $n_y$ ). Такой аттрактор описывает периодическое изменение концентраций веществ в системе и может рассматриваться как предельный цикл при любых начальных условиях ( $t_0$ ,  $t'_0$ ,  $t''_0$ ).

### 7.7. «Странные» аттракторы и фракталы

В случае хаотического движения динамической системы фазовые траектории с близкими начальными параметрами состояния быстро расходятся, а потом хаотически перемешиваются, так как могут удаляться только до некоторого предела ввиду ограниченности области изменений координат и скоростей (последнее определяется возможностями самой системы). В связи с этим фазовые траектории образуют складки внутри фазового пространства и оказываются на достаточно близком расстоянии друг от друга. Так возникает область фазового пространства, заполненная хаотическими траекториями, называемая *«странным» аттрактором*.

«Странный» аттрактор представляет собой сложную поверхность, ограничивающую некоторый объем в фазовом пространстве. Случайные воздействия на систему вызывают хаотическое движение и появление сложных, замысловатых траекторий, которые подвержены растяжениям и складываниям в фазовом пространстве. На рис. 7.8 представлен «странный» аттрактор, полученный Э. Лоренцем в 1963 г. в ходе численного моделирования на компьютере конвективных потоков в земной атмосфере.



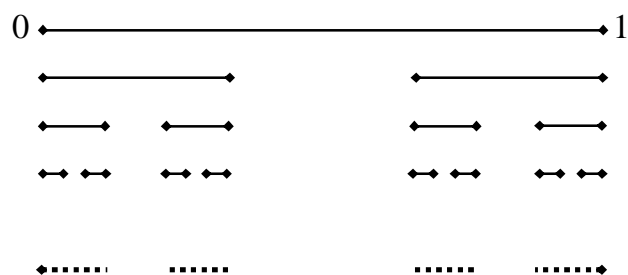
**Рис. 7.8.** «Странный» аттрактор

Важнейшим свойством «странных» аттракторов является их фрактальность. *Фракталы* – это объекты с дробной размерностью, проявляющие по мере своего развития все большее число мелких деталей. Термин «фрактал» был введен Б. Мандельбротом в 1977 г. в книге «Форма, случайность и размерность» (М.: Мир, 1977).

Структуры природных объектов (веществ) часто принимают сложные, разветвленные формы, напоминающие края разорванной ткани (например, структуры коллоидных растворов, фракций, образующихся при отложении металла в ходе электролиза, колоний биоклеток и др.).

Рассмотрим *канторовское множество* как классический фрактальный объект.

Некоторый единичный отрезок (0-1) разделим на три равные части и удалим его среднюю часть (рис. 7.9). Затем проделаем ту же операцию с



**Рис. 7.9.** Канторовское множество

оставшимися отрезками-частями. Представим, что нам удалось повторить этот алгоритм бесконечное число раз и получить бесконечное множество микроотрезков с пренебрежимо малыми длинами. Для образованного таким образом канторовского множества, несмотря на его неограниченный дискретный характер, можно установить размерность.

Очевидно, что после  $n$ -ой типовой операции полное число полученных отрезков будет  $N = 2^n$ , а длина каждого из них  $l = 1/3^n$ . Размерность  $d$  канторовского множества при  $N \rightarrow \infty$  и  $l \rightarrow 0$  определяется из общего уравнения  $N = (1/l)^d$ . В нашем случае уравнение принимает вид  $2^n = (3^n)^d$ , и, следовательно, имеем  $d = \log_3 2 \approx 0,64$ .

Таким образом, в общем случае канторовское множество имеет дробную размерность в диапазоне значений  $0 < d < 1$ .

С открытием фрактальных объектов мир форм, существующих в природе, стал трактоваться по-другому. Очень многие из природных объектов не обладают правильными геометрическими формами, но могут быть, подобно канторовскому множеству, описаны с помощью дробных размерностей. Так, облако не является ни объемным телом, ни поверхностью, его следует рассматривать как объект особой промежуточной формы с размерностью  $2 < d < 3$ .

В настоящее время фракталы часто используют для построения изображений чрезвычайно сложных структур.

Хаос порождает фракталы, а фазовые траектории фракталов обладают самоподобием, т. е. при выделении двух близких точек на фазовой траектории и последующем увеличении масштаба траектория между этими точками оказывается столь же хаотической, как и вся траектория. Это подтверждает, например, траектория броуновской частицы, которая также обладает фрактальными свойствами.

При разработке теории аттракторов с дробными размерностями выводы и рассуждения, сделанные для фракталов в пространстве форм,

были перенесены на пространство, в котором изучается поведение реальных объектов (макросистем) во времени. В частности «странный» аттрактор, обладая как и канторовское множество очень тонкой (мелкой) структурой, в значительной степени определяет сложную временную динамику самой системы.

Таким образом, если ранее (для маятников) существование аттрактора было синонимом устойчивости и воспроизводимости состояния (или периодического движения) при любых начальных условиях, то «странные» аттракторы породили такие режимы в поведении системы, которые невозможно однозначно ни предсказать, ни воспроизвести.

Начальные условия, очень близкие, но не совпадающие полностью, порождают разные варианты эволюции системы. Многовариантность в развитии последней также прогрессирует под действием малейших случайных возмущений (флуктуаций), которые не затухают, а усиливаются «странным» аттрактором. Иначе говоря, данный аттрактор определяет режимы функционирования системы, чувствительные к начальным условиям.

## **7.8. Бифуркации**

Важнейшей концепцией современного естествознания, разработанной Ч. Дарвином в середине XIX в. применительно к биосистемам, является известная всем триада «изменчивость – наследственность – естественный отбор». Эта триада лежит в основе эволюционной теории развития всех природных систем, и, как показывает обширная практика, в реализации дарвиновского принципа большую роль играют флуктуации. Причем вдали от состояния равновесия флуктуациям свойственен заметный рост, а это стимулирует образование новых пространственно-временных структур в системе.

Наибольшую значимость флуктуации приобретают вблизи точек неустойчивости системы, где любое малое неконтролируемое воздействие может привести к бифуркации, которая качественно перестраивает состояние или режим поведения системы.

*Бифуркацией* называется скачкообразное изменение состояния или режима функционирования макросистемы.

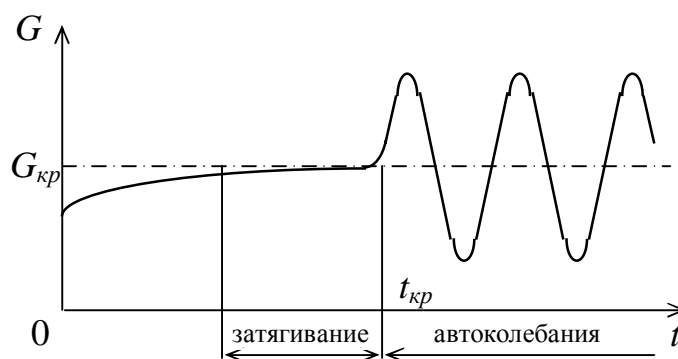
Неустойчивость и неравновесность определяют развитие системы. В критическом состоянии (на момент бифуркации) флуктуации достигают такой силы, что существующая к этому моменту организация разрушается. Разрешением кризиса является быстрый переход (скачок) диссипативной системы на новый более высокий уровень упорядоченности. Момент перехода определяется свойствами системы и уровнем флуктуаций в ней.

Параметры состояния (или функции состояния) системы, изменение которых приводит к качественной перестройке системы, называются *управляющими*.

Последовательность бифуркаций, возникающая при углублении неравновесности в системе, все время изменяется, и, следовательно, процесс может идти по разным сценариям. Исследования сценариев связаны с анализом свойств «странных» аттракторов, к которым притягиваются точки (состояния системы) в многомерном фазовом пространстве. Попав в область аттрактора, точка (выбранное наугад решение) будет «блуждать» там и только через большой промежуток времени приблизится к какой-нибудь точке аттрактора. При этом поведение системы, отвечающее такой точке, будет сильно зависеть от начальных условий.



При медленном изменении управляющего параметра возможно наблюдение затягивания потери устойчивости (рис. 7.10). После прохождения управляющего параметра  $G$  через бифуркационное значение  $G_{кр}$ , соответствующее мягкому возникновению автоколебаний, система



**Рис. 7.10.** Процесс управления динамической системой

остаётся в окрестности неустойчивого состояния некоторое время, за которое управляющий параметр приобретает конечное значение. Затем система скачком переходит в момент бифуркации  $t_{кр}$  в автоколебательный режим.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие аспекты современного естествознания связаны с понятием «стрела времени»?
2. Приведите классификацию динамических систем.
3. Что характерно для хаотических систем? Какой метод используется при описании хаотических систем?
4. На какие группы, согласно А. Пуанкаре, подразделяются все динамические системы?
5. Чем равновесное состояние макросистемы отличается от ее стационарного состояния?
6. Из чего складывается изменение энтропии в системе? В каком состоянии производство энтропии в системе компенсируется потоком

энтропии извне? Когда производство энтропии в системе вырождается (стремится к нулю)?

7. Термодиффузия в газовой смеси вызвана внешним дополнительным нагревом, а, следовательно, она сопровождается увеличением интенсивности теплового хаотического движения молекул. О каком порядке можно говорить при обеспечении стационарного состояния в такой системе?

8. Какие структуры принято называть диссипативными? Приведите примеры диссипативных структур.

9. В каких системах и при каких условиях возникает неустойчивость Бенара? Каковы ее внешние признаки?

10. Как можно охарактеризовать структуры Тьюринга, какими особенностями они обладают?

11. Какие разновидности по представлениям И. Пригожина можно выделить в хаосе?

12. С какой целью используются фазовое пространство и фазовые траектории?

13. Какие фазовые траектории и какой аттрактор имеет реальный осциллятор?

14. Охарактеризуйте систему, которую называют «химические часы». Какой у нее аттрактор?

15. В каких системах, под действием каких факторов возникают «странные» аттракторы?

16. Дайте определение фракталов. Приведите примеры фрактальных объектов. Каким свойством обладают «странные» аттракторы?

17. Что такое бифуркация? Когда возникают бифуркации и каковы их последствия для макросистем?

18. Какие параметры состояния называются управляющими? В каком случае наблюдается затягивание потери устойчивости в динамической системе?

## 8. ОРГАНИЗАЦИЯ И САМООРГАНИЗАЦИЯ В ПРИРОДЕ. СИНЕРГЕТИКА И ЭВОЛЮЦИЯ

### 8.1. Неравновесные состояния материи.

#### Длина корреляции

Развитие открытых макросистем часто идет путем образования прогрессирующей упорядоченности. Заметное место в положениях эволюционной теории занимает *концепция самоорганизации в хаосе*, содержание которой заключается в возникновении упорядоченных структур вдали от состояния равновесия и в условиях возможного спонтанного нарушения симметрии. Кроме того, важным фактором является сложность и иерархическая соподчиненность самих природных систем, обладающих свойствами стохастических и фрактальных структур.

Наложение неравновесных связей и ограничений на материальные системы приводит к возникновению в них новых состояний, свойства которых сильно отличаются от свойств равновесных состояний. Это отличие наиболее заметно при рассмотрении *корреляции*. При этом следует различать понятия «корреляция» и «взаимодействие». Если взаимодействие определяет тип макросистемы (через те или иные типы взаимодействий классифицируется сама система) без указания на конкретный характер ее реального поведения, то корреляция как раз описывает это поведение с молекулярно-кинетических позиций.

К примеру, до наступления неустойчивости Бенара и после ее достижения взаимодействие между молекулами одно и то же (случайные столкновения в ходе теплового движения), но корреляции резко различаются.

Посредством длины и амплитуды корреляции познают, каким образом некоторое локальное событие, происходящее в одной части системы, влияет на другие ее части. В результате можно установить

взаимосвязь между наблюдаемым порядком в системе и согласованным движением целой популяции молекул.

Равновесные состояния у таких систем, как кристаллы или газы, характеризуются длиной корреляции  $\bar{l} \approx 10^{-10}$  м. При этом отдельные части систем (фононы – в твердом теле, молекулы – в газе) некогерентны на макроуровне.

Длина корреляции, описывающей сильно неравновесные ситуации, составляет  $\bar{l} \approx 10^{-2}$  м.

Такие существенные изменения в возможных значениях  $\bar{l}$  отражают глубокое различие между равновесными и неравновесными состояниями у систем.

В конце 1980-х годов некоторыми зарубежными учеными было проведено численное моделирование (на компьютере) зарождения дальнедействующих корреляций на примере появления и существования вихрей Бенара. При малых градиентах температур между нижней, подогреваемой, и верхней, свободной, поверхностями жидкости наблюдалось возникновение малых неустойчивых вихрей, которые вскоре после появления исчезали под действием случайных столкновений молекул. Когда же моделировались относительно большие градиенты температур, большие критических значений для данной жидкости, возникшие вихри не исчезали, а, наоборот, увеличивались и развивались за счет вовлечения в свое когерентное движение все большего числа молекул, и в стационарном состоянии вся жидкость оказывалась вовлеченной в вихревое движение. Число действующих вихрей напрямую зависело от отношения толщины слоя жидкости к его ширине, а это указывало на то, что поведение молекул чувствительно к пространственным граничным условиям, накладываемым на всю систему.

Таким образом, моделирование неустойчивости Бенара выявило конкуренцию между тепловым (некогерентным) движением молекул в

жидкости и конвективным (когерентным, вихревым) движением популяций (колоний) тех же молекул при наложении на систему постоянной неравновесной тепловой связи с определенными температурными характеристиками.

Прибор, способный фиксировать мгновенные состояния системы Бенара, всегда регистрировал бы ситуации в ней, соответствующие неупорядоченному равновесному состоянию, т. е. такие снимки отражали бы одинаково запутанные движения молекул, «летающих» во всех направлениях. Таким образом, когерентность ячеек Бенара подразумевает вполне определенный масштаб пространства и времени.

На примерах ячеек Бенара и структур Тьюринга прослеживается общая тенденция: сильно неравновесные процессы могут являться причиной когерентности, иначе говоря, могут определять условие многообразия в структурированном коллективном поведении частиц системы. Если в состоянии равновесия (или вблизи него) динамика системы (спустя большой промежуток времени) полностью определяется краевыми условиями, то вдали от него процессы в системе развиваются непредсказуемо. Оказывается, что одним и тем же граничным условиям могут соответствовать самые разные диссипативные структуры, и для описания неравновесных систем одних граничных условий становится недостаточно – необходимо рассматривать реальные, конкретные процессы, подводящие систему к самостоятельному выбору одной из возможных структур. В связи с чем таким системам приписывают определенную автономию (или самоорганизацию).

## **8.2. Понятие самоорганизации.**

### **Управляемые и неуправляемые системы**

Многолетние исследования свидетельствуют о том, что существует общая тенденция развития природных систем от простых структур к более

сложным. В основе этого лежит один из важнейших процессов развития – самоорганизация материи.

*Самоорганизация* – это спонтанный переход открытой неравновесной макросистемы от простых и неупорядоченных форм организации к более сложным и упорядоченным.

Необходимым условием самоорганизации является существование у макросистемы неравновесных связей с внешней средой. Одновременно процесс самоорганизации предполагает изменение роли и смысла этих связей, накладываемых на систему.

Так, например, если поток теплоты определяет некоторое стационарное состояние и соответственно обуславливает диссипативную активность системы, то он является необходимой внешней связью, без которой система обязательно перешла бы в состояние равновесия. Кроме того, согласно теореме Пригожина стационарному состоянию системы, которое также определяется аналогичной связью, отвечает минимальное производство энтропии.

Когда же посредством наложенной тепловой связи преодолен порог неустойчивости, присущий данной системе, ситуация изменяется. Рассмотренные ранее вихри Бенара производят больше энтропии, чем это следует из теоремы Пригожина. Теплота быстрее передается от нижних слоев жидкости к верхним, и для поддержания постоянного градиента температур требуется увеличивать поток теплоты извне. В этом случае неравновесная связь уже полностью не обосновывает производство энтропии, она в большей степени определяет условие появления порядка в сильно неравновесной системе.

В состояниях далеких от равновесия становятся важными такие понятия, как «чувствительность к начальным условиям», «неустойчивость» и «бифуркация».

Так, гравитацией при описании поведения тонкого слоя жидкости, находящегося в состоянии равновесия, можно пренебречь, но вдали от состояния равновесия учет гравитации необходим. Получается, что удаленность от положения равновесия определяет выбор модели для описания отношения системы с окружающей средой.

Поскольку состояние равновесия устойчиво относительно флуктуаций, то равновесную систему можно описывать через средние значения параметров. Дополнительно второе начало термодинамики предполагает, что вблизи состояния равновесия флуктуации затухнут и в конце концов исчезнут.

В связи с тем что в экспериментах средние значения потоков энергии (или вещества) относительно просто контролируются (измеряются) на границах равновесных систем (и систем, близких к равновесным), то такие *системы* принято рассматривать как *управляемые*, или контролируемые.

Наоборот, сильно неравновесными системами, в которых неконтролируемые флуктуации (флуктуации, вызванные, например, случайными столкновениями молекул) могут усиливаться, доминировать и определять их дальнейшее поведение, уже невозможно управлять по своему усмотрению. Такие системы рассматривают как *неуправляемые системы*.

### **8.3. Принципы организации и самоорганизации в живой и неживой природе**

Существование неустойчивости предполагает, что прогрессирующие флуктуации с некоторого момента времени могут перестать быть просто шумом (фоном) для макросистемы и превратиться в фактор, направляющий ее эволюцию.

Согласно основным положениям теории самоорганизации, разработанной И. Пригожиным\*, в критических состояниях (в точках бифуркации) система становится очень неустойчивой, непредсказуемой и может самостоятельно эволюционировать к нескольким вариантам, соответствующим разным устойчивым модам. Причем никакое дополнительное знание не позволяет однозначно предсказать, какую именно моду (режим поведения или структуру) выберет система. Здесь приходится довольствоваться только определением вероятности перехода системы к конкретной структуре.

В связи с этим и в соответствии с общими задачами курса КСЕ ограничимся лишь формулировкой общих условий и *принципов самоорганизации* природных макросистем (содержание этих принципов также относится к теоретической разработке И. Пригожина и его коллег):

- процесс самоорганизации возможен только при достаточно большом количестве взаимодействующих элементов (частиц) системы;
- система должна быть открытой и, следовательно, допускать активный обмен энергией и веществом с окружающей средой;
- предполагается, что система находится в неравновесном состоянии (или достаточно удалена от положения равновесия);
- процесс самоорганизации связан с нарушением симметрии;
- самоорганизация предполагает наличие положительной обратной связи в системе;
- существование и развитие флуктуаций в системе – важнейший фактор ее самоорганизации.

---

\* Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986.



#### 8.4. Синергетика: область исследований, задачи

Термин «синергетика» происходит от греческого слова «συνεργετιχός», что означает совместный, согласованно действующий. Синергетика как наука возникла в начале 1970-х годов. Одним из ее основателей является немецкий физик и математик Г. Хакен\*, он и ввел в обращение термин «синергетика». Хакен писал: «Я назвал новую дисциплину «синергетикой»... не только потому, что в ней исследуется совместное действие многих элементов систем, но и потому, что для нахождения общих принципов, управляющих самоорганизацией, необходимо кооперирование многих различных дисциплин».

Определим область исследований новой науки.

Синергетика исследует сложные неравновесные системы разной природы (физической, химической, биологической, экологической и др.) с целью выявления и изучения внутри них общих закономерностей в процессах образования, существования и разрушения упорядоченных временных и пространственных структур.

Возникновение организованного поведения системы может обуславливаться:

- внешними воздействиями, которые определяют так называемую *вынужденную организацию*;
- развитием собственных внутренних неустойчивостей в системе, определяющих так называемую самоорганизацию (в этом случае процесс упорядочения связан с коллективным поведением подсистем, образующих саму систему).

Примером самоорганизации в гидродинамике служит образование в подогреваемом слое жидкости ячеек Бенара, а примером вынужденной

---

\* Хакен Г. Синергетика: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.

организации является синхронизация мод в многомодовом лазере с помощью внешнего периодического воздействия.

Наряду с самоорганизацией синергетика рассматривает также и *самодезорганизацию*, т. е. процессы возникновения хаоса (как сложного поведения системы) в динамических системах.

Объектами исследования синергетики, как правило, являются открытые диссипативные системы.

В одном интервью\* сам Г. Хакен определил основное содержание новой развивающейся науки – синергетики – в форме ряда положений (они практически дословно изложены ниже), а именно:

- исследуемые системы состоят из нескольких или многих одинаковых или разнородных частей, которые находятся во взаимодействии друг с другом;

- эти системы являются нелинейными;

- при рассмотрении физических, химических и биологических систем речь идет об открытых системах, далеких от теплового равновесия;

- эти системы подвержены внутренним и внешним колебаниям;

- системы могут стать нестабильными, в них происходят качественные изменения;

- в этих системах обнаруживаются новые качества, возникают пространственные, временные, пространственно-временные или функциональные структуры;

- структуры могут быть упорядоченными или хаотичными;

- во многих случаях возможна математическая формализация процессов в системах.

Прокомментируем эти положения.

---

\* Синергетике – 30 лет. Интервью с профессором Г. Хакеном // Вопросы философии. 2000. № 3. С. 53 – 61.

Г. Хакен выделяет в поведении рассматриваемых систем активное взаимодействие их составных частей и указывает причины, которые приводят к образованию новых структур в системах. По его мнению, основополагающим системным фактором является именно взаимодействие, динамика частей системы, а не хаотичность в чистом виде. В то же время динамика присуща самому хаосу. Поэтому допускается вариант: из хаоса в определенных условиях рождается тот или иной порядок.

Важнейшей концепцией синергетики является нелинейность рассматриваемых систем. Модели синергетики – это модели нелинейных неравновесных систем, подвергающихся воздействию флуктуаций. В связи с этим записываются и изучаются нелинейные математические уравнения, т. е. уравнения, содержащие неизвестные величины в степенях, отличных от единицы, а также коэффициенты при этих величинах, зависящие от свойств среды.

**П р и м е ч а н и е.** Если линейность подчеркивает поступательность, безальтернативность, постоянство, что характерно для закрытой системы, то нелинейность отражает непостоянство, многообразие, неустойчивость, удаленность от положения равновесия, случайные события, колебания, бифуркации, присущие открытой системе.

В самоорганизующихся макросистемах развиваются колебания, в процессе которых системы трансформируются в относительно устойчивые структуры. Использование нелинейных уравнений как раз и оправдано для описания колебательных процессов.

Когда значения параметров системы максимально приближаются к критическим значениям, сама система оказывается в состоянии неравновесности и неустойчивости. В силу этого в дальнейшем в ней происходят качественные изменения и возникают новые структуры. В момент перехода упорядоченная и неупорядоченная фазы системы различаются столь незначительно, что именно флуктуации преобразуют

одну фазу в другую. Так в ходе предварительного анализа причин перестройки в системе часто ведется поиск мощных глобальных факторов, но затем выясняется, что существенные изменения на самом деле произошли под воздействием малых возмущений, которые просто привели систему к резонансу.

Основной объект исследования синергетики – это открытые макросистемы, удаленные от равновесия. Открытость системы предполагает наличие в ней источников и стоков вещества, энергии или информации. Для образования той или иной структуры в системе необходим соответствующий динамический источник. Например, без соответствующего обмена веществ организмы вымирают, без подвода теплоты невозможно организовать вихревое движение в слое жидкости, любая социальная система угасает, будучи лишенной информационного обеспечения. Также следует помнить, что наступление равновесия в системе обрывает процессы ее самоорганизации.

Согласно Г. Хакену образующиеся структуры могут быть более или менее упорядоченными. Даже сам хаос в определенной степени есть форма упорядоченности (в смысле микро- и макромасштабов рассмотрения системы).

Синергетика использует достаточно обширный математический аппарат. В ходе математического моделирования и соответствующих вычислительных экспериментов было установлено, что в ряде случаев при описании поведения сложных систем можно ограничиться уравнениями, содержащими всего несколько переменных. Неопределенность, заключенная в хаотическом состоянии, при этом может быть описана с помощью понятий «информация» и «энтропия».

При анализе самоорганизующихся систем в рассуждениях Г. Хакена прослеживается следующая логическая «цепочка». Те или иные случайные возмущения отодвигают рассматриваемую систему от положения

равновесия, переводя ее в неустойчивое состояние, из которого возможен запуск процесса образования новых структур в системе. Вероятность перехода в новое упорядоченное состояние зависит от надежности внешней, наложенной на систему, связи с необходимыми критическими характеристиками.

В результате бифуркационного «скачка» система спонтанно (в условиях прогрессирующих флуктуаций) переходит к одной из возможных структур. Дальнейшее функционирование новой структуры зависит от согласованного движения большого числа частиц (элементов) системы и может быть описано достаточно детерминированными\* уравнениями.

Таким образом, понятия и образы синергетики связаны в первую очередь с оценкой упорядоченности поведения системы, которую можно определить через пространственную корреляцию отдельных подсистем, взаимную координацию (с учетом синхронизации) подсистем, энтропию (как меру неупорядоченности).

### **8.5. Методы и модели синергетики**

Методы синергетики в значительной степени аналогичны методам теории колебаний и волн, термодинамики неравновесных процессов, теории фазовых переходов, статистической механики. Для многих задач синергетики построение теории поведения рассматриваемой системы сводится к созданию и анализу вероятностной модели, поэтому синергетика заимствует методы математической теории стохастических процессов.

Так, Хакен, используя математический аппарат при описании того или иного эффекта (например, лазерной генерации как явления фазового

---

\* Детерминизм – это признание объективной закономерности и причинной обусловленности явлений природы (социальных процессов), выражаемых в научных законах.

перехода из инверсного состояния в основное с испусканием излучения), записывает связь эффекта с его причиной в виде функции времени и исключает внешнее воздействие на систему, заменяя внешние силы внутренними. Внутренние воздействия, вообще говоря, имеют флуктуирующий характер, а поэтому возможный механизм развития внутренних флуктуаций он описывает путем введения в соответствующие уравнения стохастической компоненты.

### **8.6. Эволюционно-синергетическая парадигма естествознания**

Под *парадигмой* (от *греч. παραδειγμα* – пример, образец) понимают исходную концептуальную схему методов исследования, модель постановки проблем и их решения.

Подводя итог рассуждениям о синергетике, можно сделать ряд выводов, в значительной степени также определяющих содержание парадигмы современного естествознания.

1. Синергетика выявляет тенденцию развития природы – создание более сложных систем из простых – и определяет *принципы эволюции материальных систем*:

- процессы эволюции и деградации, синтеза и распада материальных структур равноправны;
- в эволюции открытых систем предполагается их удаление от положения равновесия и прохождение через неустойчивые состояния;
- эволюция большинства сложных систем носит нелинейный характер, т. е. для таких систем после достижения бифуркации существует не менее двух вариантов развития;
- возникновение структур нарастающей сложности не случайность, а закономерность, случайность изначально включена в сам механизм эволюции;

- процессы создания упорядоченности имеют единый алгоритм, независимый от природы и специфики систем.

2. При объяснении образования макросистем синергетика использует фундаментальное положение теории относительности о взаимопревращении вещества (массы) и энергии.

3. Синергетика отражает неизбежный процесс творчества природы. Она исследует механизм возникновения новых структур и форм, а не поддержание старых. При этом используется принцип положительной обратной связи, заключающийся в том, что возникшие в системе изменения (флуктуации) не подавляются, а накапливаются, увеличиваются и приводят к разрушению старой структуры и появлению новой.

4. Ведущие положения синергетики носят междисциплинарный характер, а поэтому могут служить основой при построении парадигмы универсального эволюционизма. Так, развивая идеи В. И. Вернадского о *ноосфере* (об осознанно изменяемой человеком биосфере), академик Н. Н. Моисеев\* говорил, что человечество как в физическом, так и в биологическом, и в социальном смысле «держится на острие». Это объясняется тем, что наблюдаемое ускорение процессов развития человечества ведет к снижению его стабильности (появлению состояний неустойчивости и возникновению новых аттракторов). Поэтому перед человечеством, как ведущим звеном ноосферы, возникает сложнейшая задача *коэволюции* всех природных и социальных систем, т. е. их совместного, согласованного развития в рамках всей планеты. По мнению Н. Н. Моисеева, «все наблюдаемое нами, все, в чем сегодня мы участвуем,— это лишь фрагменты единого синергетического процесса».

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чем заключается концепция самоорганизации в хаосе?

---

\* *Моисеев Н.Н.* Универсальный эволюционизм. (Позиция и следствия) // Вопросы философии. 1991. № 3. С. 3 – 28.

2. Дайте определение понятия «корреляция». Чем отличается корреляция от взаимодействия?
3. Приведите примеры неравновесных структур, обладающих большой длиной корреляции. При каких условиях образуются эти структуры, какими свойствами обладают?
4. Дайте определение процесса самоорганизации материальных систем. Как осуществляется переход от неупорядоченных структур к упорядоченным, от чего зависит этот переход?
5. Какие системы можно считать управляемыми, а какие – неуправляемыми?
6. Перечислите основные условия и принципы самоорганизации природных систем.
7. Определите область исследований синергетики. Какой тип организации определяет развитие внутренних неустойчивостей в системе? Приведите пример вынужденной организации.
8. Что такое самодезорганизация, в каких системах она возможна?
9. В чем заключается, по мнению Г. Хакена, основополагающий фактор, определяющий порядок в системе? Назовите ключевые положения синергетики.
10. Какие методы исследования применяются в синергетике?
11. Дайте определение понятия «парадигма». Какова основная тенденция развития природы? Назовите основные принципы эволюции природных систем.
12. Почему идеи синергетики носят междисциплинарный характер?
13. Назовите основные положения, определяющие парадигму современного естествознания. В чем состоит задача коэволюции?



### Темы рефератов

1. Современные основания целостности естествознания.
2. Основные идеи и модели описания природы.
3. Фундаментальные методы и законы в построении естественнонаучной картины мира.
4. Атомизм и непрерывность в современном естествознании.
5. Методы научного познания природы.
6. Структурные уровни организации материи.
7. Время по Ньютону и время по Эйнштейну. Проблема времени в современной науке.
8. Концепция единого пространства-времени.
9. Симметрия и асимметрия в живой и неживой природе.
10. Современные представления о симметрии.
11. Масса как единая характеристика инертности и гравитации.
12. Теория суперобъединения. Попытки создания единой теории поля.
13. Стандартная модель в современной физике элементарных частиц.
14. Элементарные частицы в познании микро-, макро-, мегамира.
15. Концепция измерения в классическом естествознании. Квантовая теория измерений.
16. Проблемы измерения в квантовой механике.
17. Особенности описания природы в рамках классического естествознания.
18. Особенности описания природы в рамках «неклассического» естествознания.

19. Вероятностные методы и теории прогнозирования.
20. Флуктуации и их роль в описании природы.
21. Теории хаоса и порядка.
22. Роль энтропии в физике, химии, биологии и самоорганизации материи.
23. Энтропия и информация. Проблемы информатики.
24. Информационный подход к описанию сложных природных систем.
25. Синергетические модели в описании неравновесных систем.
26. Достижения современной химии.
27. Возможности управления превращением химических элементов, молекул и роль биохимии в этих процессах.
28. Эволюция в биологии и роль генной инженерии.
29. Эволюция на космологическом уровне: стрела времени.
30. Естествознание и экология.
31. От биосферы к ноосфере. Экологические проблемы.
32. Современные модели развития мира.
33. Идеи универсального эволюционизма и проблемы коэволюции.
34. Естествознание как феномен мировой культуры.

### **Список литературы для рефератов**

- Аксенов Г.П.* Причина времени. М.: Эдиториал УРСС, 2001.
- Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А.* Нестационарные структуры и диффузионный хаос. М.: Наука, 1992.
- Березинский В.С.* Объединенные калибровочные теории и нестабильный протон // Природа. 1984. № 11.
- Берже П., Помо И., Видаль К.* Порядок в хаосе: Пер. с англ. М.: Мир, 1991.

*Болотовский Б.М.* Излучение быстрых частиц в преломляющей среде // *Природа*. 1984. № 10.

*Бор Н.* Избранные труды: В 2 т. Т. 2. М.: Наука, 1971.

*Вайнберг С.* Идеиные основы единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий // *Успехи физ. наук*. 1980. Т. 132.

*Вейль Г.* Симметрия. М.: Наука, 1975.

*Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1965.

*Вернадский В.И.* Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1988.

*Вилли К., Детье В.* Биология: (Биологические процессы и законы): Пер. с англ. М.: Мир, 1975.

*Вишневский И.Л., Лашер А.Н., Салли И.В.* Энтропия в природе и обществе. М., 1994.

*Воробьев А.В., Быков А.С., Пашков Е.П., Рыбаков А.М.* Микробиология: Учебник. М.: Медицина, 1998.

*Гейзенберг В.* Физика и философия. Часть и целое. М.: Наука, 1989.

*Гельфер Я.М.* Законы сохранения. М.: Наука, 1967.

*Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций: Пер. с англ. М.: Мир, 1973.

*Глэшоу Ш.* Кварки с цветом и ароматом // *Успехи физ. наук*. 1976. Т.119.

*Гут А., Стейнхардт П.* Раздувающаяся Вселенная // *В мире науки*. 1984. № 7.

*Даннеман Ф.* История естествознания: В 2 т. Т. 1-2. М.: ОНТИ, НКТП, 1985.

*Де Витт Б.* Квантовая гравитация // *В мире науки*. 1984. № 2.

*Дмитриев А.С., Старков С.О.* Передача сообщения с использованием хаоса и классическая теория информации // *Успехи современной радиоэлектроники*. 1998. № 11.

*Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В.* Космология ранней Вселенной. М.: Моск. университет, 1988.

*Дремин И.М.* О глюонных струях // Успехи физ. наук. 1980. Т. 131.

*Дэвис П.* Случайная Вселенная: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

*Зельдович Я.Б.* Возможно ли образование Вселенной «из ничего»? // Природа. 1988. № 4.

*Инфельд Л., Эйнштейн А.* Эволюция физики. М.: Наука, 1965.

*Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997.

*Кейн Г.* Современная физика элементарных частиц: Пер. с англ. М.: Мир, 1990.

*Клепиков Н.П.* Силы торможения излучением и излучение заряженных частиц // Успехи физ. наук. 1985. Т. 146.

*Клечек Й., Янеш П.* Вселенная и Земля. Прага: Артия, 1986.

*Климашкин И.А.* Астрономия наших дней. М.: Наука, 1976.

*Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: Наука, 1994.

*Коган Г.С.* Нейтрино во Вселенной // Природа. 1982. № 10.

*Компанеев А.С.* Симметрия в микро- и макромире. М.: Наука, 1978.

*Копысов Ю.С.* Нейтринная спектроскопия солнечных недр // Природа. 1983. № 8.

*Кузнецов В.И.* Общая химия. Тенденции развития. М.: Высш. шк., 1989.

*Кутепов А.М., Полянин А.Д., Запryanов З.Д.* и др. Химическая гидродинамика: Справ. пособие. М.: Квантум, 1996.

*Лейзер Д.* Создавая картину Вселенной: Пер. с англ. М.: Мир, 1988.

*Мандельброт Б.* Форма, случайность и размерность: Пер. с англ. М.: Мир, 1977.

*Моисеев Н.Н.* Человек и ноосфера. М.: Прогресс, 1990.

*Мусил Я., Новакова О., Кунц К.* Современная биохимия в схемах: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.

*Небел Б.* Наука об окружающей среде. Как устроен мир: Пер. с англ. М.: Мир, 1993.

*Николис Дж.* Динамика иерархических структур: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.

*Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.

*Одум Ю.* Основы экологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1975.

*Окунь Л.Б.* Открытие промежуточных бозонов // Успехи физ. наук. 1983. Т. 141.

*Окунь Л.Б.* Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1984.

*Планк М.* Единство физической картины мира: Пер. с англ. М.: Мир, 1966.

*Пригожин И., Рерих Н.* В поисках нового миропонимания: Пер. с англ. М.: Знание, 1991.

*Пригожин И., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. К решению парадокса времени: Пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС, 2001.

*Рейсби К.* Решеточная теория удержания кварков // В мире науки. 1983. № 4.

*Реймерс Н.Ф.* Популярный биологический словарь. М.: Наука, 1991.

*Рудой Ю.Г., Суханов А.Д.* Информационный подход к описанию сложных природных объектов // Вестник РУДН, сер. ФЕНО. 1997. № 3.

*Рюэль Д.* Случайность и хаос: Пер. с франц. Ижевск: НИЦ «РХД», 2001.

*Сажин М.В.* Современная космология в популярном изложении. М.: Эдиториал УРСС, 2002.

*Сингер М., Берг П.* Гены и геномы: В 2 т. Т. 1-2: Пер. с англ. М.: Мир, 1998.

*Струнников В.А.* Клонирование животных: теория и практика // Природа. 1998. № 7.

*Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

*Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике: Пер. с англ. М.: Мир, 1977.

*Фридман Д.З., ван Ньювенхойзен П.* Скрытые измерения пространства–времени // В мире науки. 1985. № 5.

*Хакен Г.* Синергетика: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.

*Хокинг С.* Край Вселенной // Природа. 1985. № 4.

*Хокинг С.* От Большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.

*Хокинг С., Израэль В.* Общая теория относительности. Вводный обзор // Успехи физ. наук. 1981. Т. 133.

*Черепашук А.М., Чернин А.Д.* Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: «Век 2», 2004.

*Шафрановский И.И.* Симметрия в природе. Л.: Недра, 1985.

*Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетики: Пер. с англ. М.: Мир, 1963.

*Энциклопедия по информатике* / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Просвещение, 1994.

*Яблоков А.В., Юсуфов А.Г.* Эволюционное учение. М.: Высш. шк., 1989.

*Яншина Ф.Т.* Эволюция взглядов В.И. Вернадского на биосферу и развитие учения о ноосфере. М.: Наука, 1996.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

*Блохинцев Д.И.* Пространство и время в микромире. М.: Наука, 1970.

*Глаголев К.В., Морозов А.Н.* Физическая термодинамика: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

*Жигалов Ю.И.* Концепции современного естествознания: Учеб.-метод. пособие для вузов. М.: Гелиос АРВ, 2002.

*Канке В.А.* Концепции современного естествознания. М.: Логос, 2001.

*Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Квантовая физика: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.

*Мэрион Дж.* Физика и физический мир: Пер. с англ. М.: Мир, 1975.

*Новиков И.Д.* Эволюция Вселенной. М.: Наука, 1991.

*Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: Пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС, 2000.

*Суханов А.Д., Голубева О.Н.* Концепции современного естествознания: Учебник для вузов. М.: Агар, 2000.

*Фейнберг Е. Л.* Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке.- М.: Наука, 1992.

*Шредингер Э.* Что такое жизнь с точки зрения физики. М.: Наука, 1972.

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Андерсон Карл Дейвид (1905–1991) 33  
Аристотель (384–322 до н. э.) 19  
Архимед (287–212 до н. э.) 20
- Беккерель Антуан Анри (1852–1908) 22**  
Белоусов Борис Павлович (1893–1970) 139  
Бенар Анри (1874–1939) 134, 147, 149  
Био Жан Батист (1774–1862) 83  
Больцман Людвиг (1844–1906) 83, 111  
Бор Нильс Хендрик (1885–1962) 22, 25, 73, 74, 97, 98  
Браге Тихо (1546–1601) 21  
Брахмагупта (Брамагупта) (598–660) 20  
Бруно Джордано (1548–1600) 21
- Вайнберг Стивен (р. 1933) 66, 68**  
Вернадский Владимир Иванович (1863–1945) 159  
Вильсон Роберт Вудроу (р. 1936) 46  
Винер Норберт (1894–1964) 23
- Галилей Галилео (1564–1642) 21, 23, 71, 95**  
Гамильтон Уильям Роуан (1805–1865) 51, 40, 86  
Гамов Георгий Антонович (1904–1968) 46  
Гейзенберг Вернер Карл (1901–1976) 23, 25, 72, 96  
Гелл-Манн Мюррей (р. 1929) 36  
Гельмгольц Герман Людвиг (1821–1894) 22, 66, 86  
Гераклит Эфесский (535–475 до н. э.) 15  
Герц Генрих Рудольф (1857–1894) 22  
Гиббс Джозайя Уиллард (1839–1903) 84, 85, 86, 88, 96, 112, 113, 115, 128  
Глэшоу Шелдон Ли (р. 1932) 66  
Грин Майкл (р. 1946) 70  
Гук Роберт (1635–1703) 83
- Дарвин Чарлз Роберт (1809–1882) 22, 143**  
Демокрит (460–360 до н. э.) 19  
Джоуль Джеймс Прескотт (1818–1889) 66, 86, 107  
Дирак Поль Адриен (1902–1984) 25, 24, 25, 31, 42, 46, 74
- Евклид (около 300 до н. э.) 19**
- Жаботинский Анатолий Маркович (1938–2008) 139**
- Ибн-Сина (Авиценна) (980–1037) 20**
- Кант Иммануил (1724–1804) 21**



Карно Никола́ Леонард Сади (1796–1832) 81, 107  
Кеплер Иоганн (1546–1601) 21, 23  
Клаузиус Рудольф Юлиус (1822–1888) 81, 83, 108, 129  
Коперник Николай (1473–1543) 21, 23  
Корана Хар Гобинд (р. 1922) 23  
Крик Френсис Харри (1916–2004) 23  
Кулон Шарль Огюстен (1736–1806) 83  
Кювье Жорж (1769–1832) 22, 77, 102

Лавуазье (де Лавуазье) Антуан Лоран (1743–1794) 85  
Лагранж Жозеф Луи (1736–1813) 51, 40  
Лайель Чарлз (1797–1875) 22  
Левкипп (около 513 до н. э.) 19  
Лейбниц Готфрид Вильгельм (1646–1716) 86  
Ленц Эмилий Христианович (1804–1865) 66  
Ломоносов Михаил Васильевич (1711–1765) 86  
Лоренц Хендрик Антон (1853–1928) 24, 64, 71, 95  
Лоренц Эдвард Нортон (1917–2008) 140  
Людерс Герхарт (р. 1920) 80

Майер Юлиус Роберт (1814–1878) 22, 66, 86, 107  
Максвелл Джеймс Клерк (1831–1879) 22, 24, 47, 71  
Мандельброт Бенуа (р. 1924) 141  
Моисеев Никита Николаевич (1917–2000) 119, 120, 159

Навьё Анри (1785–1836) 120  
Нётер Эмми (1882–1935) 89, 100, 76  
Ниренберг Маршалл Уоррен (р. 1927) 23  
Ньютон Исаак (1642–1727) 21, 23, 33, 43, 51, 71, 75

Овчинников Николай Федорович (р. 1915) 88  
Онсагер Ларс (1903–1976) 123

Паули Вольфганг (1900–1958) 80, 98  
Пензиас Арно Алан (р. 1933) 46  
Пифагор Самосский (576–496 до н. э.) 19  
Планк Макс Карл (1858–1947) 22, 25, 55, 70  
Пригожин Илья Романович (1917–2003) 123, 127, 136, 150, 152  
Птолемей (90–168) 20  
Пуанкаре Анри Жюль (1854–1912) 13, 129

Резерфорд Эрнест (1871–1937) 22

Савар Феликс (1791–1841) 83  
Салам Абдус (1926–1996) 66  
Смолуховский Мариан (1872–1917) 117  
Сорокин Питирим Александрович (1889–1968) 9

Стокс Джордж Габриель (1819–1903) 120  
Томсон Джозеф Джон (1856–1940) 22  
Томсон (лорд Кельвин) Уильям (1824–1907) 81, 108  
Тьюринг Алан Матисон (1912–1954) 135, 149  
Улугбек Мухаммед Тарагай (1394–1449) 20  
Уотсон Джеймс Дьюи (р. 1928) 23  
Фалес Милетский (625–547 до н. э.) 19  
Фарадей Майкл (1791–1867) 22, 24, 83  
Фейнман Ричард Филлипс (1918–1988) 55  
Ферми Энрико (1901–1954) 63, 74  
Фридман Александр Александрович (1888–1925) 23, 44  
Хаббл Эдвин Пауэлл (1889–1953) 45  
Хакен Герман (р. 1927) 153, 154, 157  
Хиггс Питер (р. 1929) 67  
Хорезми (аль-Хорезми) Мухаммед Бен Мусса (784–850) 20  
Чедвик Джеймс (1891–1974) 23  
Шванн Теодор (1810–1882) 22  
Шварц Джон (р. 1941) 70  
Шлейден Маттиас Якоб (1804–1881) 22  
Шрёдингер Эрвин (1887–1961) 23, 25, 52  
Эддингтон Артур Стэнли (1882–1944) 127  
Эйнштейн Альберт (1879–1955) 21, 22, 23, 24, 43, 54, 69, 71, 87, 95, 117, 128  
Эпикур (341–270 до н. э.) 19

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абстрагирование 17
- Адроны 36, 57
- Аксиоматизация 16
- Акт электромагнитного взаимодействия электронов 56
- Активность физико-химическая 129
- Анализ 17
- Аналогия 17
- Аннигиляция пары  $e^- - e^+$  56
- Ансамбль Гиббса канонический 114, 117
- - - большой 115
  - траекторий 127
- Ароматы кварковые 35
- Асимметрия 74, 99, 109
- Аттрактор 137
- «странный» 136
- Барионы 34, 35, 36
- Беспорядок 131
- Бифуркация 139
- Бозоны 35
- векторные 38, 66
- Вакуум абсолютный 31
- физический (по Дираку) 31, 33
- Вероятность термодинамическая 110
- Вес макросостояния статистический 110
- Вещество 29
- Взаимодействие 50
- гравитационное 30, 46, 57, 69
  - сильное 30, 46, 57
  - слабое 57, 62
  - электромагнитное 30, 46, 57
- Взаимодействия фундаментальные 50
- Вихри Бенара 134
- Галактика 44
- неправильная 45
  - спиральная 45
  - эллиптическая 45
- Гамильтониан 52
- Гипероны 36
- Гипотеза Канта космогоническая 21
- Гипотезы научные 14
- Глюоны 35, 36, 38, 57, 61
- Гравитоны 38, 57, 70
- Группа симметрии 75
- - пространственная 75, 76
  - - точечная 75
- Движение 50
- Дедукция 17

- Действие 52
- Диаграммы фейнмановские 55
- Диалектика 19
- Дисперсия 116
- Дуализм материи корпускулярно-волновой 25
- Дыра черная 44
- Естествознание 8, 10
  - эволюционное 126
- Закон 82
  - динамический 82
  - расширения Вселенной 45
  - сохранения аромата 88
  - - заряда барионного 88
  - - - лептонного 88
  - - - электрического 85, 88
  - - изотопического спина 88
  - - импульса 85, 90, 120
  - - массы 119
  - - момента импульса 85, 90
  - - энергии 85, 90, 120
  - статистический 82
- Законы науки 14
  - общие (фундаментальные) 84
  - сохранения 84
  - частные 84
- Заряд 50, 81
  - барионный 35, 57, 61
  - лептонный 35, 57
  - электрический 35, 57
- Излучение реликтовое 46
  - рентгеновское 56
- Изотропность пространства 79
- Инвариантность 74
  - изотопическая 81
- Инверсия комбинированная (CP) 80
  - пространственная 79
- Индукция 17
- Искусство 9
- Каркас естественнонаучной картины мира концептуальный 8
- Картина мира квантово-полевая 25
  - - механистическая 23
  - - научная 14
  - - физическая 23
  - - электромагнитная 24
  - пространственно-временная 97
  - энергетически-импульсная 97
- Категории науки 14
- Квант(ы) действия поля(ей) 29, 36, 38
- Кварки 36
- Колебания нулевые 34
- Колечки (суперструны) 71
- Константа связи 57
- Концепции научные 14

- Концепция абсолютных пространства и времени 24
- реляционных пространства и времени 25
- самоорганизации в хаосе 147
- Корреляции 117, 147
- Крушение механицизма 22
- Культура 9, 13
- гуманитарная 9, 12
- естественнонаучная 9, 12
- общечеловеческая 12
- Лагранжиан 53
- Лептоны 34, 35, 57
- Макромир 42, 48
- Макросистема 104
- Макросостояние 109
- Масса Планка 70
- Материализм 19
- Материя диффузная 44
- Матрица рассеяния 54
- Мегамир 42, 44, 48
- Мезоны 34, 35, 36
- Метагалактика 44
- Метод вариаций 100
- гипотетико-дедуктивный 16
- диалектический 17
- интерполяции 16
- исторический 17
- логический 17
- метафизический 17
- операционный 15
- структурного анализа 18
- теории возмущений 55
- экстраполяции 16
- Методы исследования общенаучные 17
- - теоретические 16
- - эмпирические 16
- Механицизм 20
- Микромир 42, 47
- Микросостояние 110
- Множество канторовское 137
- Модели динамические (нестационарной Вселенной) 43
- Моделирование 17
- Модель кварковая 36
- расширяющейся Вселенной 23
- стандартная 68
- Нарушение симметрии спонтанное 67
- Натурфилософия 19
- Наука 9, 13, 14
- Науки гуманитарные 10, 11
- естественные 10, 11
- Начало термодинамики второе 108
- - нулевое 105
- - первое 107
- Начала термодинамики 104

Неустойчивость Бенара 134  
 Ноосфера 154  
 Нуклоны 36  
 Обобщение 17  
 Обращение времени 79  
 Однородность пространства 78  
 Описание вероятностное 127  
 Организация вынужденная 149  
 Отклонение квадратичное  
 среднее 116  
 Палочки (суперструны) 71  
 Парадигма 153  
 Параметры управляющие 140  
 Плазма 40  
 Подход гамильтонов 53  
 - лагранжев 53  
 Поле глюонное 61  
 - калибровочное векторное 59  
 - калибровочное неабелевое 62  
 - физическое 29, 31, 46, 50  
 - Хиггса 67  
 Порядок 131  
 - группы 75  
 Постоянная Хаббла 45  
 Потенциалы термодинами-  
 ческие 112  
 Правила отбора 87  
 Преобразование калибровочное 58  
 Преобразования ортогональные 75  
 - пространства-времени дис-  
 кретные 79  
 - - непрерывные 78  
 -  $CPT$  79  
 Принцип бесцветности адронов 37  
 - близкодействия 25  
 - вариационный 100  
 - дальнодействия 24  
 - детерминизма 24, 152  
 - дополнительности 26, 97  
 - запрета 98  
 - корреляций 102  
 - наименьшего действия 52, 100  
 - неопределенностей 26, 96  
 - относительности 94, 95  
 - положительной обратной  
 связи 101  
 - самоорганизации 148  
 - симметрии-асимметрии 99  
 - соответствия 98  
 - суперпозиции 101  
 - эквивалентности 95  
 Принципы научные 14  
 - самоорганизации 147  
 - эволюции материаль-  
 ных систем 153  
 Проблемы научные 14  
 Производство энтропии 121, 127  
 Пространство фазовое 136

- Процесс научного познания 18
- обратимый 106
- равновесный 106
- $\beta$ -распада 63
- Процессы лептонные 65
- нелептонные 65
- перекрестные 123
- Процессы полулептонные 65
- прямые 122
- Радиогалактика 45
- Радиус гравитационный 44
- Размазывание 54
- Распределение Гиббса
- каноническое 114
- - - большое 115
- Резонансы 35
- барионные 36
- мезонные 36
- Рождение пары  $e^- - e^+$  56
- Самодезорганизация 149
- Самоорганизация 123, 138, 145, 149
- Связь ионная 40
- ковалентная 40
- Симметрия 74, 89
- внешней формы 75
- внутренняя 58, 81, 85, 90
- глобальная 81
- дискретная 79
- калибровочная 58, 81, 85, 90
- локальная 81
- между кварками и лептонами 82
- пространства-времени 90
- $CPT$  80
- цветовая 82
- Синергетика 148
- Синтез 17
- Система 28
- термодинамическая 104
- - закрытая 105
- - изолированная 105
- - открытая 104
- - равновесная 105
- Системы гетерогенные 106
- гомогенные 105
- динамические 127
- неуправляемые 147
- управляемые 147
- хаотические 127
- Сопряжение зарядовое 79
- Состояние агрегатное газообразное 40, 106
- - жидкое 40, 106
- - твердое 40, 106
- - плазменное 40, 106
- сингулярное 46
- стационарное 123, 129
- Специфика гуманитарной науки 11
- естественной науки 10

Спин 35  
 - изотопический 58  
 Способ существования материи 50  
 Сравнение 16  
 Стрела времени 126  
 Структура 28  
 - атомно-молекулярная 29  
 Структуры диссипативные 133, 134  
 - Тьюринга 134  
 Суперобъединение 70  
 Суперсимметрия 82  
 Схоластика 20  
 Теорема Нётер 89, 100  
 - Пригожина 121  
 Теории научные 14  
 Теория Большого взрыва 46  
 - Великого объединения 68  
 - взаимодействия электро-  
 слабого 66  
 - геологического эволюцио-  
 низма 22  
 - динамическая 82  
 - естественного отбора 22  
 - катастроф 22  
 - молекулярно-кинетическая 41  
 - относительности общая 69  
 - поля классическая 52  
 - - нелокальная 54  
 - симметрии кристаллов 74  
 - стандартная 65  
 - статистическая 83  
 - стационарного состояния 42  
 - суперструн 70  
 -  $\beta$ -распада 63  
 Термодинамика 104  
 - неравновесных процессов 118  
 Термодиффузия 123, 130  
 Термостат 114  
 Термоэффект диффузионный 123  
 Ток заряженный 64  
 - лептонный 64  
 - нейтральный 64  
 - нуклонный 64  
 Траектория фазовая 136  
 Трансляция 77  
 Уравнение баланса энтропии 121  
 Уравнения феноменологи-  
 ческие 122  
 Уровень атомный 34, 39  
 - кварковый 34, 36  
 - макроскопический 40  
 - молекулярный 34, 40  
 - нуклонный 34, 39  
 Условия самоорганизации 141  
 Фаза 106  
 Факты научные 14  
 Фермионы 35, 97  
 Физика статистическая 104



Флуктуации 116, 134  
 Форма движения материи биологическая 50  
 - - - механическая 50  
 - - - социальная 50  
 - - - физическая 50  
 - - - химическая 50  
 Формализация 16  
 Формирование эволюционных идей 21  
 Формула науки 13  
 Формы научного знания 14  
 Фотон(ы) 34, 36, 38, 57, 61  
 Фракталы 137  
 Хаос динамический 135  
 - диссипативный 135  
 Хромодинамика квантовая 61  
 Цвет кварка 37, 61  
 Цикл предельный 137  
 Частицы вещества 38  
 - виртуальные 27, 38  
 - квазистабильные 35  
 - стабильные 35  
 - Хиггса 67  
 «Часы химические» 135  
 Четность 35  
 Числа квантовые внутренние 35  
 Эквивалентность инерциальных систем отсчета 79  
 Эксперимент 16  
 Электродинамика квантовая 59  
 Элемент симметрии 75  
 Энергия Гиббса 111  
 - свободная 86, 111  
 - связанная 86  
 Энтальпия 111  
 Энтропия 108  
 - информационная 112  
 - статистическая 110  
 Эра адронная 46  
 - лептонная 47  
 - плазмы фотонной 47  
 - послерекомбинационная 47  
 Эффект Комптона 55  
 Эффект Хиггса 67  
*CPT*-теорема 80

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Введение .....	7
<b>1. Взаимоотношение естественнонаучной и гуманитарной культур. Панорама современного естествознания .....</b>	<b>9</b>
1.1. Естественнонаучная и гуманитарная культуры, их структуризация и основные признаки, проблемы и взаимоотношения .....	9
1.2. Предназначение науки и формы научного знания .....	13
1.3. Научные методы как средство достижения научного знания, процесс научного познания .....	15
1.4. Исторические этапы развития естествознания .....	18
1.5. Этапы формирования физической картины мира .....	23
<b>2. Структурные уровни организации материи. Микро-, макро- и мегамиры .....</b>	<b>28</b>
2.1. Структурность и системность описания материи .....	28
2.2. Основные характеристики и особенности вещества и поля .....	29
2.3. Абсолютный и физический вакуум .....	31
2.4. Структурные уровни вещества в микромире .....	34
2.5. Макроскопический уровень вещества и его состояния .....	40
2.6. Крупные структурные объединения материи. Пространственно-временная шкала объединений .....	41
2.7. Теории развития Вселенной .....	42
2.8. Состав Вселенной, структура и типы галактик .....	44
2.9. Теория эволюции Вселенной и ее этапы .....	45
2.10. Единство микро- и мегамиров .....	47
<b>3. Фундаментальные взаимодействия в природе и их объединения .....</b>	<b>50</b>

3.1. Силовые взаимодействия и их математическое описание: гамильтонов и лагранжев подходы .....	50
3.2. Графическая формализация фундаментальных взаимодействий. Фейнмановские диаграммы .....	54
3.3. Понятия калибровочной симметрии и калибровочного преобразования .....	57
3.4. Квантовая электродинамика .....	59
3.5. Квантовая хромодинамика .....	61
3.6. Теории слабого и электрослабого взаимодействий .....	62
3.7. Теория великого объединения .....	68
3.8. Гравитационное взаимодействие, идеи и теории "суперобъединения" .....	69
<b>4. Принципы симметрии пространства и времени и фундаментальные законы сохранения .....</b>	<b>74</b>
4.1. Обобщенное понятие симметрии. Проявления симметрии в неживой и живой природе .....	74
4.2. Симметрия пространства-времени .....	78
4.3. Внутренние симметрии .....	81
4.4. Обобщенные понятия «закон» и «теория».....	82
4.5. Частные и общие (фундаментальные) законы .....	83
4.6. Эволюция закона сохранения энергии .....	85
4.7. Законы сохранения в микромире .....	87
4.8. Связь законов сохранения со свойствами симметрии физических систем. Теорема Нетер .....	89
<b>5. Основные принципы формирования законов природы .....</b>	<b>93</b>
5.1. Современный подход к построению единой естественнонаучной теории .....	93
5.2. Принцип относительности .....	94
5.3. Принцип неопределенностей .....	96

5.4. Принцип дополнительности .....	97
5.5. Принцип запрета (принцип Паули) .....	98
5.6. Принцип соответствия .....	98
5.7. Принцип симметрии-асимметрии .....	99
5.8. Дополнительные принципы, используемые при описании законов природы .....	100
<b>6. Динамические и статистические закономерности поведения сложных систем. Термодинамика равновесных и неравновесных процессов .....</b>	<b>104</b>
6.1. Основные определения, понятия, принципы термодинамики .....	104
6.2. Энтропия как мера неравновесности состояний. Статистический смысл второго начала термодинамики .....	108
6.3. Использование аппарата термодинамических потенциалов для установления устойчивости термодинамического равновесия в системе .....	111
6.4. Связь энтропии и информации .....	112
6.5. Распределения Гиббса для статистических систем .....	113
6.6. Флуктуации .....	115
6.7. Основные положения, методы и законы термодинамики неравновесных процессов .....	118
6.8. Уравнение баланса энтропии и производство энтропии .....	121
<b>7. Порядок и хаос в природе .....</b>	<b>127</b>
7.1. Стрела времени .....	127
7.2. Классификация динамических систем: устойчивые и неустойчивые системы .....	128
7.3. Стационарные состояния. Понятия порядка и беспорядка .....	129

7.4. Диссипативные структуры .....	133
7.5. Динамический и диссипативный хаос .....	136
7.6. Фазовые траектории как способ описания эволюции динамических систем. Понятие аттрактора .....	137
7.7. «Странные» аттракторы и фракталы .....	140
7.8. Бифуркации .....	143
<b>8. Организация и самоорганизация в природе.</b>	
<b>Синергетика и эволюция .....</b>	<b>147</b>
8.1. Неравновесные состояния материи. Длина корреляции .....	147
8.2. Понятие самоорганизации. Управляемые и неуправляемые системы .....	149
8.3. Принципы организации и самоорганизации в живой и неживой природе .....	151
8.4. Синергетика: область исследований, задачи .....	153
8.5. Методы и модели синергетики .....	157
8.6. Эволюционно-синергетическая парадигма естествознания .....	158
<b>Приложение .....</b>	<b>161</b>
Темы рефератов .....	161
Список литературы для рефератов .....	162
<b>Список рекомендуемой литература .....</b>	<b>167</b>
<b>Именной указатель .....</b>	<b>168</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>171</b>