

## § 4. Фундаментальные физические теории

**Классическая механика.** В фундаментальных физических теориях, изучаемых в этом курсе, применяются рассмотренные выше модели взаимодействующих систем или их разновидности. Каждая из рассматриваемых ниже теорий охватывает широкий круг физических явлений и объектов, определяемый как пространственными рамками, так и структурным уровнем деления материи и видом взаимодействия.

В макромире для макротел не проявляются короткодействующие сильные и слабые взаимодействия, а имеют место лишь гравитационные и электромагнитные. Благодаря наличию электрических зарядов двух знаков тела электронейтральны. Поэтому решающее значение в макромире имеет гравитационное взаимодействие. Оно определяет движение небесных тел, их форму, макроскопическое строение. Сила тяготения вызывает и движение тел на Земле. Все эти случаи движения изучаются в классической механике.

В космическом пространстве и в земных условиях наряду с гравитационными существуют макроскопические электромагнитные поля. В механике рассматривается движение под действием статических гравитационных и электромагнитных сил. Например, механика применяется, когда на тело действует сила, которая определяется законом всемирного тяготения, законом Кулона, законом Ампера. В механическую модель укладываются и типичные для механики упругие силы, силы трения, сопротивления среды движению. Все они имеют электромагнитное происхождение: при контакте двух тел заряды одного оказываются вблизи от зарядов другого, что приводит к появлению названных выше сил.

Итак, гравитационные и электромагнитные силы определяют всю огромную совокупность механических движений макроскопических тел. Они вызывают непрерывное изменение импульсов тел, их ускоренное движение. Для решения вопроса о движении тела в каждом конкретном случае необходимо знать силу. Если сила известна, то рассчитывается движение материальной точки, т. е. находятся ее положение в пространстве, скорость и ускорение в каждый момент времени. Если же задано движение, определяется сила. Эти задачи решаются с помощью законов Ньютона, составляющих ядро механики.

**Классическая электродинамика.** Область применимости этой теории — макромир. В ней изучается макроскопический переносчик электромагнитного взаимодействия — электромагнитное поле. Оно и создается электрическими зарядами и действует на заряды. Используется полевая модель материи и взаимодействия. Ядро теории составляют уравнения Максвелла, позволяющие по заданному распределению и движению электрических зарядов находить электромагнитное поле и, наоборот, по заданному полю — распределение и движение создавших его зарядов.

Исторически непосредственно к электродинамике примыкает специальная теория относительности (СТО), в которой окончательно утверждается истолкование электромагнитного поля как отличного

от вещества вида материи. Но сама по себе СТО есть теория пространства и времени инерциальных систем, поэтому она лежит в фундаменте всей физики. (В нашем курсе излагается после классической механики.)

**Квантовая механика.** Движение микрочастиц в области пространства от  $10^{-8}$  до  $10^{-15}$  м (и менее) относится к квантовой механике. Она изучает строение атомов, процессы излучения и поглощения света атомами.

В указанной области электромагнитные взаимодействия играют решающую роль, потому что гравитационные по сравнению с ними исчезающие малы, а сильные и слабые еще не «включились» из-за большого для них расстояния. Особенно важно, что электромагнитные взаимодействия приводят к соединению микрочастиц в системы, находящиеся в устойчивых (стационарных) состояниях. Так соединяются ядра и электроны в атомы, в молекулы, в кристаллы. Но эти же взаимодействия ионизируют атомы, приводят к распаду ядер и т. д. Процессы перестройки в системах заряженных частиц ведут к поглощению и излучению квантов электромагнитного поля, т. е. излучению и поглощению света. Круг физических явлений, вызываемых электромагнитными взаимодействиями в указанном диапазоне, чрезвычайно широк: к ним относятся все химические реакции и биологические процессы.

Ядро квантовой механики составляет уравнение Шредингера, позволяющее по заданному взаимодействию находить состояние и физические характеристики системы, решать вопрос об изменениях состояния во времени.

К квантовой механике примыкает квантовая электродинамика. Ее предмет — электромагнитное взаимодействие электронов (и позитронов) с фотонами и между собой. В квантовой электродинамике используется квантово-релятивистская модель взаимодействующей системы.

Названные выше теории, кроме квантовой электродинамики, изучаются в курсе теоретической физики пединститута. В них фигурируют гравитационные и электромагнитные взаимодействия. Сильные и слабые взаимодействия проявляются в пространственном интервале от  $10^{-15}$  до  $10^{-18}$  м, и вместе с электромагнитными взаимодействиями они ответственны за строение и свойства атомных ядер, элементарных частиц; обеспечивают процессы взаимных превращений на последнем, доступном сейчас для изучения структурном уровне элементарных частиц. Последовательной и всеобъемлющей теории этих взаимодействий и элементарных частиц пока еще нет, хотя многие экспериментальные факты уже обобщены. Здесь наиболее фундаментален теоретический подход, базирующийся на квантово-релятивистской модели взаимодействия и законах квантовой механики.

Следует отметить, что расстояния  $10^{-18} \dots 10^{-19}$  м — последний достигнутый сейчас пространственный порог. При дальнейшем уменьшении расстояний выявляются новые физические законы микромира. Уже сейчас открыты субэлементарные частицы — кварки, из которых состоят все тяжелые элементарные частицы. Ожидают также объеди-

нения всех фундаментальных взаимодействий в единое взаимодействие. Первый шаг на этом пути сделан: электромагнитное и слабое взаимодействия объединены в одно электрослабое, причем теоретические выводы на этот счет подтверждены опытами, проводившимися на пределе самых малых достигнутых расстояний и самых высоких энергий частиц.

**Статистическая физика.** Многие физические объекты представляют собой системы тел или частиц. Таковы, например, Солнечная система, атом вещества, газ, состоящий из множества молекул, и т. д. Если система состоит из небольшого числа материальных точек, то она изучается в классической механике; из микрочастиц — в квантовой механике. Если же число частиц в системе очень велико, как, например, в макроскопических телах, то применить к ним механику невозможно. Такие системы изучаются в статистической физике.

Так как вещество состоит из огромного числа частиц — атомов и молекул, а тепловые явления объясняются их хаотическим движением, то статистическая физика изучает тепловые движения. Но, вообще говоря, область статистической физики значительно шире, она распространяется на системы из большого числа произвольных объектов. Статистика — это общефизическая теория, ее метод применим к исследованию газов, жидкостей, твердых тел, атомного ядра, явления распространения света и взаимодействия его с веществом, строения и эволюции звезд и т. д. Это означает, что статистический метод применяется не только к механической системе, но и к квантово-механической и квантово-релятивистской.

Основа статистики — микроканоническое распределение, или каноническое распределение Гиббса. Ее фундаментальная и принципиально новая по сравнению с классической механикой идея состоит в признании случайного, вероятного значения основных параметров микрочастиц в системе. Для всей их совокупности выполняется некоторое распределение, т. е. закон, обусловленный большим числом компонентов системы. Такие законы и называются статистическими.

Статистике исторически предшествовала термодинамика — учение о тепловых процессах, базирующееся на феноменологических принципах — началах термодинамики. Статистическая физика дала обоснование законам термодинамики, раскрывая внутренний механизм тепловых процессов. В настоящее время в науке применяются как статистические, так и термодинамические методы исследования физических явлений.

**Динамические и статистические причинно-следственные связи в физике.** После знакомства с физическими теориями остановимся на положении, проявляющем себя во всех физических теориях — на причинно-следственной связи между явлениями. Явление A называется причиной, а явление B — следствием, если в результате наличия (или наступления) A возникает (наступает) явление B, причем A оказывается необходимым и достаточным условием B. Описывая и изучая взаимосвязь и взаимообусловленность физических явлений, все физические теории устанавливают между физическими явлениями, событиями, состояниями причинно-следственные связи.

Общая причина движений, состояний, свойств физических объектов — взаимодействия между объектами и взаимодействия внутри объектов. Однако в каждом частном случае имеется своя конкретная причинно-следственная связь. Например, движение тела в механике полностью определяется силой, действующей на тело, положением и скоростью тела в некоторый начальный момент времени. По этим данным однозначно определяется положение и скорость его в любой другой момент времени. Иными словами, взаимодействия, положения и скорости материальных точек механической системы в некоторый момент времени есть причины, однозначно определяющие дальнейшее движение — следствие. По характеру причинно-следственных связей физические теории неоднородны. Так, классическая механика и электродинамика относятся к динамическим теориям, в которых эта связь однозначна: причина  $A$  порождает одно следствие  $B$ . Но статистическая физика относится к другому виду теорий с неоднозначной причинно-следственной связью: для отдельной частицы (в системе с большим их числом) причина  $A$  порождает не одно, а несколько следствий ( $B_1, B_2, B_3$  и т. д.) с различной вероятностью наступления. Однозначной закономерность становится только для большого числа частиц, т. е. закономерность имеет вероятностно-статистический характер. Например, если вероятность следствия  $B_1$  равна 0,1, то однозначно предсказания для одной частицы сделать нельзя, а для миллиона частиц событие наступит с очень небольшими отклонениями для ста тысяч, т. е. почти однозначно.

Квантовая механика также принадлежит к теориям с вероятностно-статистической закономерностью: в ней положение и скорость отдельной частицы носят вероятностный характер в отличие от положения и скорости материальной точки в классической механике.

**Иерархия расстояний — взаимодействий — теорий. Рамки современной физической картины мира.** Во вводной главе курса вы познакомились с особенностями теоретического исследования природы в физике. Опираясь на самые основные понятия физики, составили некоторое представление о физической картине мира. Физические явления, свойства физических объектов, формы движения материи оказались обусловленными пространственными интервалами и соответствующими им фундаментальными взаимодействиями. Наблюдается своеобразная иерархия взаимодействий и физических теорий, соподчинение их в рамках изучаемых пространственных областей. Из таблицы 2 видно, что тип взаимодействия, характер движения и описывающая его теория определяются размерами физических объектов и расстояниями между ними. Важно также, что качественно своеобразные формы движения материи, соответствующие различным структурным уровням ее деления, отличаются количественно — характерными энергиями. Это либо энергии движения, либо энергии связи (т. е. энергии, необходимые для деления системы на составляющие части). Характерные энергии можно сравнить с энергией покоя данного тела или частицы или между собой. Так, область классической механики определяется сильным неравенством  $E \ll mc^2$ , релятивистская область — сравниваемыми с энергией покоя значениями энергии

Таблица 2

## Объекты изучения физических теорий

Область пространства, м	Взаимодействие	Типичные явления	Раздел физики
$10^{13}-10^{-8}$	Гравитационное, электромагнитное	Движение планет, тел на Земле, световые явления	Классическая механика, электродинамика
$10^8-10^{-8}$	Гравитационное, электромагнитное	Тепловые явления в недрах звезд, планет, тел	Статистическая термодинамика
$10^{-10}-10^{-15}$	Электромагнитное	Движение электронов в атоме	Квантовая механика
$10^{-10}-10^{-18}$	Электромагнитное	Взаимодействие электронов и фотонов	Квантовая электродинамика
$10^{-13}-10^{-15}$	Электромагнитное, сильное, слабое	Устойчивость и распады ядер	Теория ядра
$10^{-15}-10^{-18}$	Электромагнитное, сильное, слабое	Взаимные превращения элементарных частиц	Теория элементарных частиц, теория сильных и слабых взаимодействий

тел и частиц, а предельно релятивистская — энергиями частиц, значительно превышающими энергию их покоя. Порядок удельной, т. е. приходящейся на одну частицу, энергии (для микромира) виден из таблицы 3. Отсюда, в частности, следует, что проникновение в глубь строения материи требует все больших энергий. Соответственно

Таблица 3

## Порядок величин характерных удельных энергий связи и энергий покоя

№ п/п	Вид энергии	Величина энергии
1	Энергия нуклона при движении макроскопического тела со скоростью 1 км/с (дается для сравнения)	$10^{-21}$ Дж $\approx 0,01$ эВ
2	Энергия связи молекул (атомов) в твердом теле	0,1...1 эВ
3	Энергия связи атомов в молекуле	1...10 эВ
4	Энергия связи электронов в атоме	От нескольких эВ до нескольких кэВ
5	Энергия связи нуклонов в ядре	1...10 МэВ
6	Энергия покоя электрона	0,5 МэВ
7	Энергия покоя протона	1 ГэВ

использование процессов, происходящих на субэлементарном уровне строения материи, обещает огромные энергетические выходы.

В заключение заметим, что фундаментальные теории имеют относительный характер и ограниченные рамки применимости. Они части общего знания и этапы в процессе познания человеком неисчерпаемой природы. По мере развития наука обогащается новыми теориями, описывающими явления в еще не изученных пространственных областях. Сложившиеся же фундаментальные теории являются относительно устойчивыми и завершенными, их основные положения незыблемы и вполне надежны. Далее будут обобщаться исходные принципы фундаментальных теорий, выявляться единство связи фундаментальных законов.

Концепция взаимодействий, использованная выше для объединения теорий в единую систему, также неабсолютна, она ограничена указанными пространственными рамками, за пределами которых возникают принципиальные трудности и противоречия, свидетельствующие о незавершенности физического знания. И все же нет никаких сомнений в том, что современная физическая картина мира, выкристаллизовавшаяся в процессе развития физической теории как грандиозное обобщение, является крупным шагом вперед на пути познания природы.

Далее в курсе мы переходим к подробному количественному описанию частей этой картины в рамках отдельных фундаментальных физических теорий.