

Для физической теории характерны количественные выводы, т. е. функциональные зависимости между различными физическими величинами. Число физических величин в процессе разработки теории возрастает по сравнению с исходными величинами в основании. Так, например, в механике после формулировки законов Ньютона вводятся энергия, импульс, работа и другие величины.

Общее требование, предъявляемое к теории, отчетливо сформулировано М. Борном: «...ценность теории тем выше, наше доверие к ней тем больше, чем меньше в ней свободного выбора, чем больше ее логическая принудительность»<sup>1</sup>. Это значит, что для определенного круга явлений теория на основе системы своих понятий, исходя из ядра, с помощью однородных математических средств должна давать исчерпывающие выводы. В принципе теория должна давать конкретный вывод о любом объекте или явлении в своей области.

И наконец, важной особенностью теории является предсказание нового. Ядро теории потенциально содержит неизмеримо большую информацию, нежели известная совокупность фактов из данной области физики. В процессе конкретных выводов раскрываются неизвестные ранее стороны и связи явлений, открываются новые свойства и новые явления. Это эвристический характер физической теории — ее неотъемлемая и замечательная черта.

Становление и развитие теории невозможно в отрыве от производственной деятельности общества. Развитие науки побуждается и обеспечивается прогрессом производства, открывая в свою очередь беспредельные возможности для преобразующей и созидающей деятельности человека.

Теоретическая физика, как и физика в целом, связана с развитием ряда других наук. Мы говорили уже, что физика опирается на математику. А на физику опираются другие, как фундаментальные, так и прикладные, науки. Физика изучает материальные структуры, исходные для таких наук, как химия, биология, т. е. составляет теоретическую базу этих наук. Велика и хорошо известна роль физики как основы современной техники, как лидера научно-технической революции.

## § 2. Пространство и время в физике. Исходные модели материальных объектов

**Геометрическая модель пространства и времени.** Пространство и время как формы существования материи для физической науки являются исходными понятиями. Основные свойства реального или физического пространства<sup>2</sup> отражаются в его геометрической модели, применимой во всех фундаментальных физических теориях, изложенных в этом курсе. *Физическое пространство моделируется геомет-*

<sup>1</sup> Борн М. Физика в жизни моего поколения.— М.: Изд. иностр. лит., 1963.

<sup>2</sup> Этот термин применяется для отличия пространства как формы существования материи от так называемых фазовых пространств — вспомогательных математических понятий, используемых в физике.

рическим множеством точек. Оно непрерывно, однородно, изотропно, односвязно, имеет три измерения, и в нем справедлива геометрия Евклида.

Для того чтобы различить точки в пространстве, применяется система отсчета. Это тело или несколько неподвижных относительно друг друга тел отсчета, приборы для измерения длин и времени. К системе отсчета относится некоторая система координат, связанная с телом отсчета. В системе отсчета с помощью измерения расстояний между двумя точками — длин отрезков — каждой точке пространства ставятся в соответствие три действительных числа  $q_1, q_2, q_3$  — координаты точки в той или иной системе координат. Такой процесс называется арифметизацией пространства. В математике не рассматриваются методы и материальные средства арифметизации. Для физики же измерение длин отрезков — исходная операция, без которой никакие другие измерения невозможны.

Аналогично пространству моделируется и время. Принимается, что оно непрерывно, однородно, одномерно, однонаправленno, т. е. изменяется в одном направлении. Момент времени  $t$  соответствует точке на оси времени, промежуток времени — интервалу между двумя точками на оси:  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Время определяется с помощью часов, ход которых проверяется по эталонному физическому процессу, принятому за равномерный. Предполагается, что часами может быть снабжена каждая точка системы отсчета. Часы в разных точках должны быть синхронизированы, т. е. ход их должен быть согласован с помощью сигналов точного времени<sup>1</sup>. Однонаправленность времени означает, что в любой системе отсчета показания всех часов монотонно возрастают.

Нужно подчеркнуть, что арифметизация пространства и времени зависит от выбора системы отсчета и процессов измерения в ней. Используются различные системы отсчета, связанные с разными телами отсчета и снабженные разными системами координат. Обозначим одну из систем буквой  $K$ . Пусть в ней произошло событие в точке с координатами  $q_1, q_2, q_3$  в момент времени  $t$ . Обозначим событие совокупностью этих чисел:  $q_1, q_2, q_3, t$ . В любой другой системе  $K'$  координаты и время того же события будут:  $q'_1, q'_2, q'_3, t'$ .

Результаты измерений зависят от выбора систем координат и имеют поэтому относительный характер.

Влияет на результаты измерений и сам процесс измерений: при определении положения материальной точки в пространстве происходит взаимодействие ее с измерительным прибором. Влияние этого взаимодействия на материальную точку в макромире может быть сделано малым и не учитывается, но в микромире оно существенно изменяет состояние микрочастицы.

Относительный характер результатов измерений и их влияние на объект измерений отражаются в важнейших законах физики; это влияние неустранимо, и с ним следует считаться, чтобы получить объективную информацию о материальном мире.

<sup>1</sup> О синхронизации часов в различных системах см. ниже: ч. I, § 1, ч. II, § 1.

Принятая модель непрерывного пространства и непрерывного времени является обобщением опыта, т. е. она соответствует свойствам реального физического пространства. Так, возможны прямые измерения расстояний вплоть до  $10^{-6}$  см и времени (радиотехническими средствами) до  $10^{-11}$  с. До этих пределов пространство и время остаются непрерывными. В области меньших пространственных и временных интервалов прямые измерения невозможны, но о непрерывности пространства и времени можно судить по косвенным данным, т. е. по совпадению с экспериментом теоретических выводов, основанных на предположении о непрерывности. Эти предположения сейчас подтверждаются вплоть до самых малых расстояний, изученных с помощью соударений элементарных частиц.

Обсудим однородность и изотропность пространства и однородность времени. Однородность — это равноправие всех точек, а изотропность — равноправие всех направлений в пространстве. Эти свойства называют также симметриями пространства.

Однородность времени приводит к закону сохранения энергии, однородность пространства — к сохранению импульса, а изотропность — к сохранению момента импульса. Вся огромная совокупность экспериментальных фактов современной физики находится в согласии с названными законами сохранения, что и говорит об однородности пространства и времени и изотропности пространства. Но очень важно отметить, что однородность и изотропность пространства и времени имеют место не во всех системах отсчета, а только в части из них, называемых *инерциальными*.

Поясним, что следует понимать под евклидовостью пространства. Это справедливость для него геометрии Евклида. В макроскопической области пространства геометрия Евклида подтверждена всей человеческой практикой. И в микроскопической области ее подтверждает совпадение выводов теорий, использующих данную модель пространства, с результатами наблюдений и экспериментов, вплоть до самых малых изученных расстояний. Что касается мира очень больших расстояний — мегамира, то, по современным представлениям, пространство в целом, и особенно вблизи массивных тел, искривлено, т. е. имеет место отклонение от геометрии Евклида. Однако для области, изучаемой нами в фундаментальных теориях, эти отклонения несущественны.

Итак, рассмотренная модель пространства и времени соответствует свойствам физического пространства в области, сверху ограниченной большими расстояниями (порядка размеров Солнечной системы), а снизу — самыми малыми расстояниями, достигнутыми сейчас между элементарными частицами порядка  $10^{-16} \dots 10^{-17}$  см. Соответствующая нижняя граница временных промежутков имеет порядок  $10^{-26} \dots 10^{-27}$  с.

Следует иметь в виду, что данная модель неабсолютна: дальнейшее проникновение человека в мегамир и микромир может повести к ее уточнению. Может оказаться, что в неизученных малых областях, при расстояниях, меньших  $10^{-17}$  см, свойства пространства окажутся иными. (В частности, есть основания ожидать дискретности,

зернистости пространства вместо его непрерывности в области с размерами порядка  $10^{-33}$  см.) То же относится и к очень малым промежуткам времени. Таким образом, речь идет именно о модели пространства и времени, отражающей в указанной выше физической области важнейшие его свойства, но, по всей вероятности, не исчерпывающей всех свойств.

**Классическая, полевая и квантово-релятивистская модели материальных объектов.** Как уже говорилось выше, физика изучает строение, движение и взаимодействие материальных объектов на исходных и простейших структурных уровнях деления и взаимодействия материи. Общее представление о структурных единицах деления материи и их размерах дается в таблице на переднем форзаце.

По современным представлениям, Вселенная бесгранична, но может быть как бесконечной, так и конечной по размерам: радиус конечной Вселенной в настоящее время оценивается как величина  $\sim 10^{26}$  м, а общая масса  $\sim 10^{41}$  кг. Предполагается, что большая часть массы Вселенной сосредоточена в звездах, число которых составляет  $\sim 10^{23}$ . В таком случае во Вселенной  $10^{80}$  стабильных частиц — протонов и нейтронов, образующих вещества.

Но при наличии сил всемирного тяготения между звездами и их большими системами — галактиками Вселенная не может быть стационарной — она должна сжиматься или расширяться. Из астрономических наблюдений известно, что галактики разбегаются от центра с высокими скоростями. Это значит, что Вселенная не всегда была такой, какой мы ее наблюдаем. Эволюция Вселенной началась 10...20 млрд. лет тому назад со сверхплотной системы фотонов, электронов, протонов и нейтронов (и некоторых других частиц), составляющих смесь при чрезвычайно высокой температуре (они образовались в самом начале эволюции). Далее происходит расширение сначала взрывного характера, а затем замедляющегося. Оно сопровождается понижением температуры, образованием ядер водорода и гелия (позднее они соединяются в ядра остальных известных элементов). К ядрам присоединяются электроны, и образуются атомы вещества, а из них — звезды, планеты. Вселенная приобретает современный вид. Будет ли продолжаться расширение Вселенной далее или оно сменится сжатием, это зависит сейчас от средней плотности материи в пространстве. В теории известно критическое значение плотности материи  $5 \cdot 10^{-27}$  кг/м<sup>3</sup>. По современным оценкам, плотность материи по Вселенной имеет порядок  $2 \cdot 10^{-27}$  кг/м<sup>3</sup>. Если это так, Вселенная будет расширяться и далее. Но есть основания считать, что далеко не вся масса материи сосредоточена в звездах. Если элементарные частицы (нейтрино) обладают массой, то масса Вселенной за счет потоков нейтрино много больше массы звезд. В таком случае в будущем расширение Вселенной сменится сжатием, которое будет продолжаться до сверхплотного состояния.

В настоящее время материя в макромире известна в двух видах: в виде *вещества*, из которого состоят все тела, и в виде *электромагнитного* и *гравитационного* полей, заполняющих пространство и передающих действие тел друг на друга.

Для изучения материального мира его объекты — тела, элементарные частицы, электромагнитные поля и др.— заменяют моделями. Различаются следующие основные модели материальных объектов.

*Классическая, или механическая, модель.* Применяется для изучения материи в макромире в виде вещества, т. е. тел. Классической моделью служит *материальная точка*. Это точка, которой заменяют конечное тело для изучения, если размерами его можно пренебречь по сравнению с расстоянием между телами. Материальная точка наделяется массой всего тела. В классической модели тел допускается непрерывное распределение вещества в пространстве, поэтому материальная точка может выступать и как элемент объема тела, объект бесконечно малый по сравнению со всем телом. Положение материальной точки определяется в пространстве ее координатами, которые можно измерить в каждый момент времени. В тот же момент времени можно измерить и скорость движения материальной точки.

*Система материальных точек* моделирует систему тел, протяженное тело. Например, твердое тело — это непрерывная система материальных точек с неизменными расстояниями между ними. Существенно отметить, что для тела имеет место свойство непроницаемости, означающее, что в одном и том же месте пространства не могут находиться два тела конечных размеров.

*Полевая модель.* Она применяется для изучения материи в виде макроскопического физического поля. Массой поле не обладает, т. е. не сводится к системе материальных точек. Поле в пустом пространстве занимает большие области без четких границ, а энергия распределена в поле непрерывно. Существует всего два различных макроскопических поля — гравитационное и электромагнитное. Они свойством непроницаемости не обладают, т. е. могут одновременно находиться в одном и том же месте пространства. Моделируется физическое поле с помощью *математического поля физической величины*, принимающей в каждой точке пространства определенное значение. Так, электрическое поле моделируется непрерывной векторной функцией  $\vec{E}(x, y, z)$ , являющейся напряженностью поля; магнитное — индукцией поля  $\vec{B}(x, y, z)$ ; гравитационное — ускорением силы тяготения  $\vec{g}(x, y, z)$ . Итак, полевая модель представляет собой некоторую функцию координат точки пространства.

*Квантово-релятивистская модель* применяется для изучения материи в микромире, где материя представлена только элементарными частицами очень малых размеров. Все макроскопические тела состоят из элементарных частиц протонов, нейтронов, электронов, имеющих массу. Электромагнитное поле состоит из фотонов, частиц без массы, но обладающих энергией; гравитационное — из гипотетических безмассовых гравитонов. (Имеются и другие элементарные частицы, изучающиеся в конце курса.)

Элементарные частицы моделируются *точками*, обладающими энергией и (отличной от нуля или нулевой) массой. Эти точки называются *микроочастицами* (или просто частицами). Между материальной точкой (моделью тела) и микроочастицей (моделью элементарной

частицы) есть существенная разница, связанная с практическим определением их положения в пространстве. Для микрочастицы одновременное определение координат и скорости не всегда возможно, так как взаимодействие с прибором при измерении координат изменяет скорость, а для материальной точки это взаимодействие несущественно.

**Универсальные физические величины.** Физические объекты — тела, поля, элементарные частицы — отличаются друг от друга рядом свойств, характеризующихся физическими величинами. Универсальными, т. е. применимыми во всей изученной области пространства, являются энергия  $E$  тела, его импульс  $\vec{p}$ , момент импульса  $\vec{L}^1$ . Эти же величины характеризуют элементарные частицы. Что касается макроскопического поля, то оно обладает энергией, импульсом и моментом, распределенным в пространстве с той или иной плотностью. Масса как характеристика инертных свойств тел, проявляющихся при изменении скорости, для макроскопического поля не вводится, так как поле состоит из частиц, движущихся во всех случаях с одной и той же скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с; их масса, как уже говорилось, равна нулю.

Для микрочастиц имеется универсальная формула, связывающая их энергию, импульс, массу:

$$E = c\sqrt{p^2 + m^2c^2}. \quad (1.B)$$

Здесь константа  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с равна скорости распространения электромагнитных волн в вакууме. Формула (1.B) проверена в огромном числе опытов с элементарными частицами.

В настоящее время известны только частицы с  $E > 0$ , т. е. в формуле берется арифметическое значение корня. Кроме того, обнаружены только частицы с  $m^2 \geqslant 0$ , а частицы с минимой массой не найдены. Нет в природе и частиц с отрицательной массой, но имеются частицы с нулевой массой. Таким образом, (1.B) приводит к двум видам связи энергии и импульса: первый — формула (1.B) и второй — для частицы с  $m = 0$ :

$$E = cp. \quad (2.B)$$

Формула (1.B), справедливая для микрочастиц с  $m \neq 0$ , применима и для тел, так как тела состоят из этих частиц. Формула (2.B), справедливая для микрочастиц с  $m = 0$ , применима и для макроскопических полей, так как поля состоят из безмассовых частиц.

Для покоящейся микрочастицы  $p = 0$ , и из (1.B) имеем:

$$E = mc^2. \quad (3.B)$$

Это энергия покоя, которой обладает микрочастица или тело.

В таблице на форзаце физический мир подразделен на области по пространственным масштабам. Формула (1.B) дает важный критерий классификации движений в нем по импульсам и энергиям: если  $p \ll mc$ , то область называется *классической*, если  $p \approx mc$  или  $p > mc$  — *релятивистской*, а при  $p \gg mc$  — *предельно релятивистской*.

<sup>1</sup> Имеются и другие величины, характеризующие физические объекты, но сейчас мы их не рассматриваем.

В релятивистской области кинетическая энергия сравнима с энергией покоя или больше ее. Соответственно в ультрарелятивистской области при  $p \gg mc$  связь энергии и импульса выражается приблизенно формулой (2.В). Вся энергия может быть отнесена к кинетической, как и для частиц с нулевой массой.

Указанное деление физических явлений на релятивистские и нерелятивистские существенно для фундаментальных физических теорий. Так, классическая механика относится к нерелятивистской теории, а электродинамика — к релятивистской. Что касается теорий, описывающих микрочастицы, то у них есть как нерелятивистские, так и релятивистские части. Например, в нашем курсе квантовая механика рассматривает нерелятивистские движения микрочастиц, тогда как эти движения могут быть и релятивистскими. Мы изучаем нерелятивистскую статистическую физику, хотя имеется и релятивистское ее обобщение.

### § 3. Фундаментальные взаимодействия и законы сохранения

**Фундаментальные взаимодействия.** До сих пор рассматривались так называемые *свободные* материальные точки и мирочастицы. Они были свободны от действия на них других точек и частиц, т. е. уединены или изолированы от них. Если несколько материальных частиц или точек находятся на конечных расстояниях друг от друга, то между ними происходит взаимодействие. *Взаимодействие приводит прежде всего к изменению энергии, импульса и момента импульса взаимодействующих точек*, т. е. к изменению состояния системы точек. Взаимодействовать между собой могут макроскопические тела, тела и поля, а также микрочастицы.

Различают два основных проявления взаимодействия: *динамическое*, при котором изменяется характер движения тел или микрочастиц (например, камень, притягиваясь к Земле, падает на нее с ускорением,  $\alpha$ -частица, проходя около ядра атома, изменяет направление скорости), и *статическое*, при котором тела или частицы объединяются в устойчивую систему (например, нуклоны — в ядро, электроны и ядро — в атом, атомы — в тело и т. д.).

Со взаимодействием тесно связано важное для физики понятие силы. В физике о силе говорят как о действии одной материальной точки на другую, это часть взаимодействия двух точек. Количественная мера силы устанавливается по результатам взаимодействия: по ускорениям материальной точки или по деформации твердого тела.

Взаимодействия характеризуют величиной силы, действующей на материальную точку, или изменением энергии взаимодействующих частиц.

Все многообразие проявлений окружающего нас мира — физические явления, свойства и строение физических объектов, их движение обусловлено взаимодействиями. Конкретных взаимодействий происходит великое множество, но в настоящее время выяснено, что все они могут быть отнесены к четырем типам исходных или *фундаментальных* взаимодействий. Фундаментальные взаимодействия от-