

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, α -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-

личаются друг от друга расстоянием, на котором они проявляются, отношением сил, энергиями, приходящимися на микрочастицу,— интенсивностью, характерным временем протекания процессов, вызванных в мире элементарных частиц (см. табл. 1).

Таблица 1

Фундаментальные взаимодействия

№ п/п	Тип взаимодействия	Относительная интенсивность	Радиус действия, м	Характерное время, с
1	Сильное	1	$\approx 10^{-15}$	$\approx 10^{-23}$
2	Электромагнитное	$\approx 10^{-2}$	∞	$\approx 10^{-20}$
3	Слабое	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-18}$	$\approx 10^{-13}$
4	Гравитационное	$\approx 10^{-38}$	∞	?

Гравитационное взаимодействие универсально, т. е. проявляется для любых материальных объектов, но существенно оно только при наличии массивных тел, следовательно, на макроскопических расстояниях. *Электромагнитное взаимодействие* на много порядков интенсивнее гравитационного, но так как оно имеет место только для заряженных тел и частиц, то в макромире, где тела часто электронейтральны, уступает гравитационному взаимодействию. Однако в микромире электромагнитное взаимодействие, сильное, слабое, играет существенную роль, а гравитационное на их фоне при взаимодействии микрочастиц на малых расстояниях незаметно. *Сильное и слабое взаимодействия* имеют место только в микромире, на самых малых расстояниях между частицами, причем сильное превосходит электромагнитное. Подробно свойства и проявления взаимодействий изучаются в конце курса теоретической физики, а сейчас знакомство с ними необходимо для общего взгляда на физические явления и фундаментальные физические теории.

Основные модели взаимодействия. Выше рассмотрены модели материальных объектов. Обсудим теперь модели взаимодействия этих объектов между собой, применяемые в макро- и микромире.

Механическая модель. Механическая система состоит из тел, моделируемых материальными точками, расположенными на некотором расстоянии друг от друга в пустом пространстве. Никаких других объектов в системе нет. Взаимодействие между ними осуществляется на расстоянии, передаваясь мгновенно. Такое взаимодействие называют *дальнодействием*. Результат взаимодействия состоит в непрерывном изменении импульса и кинетической энергии материальных точек при их движении в пространстве: точки движутся с ускорением. *Механическая модель взаимодействия* применяется в определенных условиях. Она относится к макромиру и к нерелятивистской области движения. Это значит, что не принимается в расчет конечная скорость передачи взаимодействий, а вместе с тем и их переносчик — физическое поле. Механическая модель применима только к гравитационному и электромагнитному взаимодействиям.

Полевая модель применяется к системе электрических заряженных тел и электромагнитного поля. Взаимодействие осуществляется посредством поля, т. е. на заряженную материальную точку действует поле, созданное другими точками, а не сами эти удаленные точки. Такое взаимодействие называется *близкодействием*. В результате взаимодействия изменяются непрерывно как характеристики поля, так и движение материальных точек. Движение материальных точек может быть как классическим, так и релятивистским. Что касается поля, то это предельно релятивистский объект, так как распространяется в пространстве со скоростью c .

Квантово-релятивистская модель. Система состоит из микрочастиц. Передача взаимодействия между микрочастицами с отличной от нуля массой осуществляется другими частицами — *квантами поля*. Взаимодействие состоит в том, что две частицы обмениваются третьей — переносчиком взаимодействия. Для электромагнитного взаимодействия им является фотон, сильного — глюоны, π -мезоны, а слабого — промежуточные бозоны (W^+ , W^- , Z^0). Что касается гравитационного взаимодействия, то его проявления на микроуровне экспериментально не обнаружены, а предполагаемый переносчик — гравитон — не найден.

В результате взаимодействия микрочастицы не только изменяют состояние движения, но и претерпевают *взаимные превращения* — исчезают одни и возникают другие (в рамках законов сохранения энергии, импульса, электрического заряда и некоторых других величин). Квантово-релятивистская модель применяется в микромире при высоких, релятивистских, энергиях микрочастиц.

Законы сохранения. Система тел, полей, микрочастиц называется *изолированной*, если не испытывает взаимодействия со своим окружением: в нее не поступают и из нее не уходят какие-либо микрочастицы. В изолированной системе имеют место важнейшие для всей физики законы сохранения ряда физических величин. Это прежде всего законы сохранения энергии, импульса, момента импульса. Они являются универсальными для всех взаимодействий и всех физических явлений, потому что обусловлены свойствами пространства и времени. Рассмотрим законы сохранения с качественной стороны, используя модели взаимодействия.

Начнем с квантово-релятивистской системы. До взаимодействия микрочастицы свободны и каждая обладает энергией, импульсом, моментом. Соответствующие величины для всей системы определяются формулами

$$E = \sum_i E_i, \quad \vec{p} = \sum_i \vec{p}_i, \quad \vec{L} = \sum_i \vec{L}_i. \quad (4.B)$$

В результате взаимодействия энергия, импульсы, моменты отдельных частиц изменились, и после взаимодействия эти параметры системы приобрели значения:

$$E' = \sum_k E'_k, \quad \vec{p}' = \sum_k \vec{p}'_k, \quad \vec{L}' = \sum_k \vec{L}'_k.$$

Ответить на вопрос, изменяются ли энергия, импульс, момент

системы в результате взаимодействия или остаются неизменными, можно на основании опыта. В настоящее время вся огромная совокупность экспериментальных и наблюдательных данных говорит об их строгом сохранении для изолированной системы элементарных частиц.

Законы сохранения выражаются формулами

$$\sum_i E_i = \sum_k E'_k, \quad \sum_i \vec{p}_i = \sum_k \vec{p}'_k, \quad \sum_i \vec{L}_i = \sum_k \vec{L}'_k. \quad (5.B)$$

Весьма существенно, что при взаимодействии частицы, как таковые, не обязательно сохраняются: могут исчезать одни и возникать другие, но без нарушения равенств (5.B).

Для механической и полевой моделей, т. е. для тел и непрерывного поля, сохранение энергии, импульса, момента импульса оказывается следствием сохранения их в квантово-релятивистской системе. В самом деле, любая система материальных объектов в конечном счете состоит из элементарных частиц, а ее энергия, импульс, момент импульса определяются формулами (4.B). Если система изолирована, то названные величины сохраняются.

Остановимся еще на законе сохранения массы для механической системы. В квантово-релятивистской системе сохраняется полная энергия системы, но масса отдельных частиц и масса системы не сохраняются, так как могут исчезать одни и образовываться другие частицы, в том числе безмассовые. Запишем формулу закона сохранения энергии с учетом (1.B) и (2.B):

$$\sum_i c \sqrt{p_i^2 + m_i^2 c^2} + \sum_k c p_k = \sum_{i'} c \sqrt{p_{i'}^2 + m_{i'}^2 c^2} + \sum_{k'} c p_{k'}. \quad (6.B)$$

Так как в классической модели материя представлена только материальными точками, взаимодействующими на расстоянии, то энергией поля, передающего взаимодействие, по сравнению с энергией покоя материальных точек следует пренебречь, а в формуле (6.B) опустить вторые суммы. Пренебрегая также кинетической энергией по сравнению с энергией покоя, получаем:

$$\sum_i m_i c^2 = \sum_{i'} m_{i'} c^2, \quad (7.B)$$

или

$$\sum_i m_i = \sum_{i'} m_{i'} \quad (8.B)$$

— масса изолированной механической системы материальных точек сохраняется. В этом же приближении справедливо положение об *аддитивности* массы. Масса тела равна сумме масс частей, на которые его разделили; при соединении двух или более тел в одно, масса образовавшегося тела равна сумме масс соединенных тел. (Но это заключение несправедливо для микрочастиц.)