

**Аберрация.** Небольшое кажущееся смещение всех неподвижных звезд от своего среднего положения на *небесной сфере*, наблюдаемое с периодом в один год.

**Вектор.** Вектор является частным случаем *тензора*; число компонентов вектора совпадает с числом измерений пространства или *многообразия*, в котором этот вектор определен. Простейшим примером вектора может служить отрезок прямой, проведенный между двумя точками, обладающий как величиной (равной расстоянию между этими точками), так и направлением. Другими примерами являются *скорость* частицы, определенная как смещение частицы за единицу времени, *ускорение* частицы (быстрота изменения скорости), сила (значение которой равно произведению массы частицы на приобретаемое ею ускорение), *напряженность электрического поля* (сила, действующая со стороны электрического поля на единичный заряд).

**Векторная сумма.** Несколько векторов можно «сложить» друг с другом, прикладывая последовательно начало одного вектора к концу другого. Вектор, соединяющий начало первого вектора суммы и конец последнего вектора суммы, и является суммой этих

векторов. Хотя векторы вовсе не являются обычными числами, а представляют собой геометрические объекты, векторная сумма обладает многими свойствами, присущими суммам обычных чисел; так, например, перестановка слагаемых в векторной сумме не влияет на конечный результат. Когда векторы описываются своими компонентами, компонентами векторной суммы будут суммы соответствующих компонент векторов, входящих в сумму.

**Вес.** Сила, испытываемая телом, обладающим массой, под действием тяготения называется *весом*. Вес не является свойством, присущим самому телу (как это имеет место для *массы*), а зависит как от массы тела, так и от того поля тяготения, в котором тело находится. Так, например, вес тела на Луне в шесть раз меньше, чем на поверхности Земли. В повседневной жизни различие между массой и весом зачастую смазывается, потому что на поверхности Земли поле тяготения практически постоянно, однако в принципиальных рассуждениях различие между весом и массой должно проводиться очень четко.

**Гамма-лучи.** Это высокочастотное, проникающее электромагнитное излучение возника-

ет в связи с радиоактивными процессами. Большая часть гамма-лучей имеет более высокую частоту, а следовательно, меньшую длину волны, чем рентгеновские лучи — электромагнитное излучение, возникающее при резком торможении или ускорении электронов. Гамма-лучи и рентгеновские лучи отличаются друг от друга скорее способом их получения, чем своими частотами; некоторая доля гамма-излучения имеет значительно меньшую частоту по сравнению с частотой рентгеновских лучей, используемых в медицинской практике.

*Гравитационные волны.* Общая теория относительности предсказывает, что масса, совершающая быстрое колебательное движение, порождает переменные гравитационные поля, распространяющиеся с той же самой скоростью, с какой распространяются электромагнитные волны; о последней скорости обычно говорят как о *скорости света*. Распространяющиеся в пространстве переменные гравитационные поля называются гравитационными волнами. До сих пор не удалось наблюдать *гравитационные волны*, но аппаратура для их обнаружения создается во многих странах, хотя она очень далека от совершенства.

Согласно общей теории относительности гравитационная волна, проходящая через скопление частиц, находящихся первоначально в покое относительно друг друга, вызовет сдвиговое движение частиц относительно друг друга.

*Дальнодействие (действие на расстоянии).* Согласно представлениям Ньютона все тела оказывают взаимное влияние

друг на друга, вызывая ускорение, величина которого также зависит от массы тела, на которое оказывается действие. Произведение ускорения тела на его массу определяет силу, действующую на тело. Если эта сила передается через пустое пространство, говорят о действии на расстоянии, в отличие от электромагнитной теории Максвелла, в которой принимается, что все тела оказывают действие друг на друга только через электромагнитное поле.

Действие на расстоянии характеризуется мгновенным влиянием (действием) одного тела на другое независимо от расстояния между этими телами. В то же время взаимодействие, передаваемое полем, распространяется с конечной скоростью. Для электромагнитного поля и гравитационных эффектов эта скорость равна примерно 300 000 км/сек. Эта универсальная скорость распространения обозначается обычно буквой *c* (см. также *Поле, Максвелловская теория электромагнитного поля*).

*Декартова система координат.* В декартовой системе координат все координатные оси (линии) являются прямыми линиями. Все они пересекаются под прямым углом друг к другу и размечены с помощью выбранных единиц длины, например сантиметра.

Для двух заданных точек, соответствующие декартовы координаты которых равны  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$ , квадрат расстояния  $D$  между ними определяется выражением

$$D = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2.$$

*Диполь, квадруполь, мультиполь.* Если одна из двух ча-

стиц, расположенных в непосредственной близости друг от друга, заряжена положительно, а другая, обладающая той же величиной заряда, отрицательно, то суммарный электрический заряд пары таких частиц равен нулю. Тем не менее, благодаря тому, что две заряженные частицы все-таки не совпадают, они будут действовать с некоторой силой на другие электрические заряды. Эти силы, вообще говоря, направлены ни по направлению линии, соединяющей заряды, ни перпендикулярно ей, а под углом к этой линии. Комбинация двух заряженных частиц, о которой только что шла речь, называется *электрическим диполем*. В магнитных взаимодействиях не существует свободных магнитных полюсов (зарядов), однако магнитные диполи хорошо известны. Диполю приписывается величина, называемая *моментом диполя*, представляющая собой произведение расстояния между двумя заряженными частицами и величины заряда одной из них; направлением диполя считается направление от отрицательного заряда к положительному.

Если два диполя равной величины, но противоположно направления расположены параллельно друг другу, полный дипольный момент системы равен нулю, но в окрестности такой системы все же будет наблюдаться и электрическое, и магнитное поле. Такая комбинация зарядов называется *квадруполем* (поскольку она состоит из четырех отдельных зарядов). Два квадруполя в свою очередь могут образовать октуполь и т. д. Все образования такого

типа носят общее название *мультиполей*.

Если величина мультиполя меняется со временем, такое изменение вызывает появление сферической волны, распространяющейся от мультиполя; угловое распределение интенсивности такой волны характерно для мультиполя того или иного конкретного вида. Поэтому говорят о дипольном излучении, магнитном квадрупольном излучении и пр.

Как показывается в общей теории относительности, не существует гравитационных дипольных волн, а существуют только квадрупольные волны и волны высших порядков мультипольности.

*Закон непрерывности* см. *Законы сохранения*.

*Законы преобразования*. Законы преобразования представляют собой правила, по которым можно определять компоненты векторов, тензоров или других подобных им величин в любой координатной системе, если известны численные значения соответствующих величин в какой-то одной координатной системе. Если в какой-то системе координат заданы компоненты вектора, вектор как величина, обладающая направлением, полностью определен; его компоненты относительно любой другой координатной системы можно получить, если спроектировать его на соответствующие оси (см. также *Ковариантность*).

*Законы сохранения; законы непрерывности*. О физической величине говорят, что она *сохраняется*, когда ее значение не меняется с течением времени — другими словами, если она является константой

(интегралом) движения. Про величину говорят, что она сохраняется также в том случае, когда она изменяется только под действием внешних сил, т. е. сил, возникающих вне рассматриваемой системы. Среди самых важных сохраняющихся величин следует отметить энергию, импульс, момент импульса, электрический заряд.

Закон сохранения — это закон природы, согласно которому определенная величина должна сохраняться. Если закону сохранения придана такая форма, при которой скорость изменения плотности данной величины (например, плотности энергии) связана со сходимостью или расходимостью линий тока этой величины, то закон в такой формулировке обычно называют законом непрерывности (той же величины).

**Импульс.** Импульс массивного тела определяется как произведение массы тела на скорость тела. В теории относительности в этом определении подразумевается релятивистская масса, которая уже сама по себе зависит от скорости, но совпадает с обычной классической массой, когда тело покоится. Важность понятия импульса обусловлена тем, что импульс подчиняется закону сохранения. Когда два тела действуют друг на друга с некоторыми силами, возрастание импульса одного из них в результате его ускорения компенсируется уменьшением импульса другого, причем суммарный импульс обоих тел не меняется. Тот же самый закон справедлив и для системы, состоящей из

большого числа частиц, взаимодействующих друг с другом.

В геометрии Минковского полный импульс и полная энергия системы частиц представляют собой компоненты четырехмерного вектора, который сохраняется как целое (ср. примечание на стр. 53).

*Инвариантность см. Ковариантность.*

*Инвариантный интервал см. Интервал.*

*Инерциальное ускорение.* Когда движение материальной частицы описывается в системе отсчета, которая не является инерциальной, у частицы обнаруживается ускорение, которое не соответствует никаким силам, действующим на эти частицы. Такие ускорения называются *инерциальными ускорениями*. Самыми известными примерами таких ускорений могут служить ускорения, наблюдаемые в том случае, когда используемая система отсчета вращается относительно инерциальной системы отсчета. Если частица в начальный момент покоится относительно вращающейся системы отсчета, она испытывает ускорение, направленное от оси вращения; это ускорение называют иногда *центробежным ускорением*. Его величина пропорциональна расстоянию от оси (при заданной угловой скорости вращения системы отсчета). Но если частица движется относительно вращающейся системы отсчета, появляется еще и дополнительное инерциальное ускорение, величина которого пропорциональна скорости частицы (относительно вращающейся системы отсчета), а нап-

равление перпендикулярно как оси вращения системы отсчета, так и направлению мгновенной скорости частицы. Дополнительное инерциальное ускорение, о котором идет речь, называется *кориолисовым ускорением*.

*Инерциальные системы отсчета.* Инерциальной системой отсчета может служить такая система отсчета, по отношению к которой массивные физические объекты, не подверженные действию внешних сил, движутся по прямым линиям с постоянной скоростью. Инерциальных систем отсчета существует бесчисленное множество. Если найдена одна инерциальная система отсчета, все остальные системы отсчета, движущиеся относительно нее равномерно и прямолинейно и не обладающие вращением, также будут инерциальными системами отсчета.

*Интервал, пространственно-временной инвариант.* В геометрии обычного трехмерного пространства любые две точки отстоят друг от друга на определенном расстоянии, величина которого не зависит от выбора координатной системы, с помощью которой размечаются точки. Если применяется декартова система координат, квадрат расстояния между двумя точками равен сумме квадратов трех соответствующих разностей координат. В других координатных системах расстояние между точками определяется иначе и, как правило, более сложными выражениями.

В пространственно-временной геометрии Минковского роль, аналогичную ро-

ли расстояния в трехмерном пространстве, играет пространственно-временной интервал. Квадрат времени подобного интервала между двумя событиями равен квадрату разности временных координат, умноженному на  $c^2$ , минус квадрат пространственного расстояния между рассматриваемыми событиями, если в качестве системы отсчета выбрана лоренцева система отсчета. Хотя разность временных координат двух событий зависит от выбора системы отсчета, так же как и пространственное расстояние между событиями, величина инвариантного интервала остается одной и той же во всех лоренцевских системах отсчета. В этом отношении пространственно-временной интервал в геометрии Минковского вполне сходен с расстоянием между точками в обычной геометрии. Но если расстояние между двумя точками пространства обращается в нуль только в том случае, если точки совпадают (т. е. по существу являются одной точкой), пространственно-временной интервал между двумя различными событиями может оказаться равным нулю и в том случае, когда события находятся в светоподобном отношении; это произойдет, если световой сигнал, посланный из точки, где произошло первое событие, в момент наступления события придет в точку, где наступит второе событие, как раз в тот момент, когда второе событие наступает.

*Исчисление бесконечно малых.* Ньютон и немецкий философ Готфрид Лейбниц (1646—1716) независимо друг

от друга построили основы математической техники, необходимой для обращения с переменными величинами. Одна из таких переменных величин была названа *функцией* от другой величины (*аргумента*), если значение первой определяется значением второй. Так, например, свободное падение тела можно описать математически, задавая положение падающего тела как функцию времени.

*Дифференциальное исчисление* связывает быстроту изменения функции с быстротой изменения аргумента. Отношение двух последних величин определяет так называемую *производную* функции. В только что приведенном примере производная смещения по скорости определяет мгновенную скорость падающего тела. Эта мгновенная скорость в свою очередь является функцией времени. Производная от скорости по времени будет не что иное, как ускорение.

*Интегральное исчисление* представляет собой процесс, обратный дифференцированию. Оно дает технику, позволяющую воссоздать исходную функцию, складывая малые приращения функции; например, зная переменную скорость тела, восстановить его траекторию. С помощью интегрального исчисления можно также вычислять площади и объемы фигур, если их границы заданы определенными уравнениями.

*Квадруполь* см. *Диполь*.

*Ковариантность*, *инвариантность*. Система уравнений, связывающая математические или физические величины, называется *ковариант-*

*ной*, если из справедливости этих уравнений в одной системе координат вытекает справедливость формально тождественных им уравнений во всех других системах координат. Если система уравнений (в частности, одно уравнение) ковариантна при лоренцевском преобразовании специальной теории относительности, то про такие уравнения говорят, что они лоренц-инвариантны. Если уравнения сохраняют свой вид при любых преобразованиях координат, в том числе при переходе к криволинейным координатам, используемым в общей теории относительности, то говорят об *общей ковариантности*.

Если отдельное математическое соотношение или уравнение имеет ту же самую форму в различных координатных системах, независимо от других уравнений, то в этом случае говорят об инвариантности уравнения. Ковариантность представляет собой свойство системы нескольких соотношений, которые сохраняют свой вид во всех системах, если все они справедливы в одной. Инвариантность является тем же самым свойством, но относящимся лишь к одному уравнению. Различие между этими терминами зачастую стирается, и ковариантность и инвариантность уравнений используются как равноправные понятия.

Набор величин (а не соотношений) часто называют *ковариантным*, если численные значения этих величин в одной координатной системе можно определить, зная численные значения этих же величин в другой системе и ис-

пользуя закон преобразования. Типичными примерами ковариантного набора величин являются компоненты вектора и компоненты тензора.

Единственная величина, численное значение которой во всех системах отсчета одинаково, называется *инвариантом* или *скаляром*.

**Континуум.** В этой книге термин континуум относится к совокупности точек, образующих линию (одномерный континуум), плоскость (двумерный континуум), трехмерное пространство, четырехмерное пространство-время или другие многообразия.

Континуум следует отличать от дискретной совокупности точек, в которой каждая точка отделена от всех других точек совокупности. В континууме каждая точка окружена другими точками, принадлежащими совокупности, так что в любой окрестности заданной точки, как бы ни была мала эта окрестность, всегда найдутся точки, принадлежащие данной совокупности.

**Конфигурация.** Конфигурацией системы точечных масс называется совокупность всех данных, описывающих положение каждой отдельной точки в пространстве. Скорости этих точечных масс уже не входят в конфигурацию системы. Однако если конфигурация системы и скорости всех точек известны в начальный момент времени, причем также заданы все взаимодействия в системе и силы, действующие на систему, то этого вполне достаточно, чтобы полностью рассчитать траектории всех масс системы.

**Координатные системы.** Координатные системы вводятся для того, чтобы размечать положения точек или физических объектов в пространстве. По существу задать координатную систему, значит задать правила, по которым положение любой точки в трехмерном пространстве описывается тройкой чисел, и наоборот. Правила отождествления точек можно сформулировать так, что положения точек вблизи некоторой заданной точки могут быть охарактеризованы разностями соответствующих значений всех трех координат. Таким образом, координатную систему можно представлять себе наглядно следующим образом: в пространстве проведена трехмерная сетка, образованная некоторыми линиями. Точки пересечения этих линий соответствуют целочисленным значениям координат; дробные значения координат соответствуют точкам, лежащим внутри сетки.

Чтобы задать точку на двумерной поверхности, нужно знать только две координаты, а для задания точки на кривой — всего одну. Наконец, следуя идеям Минковского, можно представлять себе, что события, локализованные как в пространстве, так и во времени, являются точками четырехмерного *континуума*. Чтобы локализовать событие в пространстве-времени, необходимы четыре координаты (см. также *Декартова система координат*, *Система отсчета*).

**Крейсерская скорость.** Скорость движения самолета (или корабля) относительно окружающей его массы воздуха (воды).

*Кривизна.* В этой книге термин *кривизна* применяется исключительно в смысле внутренней кривизны многообразия, в котором определена операция параллельного переноса. В самом общем виде идея параллельного переноса может быть связана с любой геометрической структурой, заданной в одной точке, и эквивалентной структурой в другой точке, если из первой точки во вторую можно попасть по заданной кривой, проходящей через эти две точки. Типичным примером параллельного переноса является параллельный перенос вектора, который перемещается вдоль заданной прямой так, что его направление остается неизменным или, если это невозможно, так, что его направление меняется минимальным образом. На поверхности сферы, например, «вектор» можно рассматривать только как прямолинейный отрезок, указывающий направление, касательное к сферической поверхности, и «параллельный перенос» неизбежно подразумевает, что параллельно переносимый вектор должен следовать за изгибом поверхности.

Если параллельный перенос происходит по кривой, которая возвращается в исходную точку, другими словами, когда перенос производится по замкнутому контуру, вектор (так же как и любая другая геометрическая структура) в конце параллельного переноса может не совпадать с исходным вектором. Если это так, то рассматриваемое многообразие называется *искривленным*; другими словами, оно обла-

дает *кривизной*. Значение кривизны обычно определяют через величину отклонения (например, угол отклонения перенесенного вектора от исходного), деленную на площадь замкнутого контура, вдоль которого совершался параллельный перенос.

В дифференциальной геометрии рассматривается еще и кривизна второго типа — она не используется в этой книге, — часто называемая внешней кривизной, которая указывает, в какой степени поверхность, вложенная в трехмерное пространство, отличается от плоскости. Поверхность конуса, например, с точки зрения внутренней кривизны плоская, а с точки зрения внешней кривизны искривленная.

#### *Локальная система отсчета.*

Обычно считается, что координатная система, входящая как составная часть в систему отсчета, в различные моменты простирается неограниченно далеко. Когда же определяют координатные системы только в непосредственной близости от данной точки или некоторой траектории, говорят о *локальной системе отсчета*.

Если локальная система отсчета строится так, что все объекты в области, где она определена, участвующие в свободном падении в поле тяжести, оказываются движущимися без ускорения, то такую локальную систему отсчета называют свободно падающей системой отсчета. Гравитационное поле по своей природе таково, что свободно падающую систему отсчета нельзя однозначным образом распространить по



такой области пространства-времени, в которой кривизна пространства-времени выражена достаточно заметно.

*Лоренцевская координатная система; Лоренцевская система отсчета.* В специальной теории относительности инерциальные системы отсчета часто называют *лоренцевскими системами отсчета*. При этом предполагается, что в любой момент времени пространственная система координат декартова, а единицы измерения времени выбраны так, что скорость света в пустоте по всем направлениям, во всех точках и во все моменты времени одна и та же.

На языке четырехмерной геометрии Минковского лоренцевскую систему отсчета уместно называть лоренцевской координатной системой.

*Максвелловская теория электромагнитного поля.* Законы электромагнитного поля получили законченную математическую формулировку в работах Максвелла, и теорию электромагнитного поля часто просто называют теорией Максвелла. В ней прежде всего содержатся законы поля: силовые линии электрического поля начинаются только на положительных зарядах и заканчиваются только на отрицательных. Силовые линии магнитного поля представляют собой всегда замкнутые линии, потому что не существует магнитных зарядов какого-либо знака. Электрические силы, действующие вдоль замкнутого контура определяются скоростью уменьшения магнитного потока, пронизывающего внутреннюю часть

контура, тогда как магнитные силы, действующие вдоль такого же контура, равны сумме скорости возрастания потока электрической силы и электрического тока, рассчитанных для внутренней части контура. В теории Максвелла определены силы, действующие на заряженные частицы. Частица, обладающая электрическим зарядом, испытывает в электрическом и магнитном поле силы, действующие со стороны этого поля и пропорциональные заряду частицы. Силы, действующие со стороны электрического поля, пропорциональны величине этого поля и совпадают по направлению с направлением поля. Силы, действующие на заряженную частицу со стороны магнитного поля, выглядят иначе: они пропорциональны скорости частицы и направлены перпендикулярно как к скорости частицы, так и к магнитному полю.

*Масса см. Принцип эквивалентности (а также Центр инерции).*

*Масса покоя см. Энергия покоя.*

*Многообразие.* По терминологии, принятой в математике, представление о пространстве часто сводится к совокупности точек, которую отождествляют с системой действительных чисел — координат этих точек, так что каждому набору из  $n$  чисел (в случае  $n$ -мерного пространства) соответствует одна и только одна точка. Точки считаются близкими друг к другу, если разности соответствующих координат этих точек малы. Определенное таким способом пространство обладает локальными свойствами, которые совпадают с

повседневными представлениями о свойствах пространства и свойствами «в целом»; эти свойства сводятся к тому, что все пространство может быть перекрыто единой координатной сеткой.

Когда бесконечная совокупность точек повсюду обладает локальными свойствами пространства, но не может быть перекрыта единой координатной сеткой, ее называют *многообразием*. Плоскость представляет собой двумерное пространство, тогда как поверхность сферы представляет собой многообразие. Действительно, если строить координатную сетку, скажем, от Северного полюса, ее продолжение на большую часть сферы можно произвести без особого труда; однако когда мы дойдем до Южного полюса, мы будем вынуждены либо приписать этой (ничем не отличающейся от других) точке бесчисленное количество различных значений координат, либо изъять эту точку из всего координатного описания. Две перекрывающиеся координатные системы могут обеспечить полное описание поверхности сферы. Другими примерами многообразий могут служить бублик, лист Мёбиуса, бутылка Клейна. Поскольку пространство является частным случаем многообразия (но не наоборот), термин многообразие часто употребляют для того, чтобы подчеркнуть, что рассматриваемая совокупность точек вовсе не обязательно должна быть пространством.

*Небесная сфера.* При всех непосредственных наблюдениях внеземных объектов принято проектировать эти

объекты на поверхность сферы, в центре которой находится наблюдатель. Радиус этой сферы может быть любым. Такая сфера и называется *небесной сферой*. Обычно точки этой сферы задаются двумя углами, которым на земле соответствуют географическая широта и долгота. На небесной сфере соответствующие углы называются *склонением* и *прямым восхождением*. Согласно специальной теории относительности эти углы для очень удаленных объектов (таких, например, как неподвижные звезды) зависят от того, как движется наблюдатель.

*Нормальные моды колебаний.* Твердое тело конечных размеров, отдельные участки которого связаны упругими силами, способно совершать большое число различного вида колебаний (или, как говорят, обладает многими модами колебаний), при которых различные участки тела одновременно колеблются с разными частотами. Такие колебания называются *нормальными модами* данного упругого тела; каждая нормальная мода обладает собственной характеристической частотой. Самое общее внутреннее движение упругого тела может быть представлено как суперпозиция (наложение) нормальных колебаний (мод).

Представление о нормальных модах может быть перенесено также и на стоячие волны в струне или замкнутых объемах, содержащих воздух (как, например, в органах труб). Мода, обладающая самой низкой характеристической частотой, называется *фундаментальной*

модой; другие моды известны под названием *гармоник*. В том же самом смысле говорят о нормальных модах стоячих электромагнитных волн в полостях, стенки которых могут быть идеальными проводниками.

*Общая ковариантность* см. *Ковариантность*.

*Орбита* см. *Траектория*.

*Ортогональность*. Термин «ортогональный» (направленный под прямым углом) часто предпочитают термину «перпендикулярный», в особенности в тех геометриях, которые существенно отличаются от геометрии обычного пространства. Так поступают, например, в геометрии Минковского.

*Параллельный перенос* см. *Кривизна*.

*Плотность заряда, плотность тока*. Обе эти величины относятся к величине электрического заряда в единице объема. Если величина электрического заряда измеряется в кулонах, плотность заряда выражается в кулонах на кубический метр. Поскольку существуют положительные и отрицательные электрические заряды, плотность заряда может быть также положительной или отрицательной в зависимости от того, преобладают положительные или отрицательные заряды в рассматриваемом объеме.

Когда электрические заряды движутся, возникает также *плотность электрического тока*, которая определяется как величина заряда, проходящего через единицу площади в единицу времени. Плотность электрического тока измеряется в кулонах на квадратный метр в секунду. Если все электрические заряды в объеме одного знака и дви-

жутся в одном и том же направлении с одинаковой скоростью, отношение плотности электрического тока к плотности заряда равно общей скорости зарядов.

*Плотность тока* см. *Плотность заряда*.

*Поле*. В ньютоновской физике считалось, что массивные тела оказывают взаимное действие друг на друга непосредственно через безграничное пустое пространство. Величина взаимного притяжения или отталкивания для двух любых заданных тел зависела только от расстояния между ними. Напротив, для электромагнитных взаимодействий оказалось, что они зависят не только от расстояния между телами, но и от их относительных скоростей. Изменения в положении и состоянии движения тел распространяются с конечной скоростью (обозначаемой латинской буквой *c*), равной скорости света в пустоте. В связи с этим ньютоновское представление о мгновенном действии на расстоянии постепенно уступило место представлению о полях, играющих промежуточную роль; возникающих в том месте, где находится источник, и с конечной скоростью распространяющихся во все стороны от источника. В этой картине сила, действующая на частицу, обладающую электрическим зарядом, возникает исключительно от действия электрического поля в непосредственной окрестности частицы и лишь косвенным образом связанного с источниками этого поля — удаленными заряженными телами.

В релятивистской физике полевой подход применяется

не только к электромагнитным явлениям, но также и к явлениям тяготения. Фактически в настоящее время полевые представления полностью доминируют при рассмотрении взаимодействия между частицами, независимо от того, какова природа этого взаимодействия.

**Преобразования Лоренца.** Преобразование Лоренца определяет закон преобразования четырехмерных пространственно-временных координат события при переходе от одной лоренцевской системы координат к другой. Две лоренцевские системы, о которых идет речь, либо покоятся относительно друг друга, либо движутся относительно друг друга равномерно и прямолинейно без вращения. Начала отсчета пространственных и временных координат двух рассматриваемых систем вовсе не должны совпадать, а пространственные координатные оси могут и не быть параллельными друг другу. Конкретное преобразование Лоренца определяется десятью параметрами: компонентами относительной скорости (три параметра), углами между соответствующими пространственными координатными осями (три параметра, например, углы Эйлера) и, наконец, пространственными и временными координатами начала отсчета одной системы относительно другой (четыре параметра).

**Принцип эквивалентности.**

Принцип эквивалентности является одним из краеугольных камней общей теории относительности. Хотя этот принцип может быть сформулирован по-разному, в этой книге под принципом экви-

валентности понимается равенство инертной и тяжелой (гравитационной) масс у всех объектов. Представление об обеих массах возникло вместе с механикой Ньютона. *Инертной* массой объекта называется отношение приложенной к телу (внешней) силы к величине приобретаемого телом ускорения; *гравитационная* масса — это мера силы, с которой тяготеющий объект притягивает все другие тяжелые тела и с которой он в свою очередь притягивается этими телами. Равенство этих двух видов масс означает, что все объекты, оказавшиеся под действием одного и того же поля тяготения (как это имеет место для силы тяжести на поверхности Земли), испытывают одинаковое ускорение, если, разумеется, нет сил другого происхождения.

Иная формулировка принципа эквивалентности непосредственно опирается на одинаковое ускорение силы тяжести для всех объектов в одном и том же поле тяготения. Если движение массивных тел рассматривается в неинерциальной системе отсчета, то можно обнаружить ускорения у этих тел даже тогда, когда никаких реальных сил (т. е. сил взаимодействия с другими телами) нет. Такие инерциальные ускорения также не зависят от массы или каких-либо других динамических характеристик рассматриваемых объектов. Следовательно, гравитационные и инерциальные ускорения обладают общим свойством (независимо от массы) и в этом смысле являются эквивалентными. Эта формулировка принципа эквивалентности должна быть, од-

нако, несколько уточнена: вообще говоря, инерциальные и гравитационные ускорения можно отличить друг от друга, потому что чисто инерциальные эффекты можно исключить переходом к инерциальной системе.

**Путевая скорость.** Этот термин употребляется для обозначения скорости самолета (корабля) относительно Земли. Путевая скорость определяется не только возможностями самолета (корабля), но также и господствующими ветрами (течениями). Попутный ветер увеличивает путевую скорость по сравнению с *крейсерской*; встречный ветер приводит к тому, что путевая скорость становится меньше *крейсерской*.

**Радян.** Обычно измеряют углы в (дуговых или угловых) градусах. Прямой угол равен  $90^\circ$ , а полная окружность —  $360^\circ$ . Радян представляет собой еще одну естественную единицу измерения углов. Эта единица очень часто используется математиками и физиками. Угол в радианах определяется длиной дуги окружности (радиусом, равным единице), вырезаемой данным углом, если его вершина находится в центре окружности. Поскольку длина окружности (радиуса, равного единице) составляет  $2\pi$ , число радианов, соответствующих прямому углу (четверть окружности), равно  $\pi/2$ . Радян равен примерно  $57^\circ,3$ .

**Световой конус.** Для данного события в пространстве-времени можно указать геометрическое место всех направлений, по которым будет распространяться световой сигнал от этого события и по которым будет приходить световой сигнал к этому со-

бытию. Совокупность всех таких направлений образует световой конус, связанный с рассматриваемым событием. Все направления, соответствующие свету, идущему к событию, образуют *световой конус* прошедшего; все направления, соответствующие свету, уходящему от события, образуют световой конус будущего. Если световой конус прошедшего продолжить до бесконечности, его светоподобные образующие могут быть отнесены к точкам сферы, которая называется *небесной сферой*.

**Сдвиговые волны.** Упругие возмущения распространяются по сплошной упругой среде в виде волн. В сдвиговых волнах движение любой материальной частицы происходит под прямым углом к направлению распространения волны; следовательно, сдвиговые волны можно назвать также *поперечными* волнами. В волнах сжатия движение частицы происходит в направлении распространения волны; волны такого типа называются также *продольными* волнами. В твердых телах могут распространяться как волны сжатия, так и сдвиговые волны; скорость распространения волн сжатия больше, чем скорость сдвиговых волн. В жидкостях и газах возможны лишь волны сжатия — в них нет упругого сопротивления сдвиговым перемещениям. Следовательно, в жидкостях и газах невозможны сдвиговые колебания.

**Сдвиговые движения.** При сдвиговых движениях различные участки твердого тела или жидкой среды движутся относительно друг друга таким образом, что объем любой

части тела не меняется. Плотность материала при сдвиговых движениях остается неизменной, однако форма различных участков изменяется. Вращение, при котором не меняются ни форма, ни объем участков тела, и сжатие, при котором меняется плотность вещества, всегда можно отделить от сдвигового движения.

*Сдвиговая мода.* Нормальная мода называется *сдвиговой* модой, если соответствующее ей движение в основном или целиком сдвиговое. Другие моды называются компрессионными модами (модами *сжатия*). В сдвиговых модах плотность колеблющегося тела остается неизменной, однако форма участков тела изменяется. Земля обладает как сдвиговыми модами, так и модами сжатия; и те, и другие возбуждаются при землетрясениях.

*Сила.* Сила — это физический термин, применяемый к любому внешнему действию, изменяющему состояние движения массивного тела или частицы. В отсутствие таких сил движение частицы по отношению к инерциальной системе отсчета происходит без ускорения; другими словами, частица движется по прямой линии, не меняя величины своей скорости. Наличие сил сказывается в появлении ускорения, т. е. в изменении скорости; ускорение всегда обратно пропорционально массе тела. Величина силы, действующей на тело, может быть выражена как произведение массы тела на приобретаемое телом ускорение.

*Система отсчета.* Этот термин относится к любой системе эталонов, по которой можно

определять положение физического объекта, причем также и в том случае, когда оно меняется с течением времени. Система отсчета отличается от трехмерной пространственной координатной системы тем, что координатная система определяется безотносительно к течению времени, в то время, как система отсчета требует задания пространственных координат в любой момент времени. Положение пачала пространственной системы координат и направлений, которые приданы координатным осям, должны быть заданы для любого момента времени, чтобы система отсчета была полностью определена. Тогда траектории физических объектов, т. е. их положения в различные моменты времени, могут быть описаны, если задаются значения всех координат этих объектов для любого момента времени.

С четырехмерной точки зрения система отсчета представляет собой четырехмерную координатную систему, три координатные оси которой идут в пространственно-подобных направлениях, а четвертая ось имеет времениподобное направление (см. также *Инерциальные системы отсчета*, *Локальные системы отсчета*).

*Скаляр* см. *Ковариантность*.

*Скорость.* Быстрота смещения физического объекта относительно некоторой подходящей системы отсчета называется *скоростью* объекта по отношению к этой системе. Как и смещение, происходящее всегда в определенном направлении, скорость представляет собой вектор, компонентами которого являются скорости изменения трех

соответствующих координат. Величина вектора скорости определяет скорость объекта; под скоростью понимают иногда длину вектора скорости, в которой уже нет указания на направление движения. Под скоростью света, например, понимается скорость распространения электромагнитных волн независимо от того, в каком направлении распространяются эти волны\*).

**Собственное время.** Собственное время — это времяподобный инвариантный пространственно-временной интервал между двумя точками (четырёхмерного пространства), взятыми на траектории материального объекта, например частицы. Собственное время отсчитывается от произвольно выбранной точки траектории тела и возрастает в направлении «будущего». Часы, движущиеся вместе с частицей (закрепленные на ней), вообще говоря, отсчитывают собственное время, если только они не подвергаются ускорению или каким-либо иным внешним влияниям.

**Событие.** Событие — это технический термин, относящийся к явлению, достаточно четко локализованному в пространстве и времени, так что его можно отнести к точке (как иногда говорят, к мировой точке) в четырёхмерном пространственно-вре-

менном континууме. Хорошим примером события является взрыв, производимый в некоторый момент времени в точно определенном месте.

**Сопротивление.** Этот термин применяется к двум внешне различным явлениям: а) к вязкому сопротивлению воздуха или какой-либо иной газообразной или жидкой среды, которое испытывает любое твердое тело, движущееся в этой среде; это сопротивление приводит к замедлению движения тела; б) к сопротивлению материалов, по которым течет электрический ток. Когда может возникнуть недоразумение, в последнем случае говорят «электрическое сопротивление». Электрическое сопротивление измеряется в омах; оно равно численно тому напряжению, которое нужно создать на конце проводника, чтобы по нему шел ток в один ампер.

**Стерadian.** Стерadian является единицей телесного угла. Телесный угол можно определить площадью сферической поверхности, вырезаемой им на сфере единичного радиуса, если вершину телесного угла поместить в центр сферы. Полный телесный угол равен  $4\pi$ . Полный телесный угол, образуемый прямым конусом с углом между сторонами при вершине, равным  $b$ , определяется формулой  $2\pi(1 - \cos b)$ .

**Тензор натяжений.** Натяжения возникают как отклик сплошной среды или тела на деформацию. Та часть натяжений, которая связана со сжатием, называется обычно *давлением*; та часть натяжений, которая связана с изменением формы, называется *натяжением сдвига*.

---

\*) Заметим, что в английском языке русскому слову «скорость» соответствуют три слова: *velocity* — векторная скорость, *speed* — скалярная величина скорости и, наконец, *rate* — быстрота изменения. (Прим. перев.)

Полное напряжение математически можно описать с помощью тензора, компонентами которого являются силы, действующие на некоторые площадки, проведенные внутри тела и имеющие различные ориентации в пространстве.

*Тензоры.* Тензоры представляют собой математические объекты, полученные обобщением представления о векторах. В многообразии, описываемом с помощью координат, тензорам можно сопоставить компоненты (называемые *компонентами тензора*), полностью определяющие тензор. Так как существует много типов тензоров (среди них векторы составляют весьма незначительный класс), высказать скольконибудь общее утверждение о числе компонент, принадлежащих одному тензору, невозможно. Тем не менее для каждого типа тензоров при заданном числе измерений многообразия, в котором определен этот тензор, число компонент также всегда точно определено. Зная числовые значения всех компонент тензора в одной системе координат, можно рассчитать компоненты этого же тензора в любой другой координатной системе; этот пересчет производится согласно определенным правилам; эти правила называются *законами преобразования тензоров* данного типа.

Некоторые тензоры связаны с ориентацией кривой (касательные векторы), двумерной поверхности (бивекторы) и структур более высокой размерности. Другие тензоры связаны с метрическими свойствами многообразия (метрические тензоры).

В теории упругости тензор деформации описывает локальные деформации материала, как сдвиги, так и растяжения; тензор натяжений охватывает всю информацию о внутренних силах, возникающих при деформации и стремящихся восстановить равновесную форму. В общей теории относительности метрический тензор (определяемый десятью компонентами) связывает разности соответствующих координат двух близких событий с инвариантным пространственно-временным интервалом между ними. Тензор кривизны, имеющий двадцать компонент, показывает, насколько пространственно - временной континуум отклоняется от плоского континуума.

*Траектория.* Кривая, по которой перемещается частица или любое другое массивное тело с течением времени, называется траекторией частицы. Таким образом, можно говорить о траекториях звезды, планеты или спутника в солнечной системе, электрона в телевизионной трубке (если считать, что и электроны подчиняются классической механике). Для того чтобы полностью представить себе траекторию частицы, нужно знать не только те точки пространства, через которые проходит путь частицы, но и те моменты времени, в которые частица окажется в той или иной точке. В пространстве-времени Минковского траектория представляет собой кривую, точки которой совпадают со значениями четырех пространственно-временных координат частицы.

Термин *орбита* является почти что синонимом траекто-



рии, однако иногда под орбитами подразумеваются траектории, замкнутые в пространстве, как это имеет место для планет; в этом случае время практически выходит из рассмотрения.

**Уравнение состояния.** Физические характеристики газа или жидкости могут быть описаны отчасти с помощью математического уравнения, которое определяет давление, соответствующее произвольным значениям температуры и допустимого объема. Это уравнение и называется *уравнением состояния вещества*; для каждого вещества, в принципе, имеется свое уравнение состояния. Обычно уравнение состояния строится на основе данных, полученных в лаборатории; однако оно может быть получено теоретически, исходя из атомной и молекулярной модели вещества, которая, как предполагается, отражает микроскопическую структуру вещества. В этом случае сравнение теоретического уравнения состояния с экспериментально полученными данными предоставляет прекрасную возможность определить, в какой мере реальна использованная модель.

**Ускорение.** Под ускорением понимают скорость изменения скорости материальной частицы с течением времени. Скорость характеризуется как величиной (скалярной величиной скорости), так и направлением; ускорение также может быть связано как с изменением величины скорости, так и с изменением направления скорости (может меняться только одна из величин и обе вместе). Когда направление движения не

меняется, ускорение направлено по движению; когда не меняется величина скорости, ускорение направлено под прямым углом к скорости, именно так обстоит дело при равномерном движении по окружности.

Ускорение в физике измеряется в единицах  $см/сек^2$ , техническая единица  $м/сек^2$ .

Ускорение силы тяжести для всех тел на поверхности Земли равно приблизительно  $9,81 м/сек^2$ .

**Фокус.** Эллипсом называется геометрическое место точек, сумма расстояний от которых до двух заданных точек, постоянна. Эти две точки называются *фокусами* эллипса. Планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам разных размеров, однако имеющих общие фокусы. В одном из этих фокусов находится Солнце — самое массивное тело нашей солнечной системы.

**Центр масс, центр инерции, центроид.** Три приведенных синонима (из которых в русской литературе наиболее часто употребляется второй) выражают средние значения координат системы тяжелых тел или частиц. Эти средние берутся независимо для координат  $x, y, z$  декартовой координатной системы, причем средние берутся с учетом соответствующих масс, образующих систему.

Будем обозначать точки или тела, образующие систему, индексами 1, 2, ..., а соответствующие массы как  $m_1, m_2, \dots$ . Тогда, если координаты соответствующих точек равны  $x_1, x_2, \dots$ , координаты центра инерции определяют

$$X = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots}{M},$$

где через  $M$  обозначена полная масса системы  $M = m_1 + m_2 + \dots$ . Аналогичные выражения записываются и для двух остальных координат центра инерции  $\ddot{Y}$  и  $Z$ .

Согласно механике Ньютона центр инерции системы частиц движется по траектории, которая не зависит от сил, действующих между частицами, входящими в систему, и определяется исключительно внешними силами (возникающими от тел, не входящих в рассматриваемую систему). Если на систему внешние силы не действуют, центр инерции движется равномерно и прямолинейно.

#### Центростремительное ускорение.

Когда тело движется с постоянной скоростью по круговой орбите, направление скорости все время меняется; следовательно, в этом случае должно быть ускорение; это ускорение принято называть *центростремительным*.

Если радиус окружности, по которой движется тело, обозначить через  $r$ , постоянное значение скорости тела через  $v$ , то время  $t$ , за которое тело совершит полный оборот, равно

$$t = \frac{2\pi r}{v}$$

и равно тому времени, за которое конец вектора скорости опишет полную окружность, длина которой равна  $2\pi r$ . Если разделить время  $t$  на длину этой окружности, мы получим скорость изменения скорости, т. е. ускорение при движении по окружности — центростремительное ускорение

$$a = \frac{2\pi v}{t} = \frac{v^2}{r^2}.$$

#### Эллипс; эллиптические орбиты.

Когда плоскость пересекает прямой круговой конус, кривая, получаемая в сечении, зависит от угла между плоскостью и осью конуса. Если плоскость перпендикулярна оси конуса, в сечении получается круг. Если плоскость несколько наклонена к оси, в сечении получается кривая, которая носит название *эллипса*. Если провести секущую плоскость еще круче, так, чтобы она стала параллельной одной из боковых образующих конуса, кривая в сечении окажется уже незамкнутой и будет уходить на бесконечность. Эта кривая называется *параболой*. При дальнейшем увеличении угла наклона секущей плоскости, например в том положении, когда плоскость параллельна оси конуса, кривая, получаемая в сечении, также будет уходить на бесконечность, но ее форма будет несколько отличаться от параболы. Эта кривая называется *гиперболой*. Окружность, эллипс, парабола и гипербола — все эти кривые носят общее название *конических сечений*.

Как учит ньютоновская механика, движение планет происходит по следующему закону: малая масса, движущаяся под действием сил тяготения, вызываемых значительно большей массой, описывает одну из кривых конического сечения; какую именно форму имеет траектория, зависит от полной энергии малой массы. И действительно, орбиты, по которым планеты движутся вокруг Солнца, все без исключения являются эллипсами, несколько возмущенными силами, действующими между сами-

ми планетами. (Эти силы значительно превосходят релятивистские эффекты, которые также нарушают строгое классическое движение по эллипсу). Планетарное тело, обладающее достаточной энергией, чтобы уйти на бесконечность, но все же недостаточной, чтобы сохранить конечную скорость на бесконечности, согласно теории Ньютона, будет двигаться на параболе. Если тело будет обладать несколько большей энергией, достаточной, чтобы уйти на бесконечность, сохраняя при этом некоторую часть кинетической энергии, оно будет двигаться по гиперболе.

*Энергия.* В механике *энергией* называются способности тела совершать работу. Энергия в механике представлена в двух формах — в форме кинетической и потенциальной энергии. Кинетическая энергия определяется скоростью тела; она равна той работе, которую нужно произвести над телом, чтобы оно приобрело заданную скорость. *Потенциальная* энергия тела определяется положением тела в силовом поле. Она равна той работе, которую нужно затратить, чтобы привести это тело в заданное положение. Полная энергия тела равна сумме его кинетической и потенциальной энергии. Энергия измеряется в тех же единицах, что и работа. Единицей работы служит джоуль; джоуль — это работа, затрачиваемая для того, чтобы переместить массу в 1 кг на расстояние в 1 м в поле противодействующей силы, которая при свободном движении сообщала бы этой же массе ускорение 1 м/сек<sup>2</sup>. Эта сила известна под названием *ньютон*.

*Энергия покоя; масса покоя.*

Энергией покоя называется энергия физического объекта, например частицы, определенная в системе отсчета, относительно которой рассматриваемый объект покоится. Массой покоя частицы или тела называется масса, определяемая в системе отсчета, относительно которой частица или тело покоится. Согласно специальной теории относительности энергия покоя тела равна его массе покоя, умноженной на квадрат скорости света  $E = mc^2$ .

*Эфир.* Так как электромагнитное излучение (в частности, свет) рассматривалось как близкий аналог звука, было вполне разумным предположить, что существует некоторая среда, являющаяся носителем электромагнитного поля и его энергии в точности так же, как атмосфера, вода или земля служат и носителями звука, и той средой, в которой распространяется звук и связанная с ним энергия. Но если звук не может распространяться через области пространства, лишенные какого бы то ни было вещества, электромагнитные волны распространяются с минимальными потерями энергии и с самой большой из известных скоростей через пространство, которое практически пусто, как это имеет место, например, в межзвездном пространстве. Таким образом, такая примышляемая среда, обеспечивающая распространение электромагнитного излучения, названная *эфиром* (или, как иногда еще говорят, *светоносным эфиром*), должна заполнять любую область пространства независимо от того, есть ли в ней обычное вещество

или нет. Эфир пришлось разделить весьма удивительными механическими свойствами, чтобы объяснить наблюдаемые свойства электромагнитных волн, в частности отсутствие продольных электромагнитных волн. Скорость распространения света можно получить из законов электродинамики; она, однако, зависела от состояния движения системы относительно эфира. Попытки наблюдать анизотропию в распространении света относительно Земли можно интерпретировать как эксперименты по наблюдению движения эфира относительно

Земли; это движение эфира называют иногда эфирным ветром.

Когда была построена специальная теория относительности, гипотеза об эфире сразу утратила всю свою привлекательность, поскольку было установлено, что неудача всех попыток по обнаружению эфирного ветра находилась в полном соответствии с выдвинутой теорией относительности, теорией, которая раз и навсегда закрывала какую бы то ни было возможность обнаружить световой эфир экспериментальным путем.