

6. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРИРОДЫ

Материя, движение и взаимодействие, структурная организация материи. Концепции атомизма и поля. Концепции пространства и времени: классическая физическая модель пространства и времени; пространство-время в специальной теории относительности; пространство и время в общей теории относительности; черные дыры. Симметрия пространства и времени.

6.1. Материя, движение и взаимодействие, структурная организация материи

В картине мира ключевым является понятие “**материя**”, на которое выходят важнейшие проблемы естествознания. О важности этого понятия говорит и тот факт, что смена картин мира связана со сменой представлений о материи. Самое общее определение материи дает философия, рассматривая ее как *объективную реальность*, существующую независимо от человеческого восприятия. Все, что нас окружает, и вблизи, и в космических дальях, все, что мы наблюдаем, объединяется одним термином – *материя*. К наиболее важным свойствам материи относятся: *движение, связь, взаимодействие, пространство и время, структурность и системная организация*. Материя *несотворима и неуничтожима*, она характеризуется бесконечным разнообразием по форме своих проявлений. Все в мире обусловлено естественными связями и взаимодействиями, причинными отношениями и законами природы. В этом смысле в мире нет ничего сверхъестественного и противостоящего материи. Человеческая психика и сознание тоже определяются материальными процессами и являются высшей формой отражения внешнего мира.

Весь материальный мир можно разделить на **три “царства”**: на *неживую природу* или “косное” вещество (по Вернадскому), *живую природу* (живое вещество) и *общество*. Хотя границы между ними достаточно размыты, переход от одного к другому при развитии материи представляет собой целую революцию. Каждая из них означает *качественное изменение естественного хода* вещей и характера развития материи.

В физике понятие материи включает в себя различные виды существования **вещества** и **поля**. В последнее время сюда также включают и **физический вакуум**. К *веществу* относят физические тела (твердые, жидкие, газообразные и плазму), молекулы,

атомы, элементарные частицы, к *полям* – свет, радиоволны, гравитацию и др. *Физический вакуум* – это пространство, в котором отсутствуют реальные частицы и выполняется условие минимума плотности энергии в данном объеме. Это не пустота, как считали когда-то, он не безжизнен и безлик, а полон энергии. Вакуум – сложная система, обладающая свойствами, совершенно непохожими на свойства твердой среды, жидкости или газа. В нем постоянно происходят непрерывные колебания (флуктуации) электромагнитных и других полей, рождаются и уничтожаются элементарные частицы, но все взаимодействия (электрическое, магнитное, гравитационное, ядерное) передаются от точки к точке. Природа физического вакуума и его строение изучены намного хуже вещества и поля. Однако *вакуум и вещество неразделимы*, ни одна вещественная частица не может быть изолирована от его присутствия и его влияния.

Неотъемлемым свойством материи является **движение**. Материя существует только в движении, абсолютного покоя нет. Под движением понимают не только перемещение тел относительно друг друга (механическое движение), но и *любое изменение его свойств, состояний, связей* и т.д., другими словами, существуют *различные формы движения материи*. В физике движение рассматривается в самом общем виде, как *изменение состояния или другой физической величины*. **Движение – это форма, способ существования материи**. Движение невозможно уничтожить. Это хорошо понимали уже древние греки, ведь именно им принадлежит высказывание: “все течет, все изменяется”.

Связь и взаимодействие также представляют важнейшие свойства материи, без которых невозможно ее существование. *Взаимодействие* – это процесс воздействия одних объектов на другие путем обмена материей и движением. Оно выступает как движение материи, а движение включает в себя различные виды взаимодействий. Для всякого объекта *существовать – значит взаимодействовать*, как-то проявлять себя по отношению к другим объектам. Только через *взаимодействие можно узнать о существовании объекта*.

Важнейшими первичными фундаментальными понятиями, с помощью которых описывают материю, ее движение и взаимодействие, считаются понятия “**частицы**” и “**волны**”. Представление о частицах и волнах в классической физике основано на их противопоставлении друг другу. Во многих отношениях их свойства

рассматриваются как прямо противоположные. Свое происхождение они ведут из мира обычного повседневного опыта.

Под *частицей* понимают *нечто строго локализованное в пространстве* и для определенных процессов *относительно неделимое*, сохраняющее свою индивидуальность. Движение частиц характеризуют *траекторией*; они не могут огибать препятствия, не проникают друг через друга, переносят импульс и энергию, имеют массу. Простейший физический образ частицы – малая доля любого материального объекта, некий твердый “мини-шарик”, перемещающийся в абсолютно пустом пространстве. Модель частицы используется для описания вещества. Она является достаточно универсальной: в определенных условиях и реальная элементарная частица, и пылинка, и планета могут рассматриваться как частицы. Модель частицы проста, поскольку для ее описания требуется всего лишь два независимых параметра – *местоположение (координаты) и время*. В классической физике движение частицы сводится к наглядному процессу перемещения вдоль траектории в пространстве.

Понятие волны возникло в науке значительно позже, но оно тоже связано с повседневным опытом. Для *волн*, в отличие от частиц, характерны *отсутствие строгой локализации в пространстве* – они заполняют часть или все пространство, *возможность разложения на отдельные компоненты*, которые являются такими же волнами, как и исходная, *возможность наложения (суперпозиции) волн*. С помощью понятия волны также описывают различные поля, которые обуславливают взаимодействие между частицами. Можно сказать, что *волна* – это *состояние (движение, возмущение), которое было сначала в одном месте, затем оказывается в другом*. Другими словами, волна – это *распространение (передача) колебаний из одного места в другое, соседнее (от точки к точке)*. Волны могут *интерферировать* при наложении друг на друга, *дифрагировать*; как и частицы, они переносят энергию и импульс.

Частицы выступают как носители *дискретности (корпускулярности)*, а волны – как носители *непрерывности* или *сплошности* материи. *Дискретность (прерывность)* означает конечную делимость пространственно-временного строения объекта, его свойств и форм, а также скачки. *Непрерывность* выражает единство, целостность, неделимость объекта. Для непрерывного

нет границ делимости.

В классической физике различие между ними абсолютно, они никаким образом не сводятся друг к другу и описывают совершенно разные стороны материи. Волны обладают рядом существенных признаков непрерывности, а частицы, наоборот, прерывности (дискретности). Подчеркнем, что хотя понятия частицы и волны есть некоторые идеализации, абстракции, но с их помощью моделируются явления природы. Противопоставление волн и частиц в классической физике есть метафизическое противопоставление прерывности и непрерывности. Частицы и волны – это предельно идеализированные случаи существования объектов природы. В "чистом" виде они существуют только как понятия. Эти представления кардинально изменяются на уровне микромира, так же как и характеристики, с помощью которых они описываются.

Важнейшими атрибутами материи являются ее **системность** и **структурность**, которые обозначают *целостность объектов* и их *упорядоченность*.

Система – совокупность элементов и связей между ними. *Элемент* означает минимальный, далее неделимый в рамках данной системы. Совокупность *устойчивых связей (взаимодействий)* между элементами образует *структуру* системы, которая определяет ее упорядоченность. Различают два вида связей – по "горизонтали" и по "вертикали". Первые отражают *координацию (корреляцию)* между однопорядковыми элементами, т.е. ни одна часть системы не может измениться без того, чтобы не изменились другие части. Вторые – это связи *субординации*, выражающие *соподчинение* элементов. Наличие связей указывает на составное, сложное внутреннее устройство системы, где одни части по своей значимости могут уступать другим и подчиняться им. Вертикальная структура подразделяется на *уровни организации системы* и их *иерархию*. *Целостность системы* означает, что все составные части, соединяясь вместе, образуют *уникальное целое, обладающее новыми свойствами*, отсутствующими у отдельных элементов, составляющих систему.

Соединение различных элементов в системы обусловлено *взаимодействием* между ними. *Все свойства системы есть производные от взаимодействий* и являются *результатом их структурных связей и внешних взаимодействий между собой*. Особый тип материальных систем – *живое вещество*.

Во всех целостных системах связь между элементами более

устойчива, упорядоченна и внутренне необходима, чем связь каждого из элементов с окружающей средой. В неживой природе множество объектов будут целостной системой только в том случае, если энергия связи между ними больше их суммарной кинетической энергии совместно с энергией внешних взаимодействий, направленных на разрушения системы. В противном случае система не возникает или распадается. Энергия внутренних связей – это общая энергия, которую нужно было бы приложить к каждому элементу, чтобы удалить его на большое расстояние – “растащить” систему. Внутренняя энергия имеет различное значение в зависимости от характера сил, объединяющих тела в систему. Чем меньше размеры материальных систем, тем прочнее связаны между собой ее элементы.

Весь исследуемый мир в физике делится на **микро-, макро- и мегамир**. Хотя на этих уровнях действуют свои специфические законы, они между собой взаимосвязаны, и часто такое разделение оказывается достаточно условным. *Микромир* соответствует пространственным масштабам размера атома и меньше. Сюда относятся: элементарные частицы и атомные ядра, атомы и молекулы. Размер атома составляет величину $10^{-8} - 10^{-9}$ см, размеры электрона, ядер и других элементарных частиц намного меньше. *Макроскопическими* считаются масштабы $10^{-6} - 10^7$ см, как говорят, это явления “человеческих” масштабов (по размерам, энергии, температуре и т.д.). Когда говорят “макроскопическое тело”, то под этим подразумевают, что оно состоит из большого числа атомов или молекул. В этом смысле *макроскопическим является любой живой организм*, начиная от бактерии. Если бы этого не было, то упорядоченность, необходимая для жизни, разрушалась бы флуктуациями. Объекты и явления планетарного масштаба, Вселенную, космос называют *мегамиром*. Как и в микромире, его масштабы также не поддаются нашему воображению. Каждому из них, согласно Вернадскому, соответствует свое понимание реальности.

Под структурой материи понимают не только ее строение на микроуровне, но также и различные макроскопические тела и все космические системы мегамира. Структура материи проявляется в существовании бесконечного многообразия целостных систем, тесно связанных между собой. В неживой природе, которую, в частности, изучает физика, материя проявляет себя в существова-

нии бесконечного множества целостных иерархически связанных систем: Вселенная (Метагалактика), отдельная галактика, звездная система, планета, отдельные тела, молекулы, атомы, элементарные частицы.

Живая природа также структурирована. В ней выделяют *биологический* и *социальный* уровни. Биологический уровень, в свою очередь, подразделяется на подуровни: макромолекул (нуклеиновые кислоты, ДНК, РНК, белки), клеточный, микроорганический (одноклеточные организмы), органов и тканей, организма в целом, популяционный, биоценозный и биосферный.

Социальная действительность в структурном аспекте подразделяется на подуровни: индивидов, семьи, различных коллективов, социальных групп (классы, нации), государство, система государств, человечество в целом, ноосфера. Переход от одной области материальной действительности к другой связан с усложнением и увеличением множества факторов, которые обеспечивают целостность систем.

Обратим внимание, что закономерности новых уровней *несводимы* к тем, на базе которых они возникли. Таким образом, структурная организация, т.е. *системность*, является *способом существования материи*. Следовательно, любой объект материального мира рассматривается как сложное образование, включающее в себя составные части, организованные в некоторую целостность. Сегодня структура материи известна в масштабах от 10^{-15} см до 10^{28} см, а во времени – от 10^{-22} с до 10–20 млрд лет.

Естествознание изучает разные формы движения материи. Простейшей формой является *механическое движение* – перемещение тел в пространстве. Следующая, более сложная, – это *физическая форма движения материи*: теплота, электричество, звук, ядерные реакции и др. В основе всех этих процессов лежат фундаментальные взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Например, *теплота* – это макроскопическая форма движения, выступающая в виде движения и столкновения атомов и молекул в телах, а также взаимодействия излучения и вещества. Мерой интенсивности теплового движения является *температура*, которая пропорциональна кинетической энергии частиц, составляющих тело, либо энергии поглощаемого излучения. Нижний предел температуры – абсолютный нуль, равный $-273,15^0$ С; верхнего предела не установлено. К отдельным элементарным ча-

стицам и атомным ядрам понятие температуры и теплоты не применимо. Любые физические формы движения материи в конечном счете – это проявление глубинных свойств материи – фундаментальных взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, сильного и слабого. Еще сложнее *химическая форма движения материи*. Наиболее сложной формой движения в природе считается *биологическая форма движения материи – жизнь как особая форма движения материи*. Жизнь на Земле необычайно многообразна по своим проявлениям и, по существу, представляет собой систему взаимосвязанных форм движения.

6.2. Концепции атомизма и поля

С определенной точки зрения развитие наших знаний о строении материи можно представить как непрерывную борьбу двух противоположных концепций: *концепции прерывности (дискретности)* и *концепции непрерывности* или *континуальности* (континуум означает непрерывное множество). Концепцию дискретности отражает **идея атомизма**, а континуальности – **идея физического поля**. С ними было связано и решение проблемы взаимодействия, выступавшее в виде *дальнего действия и ближнего действия*.

Концепция атомизма

В истории естествознания наиболее плодотворной и важной для понимания явлений природы считается концепция *атомизма*, или *корпускулярная концепция*, согласно которой *материя имеет прерывистое, дискретное строение*, т.е. состоит из мельчайших частиц, называемых *атомами*. Идея атомизма была впервые предложена и развивалась еще в древней Греции. Она пронизывает естествознание на протяжении всей его истории и имеет универсальный характер. *Концепция атомизма отражает идею построения всей картины мира из минимального набора строго одинаковых составных частей*, которые называют *элементарными*, т.е. простыми, далее не делимыми. Элементарная частица есть предел делимости материи. Впервые вопрос о пределе делимости материи был поставлен древнегреческими мыслителями. Отметим, что в основе концепции атомизма лежит **редукционизм**, т.е. сведение сложного к простому.

Уже с первых шагов развития науки ученые стремились свести законы природы к совокупности законов взаимодействия и

превращения небольшого набора элементарных частиц. Название таких частиц со временем менялось. Но не в этом главное, потому что новые понятия отражают только фактическую смену уровней представлений о структуре материи и о ее свойствах. Первый уровень был достигнут в Древней Греции. Суть его в следующем. Можно представить определенный небольшой набор сортов элементарных частиц. Все многообразие природы, как живой, так и неживой, определяется различным *расположением* данных частиц. Используя этот ограниченный набор частиц, можно построить огромное многообразие всего того, что существует вокруг нас.

Первоначально такой идеал был реализован в химии в конце XIX в. Ограниченный набор химических элементов позволяет химику "построить" огромное число соединений – различных молекул. Затем молекулы можно укладывать различными способами в твердое тело (кристаллическое или аморфное) или в жидкость и газ и т.д. В основе научного мышления конца XIX в. лежала *атомистика* – представление об атомах как *элементарных частицах, не уничтожаемых и не рождаемых вновь*, а лишь подвергающихся *перемещению и перекombинированию* в различные молекулы при химических превращениях. Периодическая система Менделеева явилась обобщением всей суммы химических знаний.

Мысль о неких принципах, общих для всех химических элементов, могла привести к идее, что все элементы построены по некоему общему плану из меньшего числа элементарных частиц. Эта идея была реализована дважды. Сначала, в 20-х годах XX в., была открыта и понята электронная структура атома: атом состоит из ядра и электронных оболочек, номер элемента в периодической системе равен заряду ядра, т.е. числу электронов в нейтральном атоме. На следующем этапе оказалось, что ядро, в свою очередь, состоит из протонов и нейтронов.

Таким образом из наивных представлений древних о четырех элементах (вода, земля, огонь и воздух) через представления химиков о различных элементах (чуть больше сотни) наука пришла к представлению о трех видах элементарных частиц – *протонах, нейтронах, электронах*. Во многих областях науки (химия, биология, молекулярная физика) и сегодня электроны и даже ядра считаются "кирпичиками", которые сохраняют свою *индивидуальность, не рождаются и не уничтожаются*. Все химические реакции и макроскопические процессы представляют собой *пере-*

группировку этих частиц; вся ядерная физика (по крайней мере в области невысоких энергий) – *перегруппировку* или *взаимопревращения* протонов и нейтронов. Все электроны и протоны одинаковы, одинаков их заряд, но знаки зарядов у протонов и электронов различны. Одинаковы и электронейтральны все нейтроны. Масса покоя у всех электронов одинакова. То же самое и у других частиц.

Представление об элементарных частицах как о всегда одинаковых, не уничтожимых и не рождающихся, вечных составных частях всего сущего – это определенная ступень познания природы. В пределах такого представления переход от атомов к протонам, нейтронам и электронам на качественном уровне ничего не меняет. Принципиально новое было внесено в науку в начале XX в., когда в результате открытий М. Планка и А. Эйнштейна выяснилось, что свет также состоит из отдельных частиц – *фотонов*, которые, в отличие от электронов, постоянно рождаются и уничтожаются (излучаются и поглощаются). Но это уже новый тип частиц, которые *рождаются и уничтожаются*. Другая их отличительная особенность состоит в том, что в одних опытах фотоны ведут себя как *волны* – наблюдается интерференция и дифракция, в других – рассеиваются на атомах, как обычные металлические шарики-*частицы*. Кроме того, фотоны могут появляться и исчезать, как шарики в руках иллюзиониста (например, при фотоэффекте). Это привело к созданию квантовой механики, которая объяснила закономерности переходов в атомах, законы молекулярной химии и твердых тел.

Полевая концепция

Физическое поле (поле) – это особая форма материи, отличная от вещества. Это понятие введено в физику М. Фарадеем и Д. Максвеллом. В настоящее время известно несколько разновидностей полей: *электромагнитное, гравитационное, поле ядерных сил* и др. Математически поле определяется заданием в каждой точке пространства, где оно имеется, некоторой пространственной функции (одной или нескольких). В общем случае поле может меняться во времени. При этом важно понимать, что поле – не вспомогательная математическая конструкция, а *нечто реально существующее* – оно выступает *носителем определенных сил, описывающих взаимодействие материальных объектов*. Понятие поля позволяет объяснить многие явления и предсказывать

новые. В настоящее время понятие поля считается одним из основных в физике. Кто-то сказал, что для современного физика поле столь же реально, как и стул, на котором он сидит.

Понятие поля отражает *идею близкодействия*, согласно которой взаимодействие передается от точки к точке с определенной скоростью. Согласно полевой концепции участвующие во взаимодействии частицы создают в каждой точке окружающего их пространства особое состояние – поле сил, которое проявляется в силовом воздействии на другие частицы, помещенные в какую-либо точку данного пространства. Поля могут проявить себя в виде волн. С классической точки зрения *поле непрерывно*, т.е. оно существует во всех точках окружающего пространства.

Первой теорией поля была теория электромагнитного поля. Она описывает электрические и магнитное поля, успешно объясняя все электромагнитные явления. Электрическое поле – это особое состояние пространства, окружающего заряженное тело, склонное воздействовать на любой другой заряд, находящийся внутри пространства. Оно порождается заряженными телами, и их действие на себе могут ощутить *только заряженные тела*. Магнитные поля порождаются движущимися зарядами – электрическими токами, и их действие испытывают другие движущиеся заряды (токи). В рамках классической электромагнитной теории неравномерно движущийся заряд создает переменное (колеблющееся во времени) электромагнитное поле, которое может отрываться от заряда и существовать самостоятельно, распространяясь в пространстве в виде радиоволн, световых волн или других различных типов электромагнитного излучения. Таким образом, электромагнитные поля имеют *самостоятельную физическую сущность*, и могут рассматриваться вне связи с материальными объектами. Электромагнитное поле имеет две компоненты (составляющие) – электрическую и магнитную, которые подчиняются системе уравнений Максвелла, причем переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле и наоборот, т.е. они неразрывно связаны друг с другом, *представляя единый объект* (рис. 6.1). Электромагнитные поля распространяются с скоростью примерно 300 000 км/с. Скорость электромагнитной волны имеет удивительную особенность – она является максимальной скоростью, с которой может распространяться материальный объект, и не зависит от системы координат. Свет – это та же электромагнитная

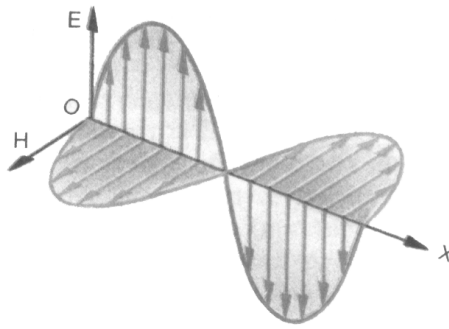


Рис. 6.1. Плоская электромагнитная волна. E и H – электрическая и магнитная компоненты, соответственно

волна. Как всякие волны, электромагнитные волны могут интерферировать, дифрагировать, они переносят импульс и энергию.

Другой широко известный пример – гравитационное поле, которое ответственно за гравитационное притяжение тел. Его источником является масса тела. Гравитационное взаимодействие подчиняется закону всемирного тяготения (см. раздел 3). Подобно электромагнитным волнам должны существовать гравитационные волны (более подробно они будут рассмотрены ниже).

В рамках классической физики вещество и поле различаются как *корпускулярные* и *волновые сущности*: вещество дискретно и состоит из атомов, а поле непрерывно. Вещество обладает массой покоя, а поле – нет. Вещество мало проницаемо, поле полностью проницаемо. Скорость распространения поля равна скорости света, а скорость движения частиц, как правило, много меньше. Однако представление о разделении материи на вещество и поле, вообще говоря, ограничено. Если рассматривать строение вещества, то во всех системах внутреннее пространство будет в основном “занято” электромагнитным полем, на долю собственно частиц приходится ничтожная часть объема системы ($10^{-36} - 10^{-40}$ объема), поэтому можно сказать, что *поле входит в структуру самого вещества*. В этом и проявляется единство прерывного и непрерывного в структуре материи: частицы неотделимы от создаваемых ими полей, и нельзя провести резкой границы, указывающей, где кончается собственно частица и начинается ее внешнее поле. Каждое поле вносит свой вклад в структуру вещества, обуславливая его свойства. Эти представления получили дальнейшее развитие в квантовой физике, которая будет рассмотрена в следующем разделе.

6.3. Концепции пространства и времени

Понятия **пространства** и **времени** – одни из самых основных в современном естествознании. Они относятся к числу первичных понятий так же, как материя и движение. Пространственно-временные отношения – это наиболее фундаментальные понятия, которые не сводятся к другим более простым. Наши представления о пространстве и времени накладывают большой отпечаток на всю картину мира. Они упорядочивают вещи, явления и события, которые окружают нас в жизни и которые мы познаем с помощью науки.

Все, что существует во Вселенной, живое и неживое, имеет пространственно-временное измерение – *протяженность* и *длительность*. Нет такого закона физики, который можно сформулировать без понятий пространства и времени. Пространство и время неотделимы от материи, неразрывно связаны с ее движением и друг с другом. *Пространство и время – это форма существования материи.*

Дать исчерпывающее определение понятиям пространству и времени непросто. Существуют понятия различных типов времени – физического, геохимического, биологического, геологического, психофизического, исторического, космического. Поэтому возможны и различные подходы к определению пространства и времени. Все они, вообще говоря, не совпадают, но, по-видимому, отражают разные его стороны. Мы рассмотрим так называемый *концептуальный* подход, в рамках которого формулируется научное представление о физическом пространстве и времени – это физические и математические модели пространства и времени, широко используемые в современном естествознании. Оказалось, что неживая природа, живое вещество и общество характеризуются специфическими пространственно-временными структурами. В неживой природе на разных уровнях организации материи существуют особенности пространства-времени в микро-, макро- и мегамире.

Интуитивные представления о пространстве и времени человек вырабатывает на основании повседневного опыта. В житейском понимании время воспринимается как переход от прошлого к будущему, а пространство представляется пустым и неподвижным и считается неким вместительным местом вещей и событий. Но правильные представления о них дает наука. *Пространство – это порядок*

взаимного расположения материальных объектов, выражаемый словами *"ближе–дальше"*. Пространство выражает *сосуществование, протяженность и структурность* любых взаимодействующих объектов. *Время – это порядок сменяющих друг друга элементов процесса или состояний материальных объектов*, выражаемых словами *"раньше-позже"*. Оно упорядочивает вещи и этапы их бытия *по длительности и очередности* свершения. Время также характеризует и *процесс становления вещей* (формирование – расцвет – старение). С пространством связаны такие понятия, как *протяженность* или *длина* и *направление*, со временем – *длительность* или *промежуток времени*. Длина измеряется с помощью масштабированной линейки, время – часами. Часы измеряют скорость протекания событий.

Фундаментальную роль времени уже хорошо понимал Аристотель (IV в. до н.э.), различавший два принципиально разных типа времени. Первый тип – *время как движение*, т.е. параметр (число), фиксирующий различные состояния движения системы, не имеющий определенного направления, и обладающий свойством *раньше-позже*. Второй – *время как рождение и гибель*, т.е. характеристика возраста системы, которая имеет начало, конец и определенное направление и обладает не только свойством *"раньше-позже"*, но и свойством *"прошлое–настоящее–будущее"*. Этим двум типам времени соответствуют две фундаментальные концепции естествознания – *концепция движения (концепция Ньютона)* и *концепция эволюции (концепция Дарвина)*.

Согласно первой концепции, долгое время господствовавшей в физике, свойства природы на макроуровне полностью определяются ее свойствами на микроуровне, причем свойства *"кирпичиков"* мироздания не зависят от истории их возникновения. В рамках этой концепции в природе не происходит качественных изменений, а лишь по вполне определенным законам изменяется состояние данной системы. Состояние системы определяется только данным моментом времени, и оно не имеет какой-нибудь предыстории.

Согласно концепции Дарвина, распространенной в биологии, живой организм проходит путь индивидуального развития и несет в себе память о предшествующей эволюции вида и биосферы в целом. Здесь уже состояние микросистемы определяется состоянием макросистемы не только в данный момент времени, но и в предшествующие моменты. Происходит качественное развитие

системы, однозначно связанное с однонаправленностью времени.

Оба этих подхода альтернативны и являются *дополнительными*. Развитие физики за последние 300 лет осуществлялось в рамках концепции Ньютона. Ее принято называть **”физикой существующего”**. В настоящее время считается, что ее развитие подошло к логическому завершению и возникает вопрос о дальнейшей эволюции самой физики как науки. Сейчас развивается новый подход, называемый **“физикой возникающего”**, который отражает конструктивную роль необратимых процессов в физическом мире. Однако изучение ”физики существующего” в ее целостности и единстве показывает путь качественного развития физики.

6.3.1. Классическая физическая модель пространства и времени

Это самая простая модель пространства и времени, но она исчерпывает практически все потребности макроскопической физики. Она также достаточна для описания многих других явлений, в т.ч. атомных спектров и движения планет. С классической точки зрения *пространство – это некая независимо существующая субстанция*, в которой перемещаются материальные тела и свет, а *время – это параметр*, фиксирующий и характеризующий момент события. Такие определения пространства и времени представляют, с одной стороны, результат обобщения повседневного опыта, а с другой – следствия научного анализа простейших механических движений.

Классическая физика исходит из представлений об *абсолютном, трехмерном пространстве как пустоте или вместилнице*, которое содержит все тела и явления окружающего мира. Пространство существует *независимо от содержащихся в нем материальных объектов* и подчиняется *законам евклидовой геометрии*. *Время – тоже самостоятельное измерение*, которое имеет *абсолютный характер и течет с одинаковой скоростью независимо от материального мира*. Здесь абсолютность означает неизменность, одинаковость. *Пространство и время везде и всюду одинаковы, непрерывны; пространство трехмерно*, т.е. для задания точки в пространстве необходимо знать три независимых числа – координаты. *Время одномерно и необратимо*, т.е. течет в одном направлении – от прошлого к будущему.

В классической физике пространство и время не зависят ни от

физических тел, которые в нем находятся, ни от явлений, которые происходят. Образно говоря, пространство – это сцена, где разыгрываются реальные события. Но даже если на сцене нет ”актеров”, сцена остается сценой. Таким образом, пространство считается простымместищем материи во всех ее формах. Если из него убрать все частицы и поля, то останется *вакуум*, т.е. пустота или ничего.

К такому понятию пространства и времени пришли, исходя из анализа механического движения, которое является простейшей формой движения материи. Для описания движения необходимо ввести *систему отсчета* или *систему координат*, ”привязанную” к *телу отсчета* (начало системы координат). Система координат может находиться в разных состояниях: покоиться, двигаться равномерно и прямолинейно или ускоренно. Системы отсчета, покоящиеся или движущиеся равномерно и прямолинейно, называются *инерциальными*, остальные – *неинерциальными*.

Г. Галилей, а затем И. Ньютон показали, что *законы механики во всех инерциальных системах имеют одинаковый вид*. Это утверждение называют **принципом относительности Галилея**. Он утверждает *эквивалентность* (равноправность) всех инерциальных систем отсчета: *состояние прямолинейного и равномерного движения никак не сказывается на происходящих в системе механических процессах, и никакими механическими опытами внутри невозможно определить, покоится она или движется равномерно и прямолинейно*. Другими словами, *никакие механические опыты не могут отличить одну инерциальную систему от другой*. Математически этот принцип выражается в том, что уравнения ньютоновской механики не меняются при переходе от одной системы координат \vec{r} (радиус-вектор) к новым координатам \vec{r}' при преобразовании

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}t, \quad t' = t. \quad (6.1)$$

Формулы (6.1) называют *преобразованием Галилея*. Здесь \vec{v} – скорость новой (движущейся) инерциальной системы с координатами $\vec{r}' = (x', y', z')$ относительно старой системы. В преобразованиях Галилея находят свое выражение основные свойства пространства и времени в классической физике.

1. Пространственные и временные координаты в (6.1) входят неравноправно. Координаты в новой штрихованной (движущейся) системе отсчета зависят как от координат, так и от времени в ста-

рой (неподвижной) системе. Время в движущейся системе не зависит от координаты неподвижной системы, т.е. время мыслится как нечто самостоятельное по отношению к пространству. Пространство и время существуют независимо друг от друга. Время во всех системах отсчета одно и то же!

2. Основными метрическими характеристиками пространства и времени являются *длина*, т.е. расстояние между двумя точками в пространстве, и *промежуток времени*, или *длительность*, – расстояние между событиями во времени в данной системе координат. В преобразованиях Галилея зафиксирован *абсолютный характер длины и длительности* – они не зависят от системы отсчета. Другими словами, длина и длительность во всех инерциальных системах отсчета одинаковы. В классической физике время выступает как внешний параметр. Для определения момента произошедшего события достаточно одного измерения, т.е. указания одного числа. Такое восприятие времени настолько стало привычным, что большее число измерений трудно вообразить. Но время имеет направление, т.е. наблюдаемые события происходят в определенной последовательности – от прошлого к будущему. Это качественно отличает временные измерения от пространственных, причем для любого наблюдателя в данной точке последовательность событий всегда сохраняется. При этом для измерения времени достаточно лишь одних часов. Итак, с классической точки зрения понятия "*прошлое*" и "*будущее*" в данной точке пространства являются *абсолютными*, а направленность времени тесно связана с пониманием причинности: *причина должна предшествовать следствию*.

Таким образом, в классической модели время не зависит от системы отсчета и во всех инерциальных системах, везде и всюду течет одинаково (*ньютоновское абсолютное, истинное время*). Столь же абсолютный характер носит длина: она также не зависит от системы отсчета. Однако положение объекта в пространстве *относительно*, так как оно определяется по отношению к другому объекту, или, по-другому, пространственные координаты тела в разных системах координат различные. В классической физике *время и длина абсолютны*, не зависят друг от друга, от системы координат и от свойств материальных объектов. Свойства пространства описываются евклидовой геометрией. Трехмерность пространства установлена как эмпирический факт. Но ученых не

оставляет желание объяснить и понять факт трехмерности пространства. Определенные достижения на этом пути имеются, хотя полной ясности еще не достигнуто. П. Эренфест показал, что законы природы таковы, что атомы устойчивы или могут образоваться только в случае трехмерного пространства. В пространствах других размерностей (например, 2, 4 и более) атомы образоваться не могут, либо становятся неустойчивыми (распадаются). Из трехмерности пространства также следует, что сила гравитации убывает как квадрат расстояния между взаимодействующими телами.

6.3.2. Пространство-время в специальной теории относительности

Время потеряло надо мной свою власть. Оно потекло в разные стороны, иногда даже в противоположном направлении...

В. Катаев

Принцип относительности играет важную роль в современной физике. Применяв его к явлениям электромагнетизма, А. Эйнштейн создал *специальную теорию относительности*, которая привела к изменению основополагающих принципов физики. Наиболее сильно она изменила представления о пространстве и времени, которые имеются у обычного человека и которые казались настолько очевидными, что Кант объявил их априорными, т.е. полученными до опыта, существующими в сознании человека от века или от Бога. По сути дела, *теория относительности есть учение о пространстве и времени*.

Прежде чем перейти к специальной теории относительности, кратко остановимся на предыстории проблемы. Теория электромагнетизма, развитая Максвеллом, предсказала существование электромагнитных волн и то, что свет – это тоже электромагнитные волны, только с гораздо меньшей длиной волны, чем радиоволны. Из уравнений Максвелла также следует, что свет должен распространяться с одинаковой скоростью во всех равномерно движущихся системах координат. Майкельсон измерил с высокой точностью скорость света, распространяющегося в направлении и против движения Земли, а также в перпендикулярном направлении. Его опыты показали, что *скорость света не зависит от выбора инерциальной системы отсчета*, т.е. она не зависит от

скорости источника и одинакова в неподвижной и равномерно прямолинейно движущейся системе отсчета.

Таким образом, принцип относительности должен быть справедливым и для электромагнитных явлений, а не только для механических. Поэтому был сформулирован **обобщенный принцип Галилея**: *законы физики должны быть одинаковы с точки зрения любого наблюдателя, движущегося с постоянной скоростью, независимо от величины и направления этой скорости, или, по-другому, никакое физическое явление не позволяет установить, покоится система координат или движется равномерно и прямолинейно, т.е. все инерциальные системы отсчета неразличимы, равноправны.*

Но принцип относительности противоречит закону сложения скоростей в классической механике. Действительно, скорость является относительной величиной и она будет разной в покоящейся и движущейся системе отсчета. Но для света это не так!

Исследования в области электродинамики также показали, что электричество и магнетизм не подчиняются принципу относительности, если не внести некоторых существенных изменений. Рассмотрим простой пример. Предположим, что точечный заряд Q расположен на расстоянии R от проводника с током, заряженного одноименным зарядом с плотностью ρ . С точки зрения покоящегося наблюдателя на заряд действует электростатическая сила $F = QE$, где $E = 2\rho/R$ – напряженность поля, создаваемая линейным проводником. Поэтому $F = 2Q\rho/R$. Пусть теперь наблюдатель движется параллельно проводнику со скоростью v . При этом он обнаружит, что на точечный заряд Q кроме электростатической силы действует и магнитная сила, так как с его точки зрения вдоль проводника течет электрический ток, величина которого равна $I = \rho v$. Магнитная сила $F_B = QBv/c$, где $B = 2\rho v/cR$ – индукция магнитного поля, создаваемая прямолинейным током. Таким образом, $F_B = (2Q\rho/R)(v/c)^2$. Полная сила, действующая на заряд, равна $F = 2Q\rho/R - (2Q\rho/R)(v^2/c^2) = (2Q\rho/R)(1 - v^2/c^2)$, так как они направлены в противоположные стороны. Таким образом отсюда следует, что результат одного и того же эксперимента различный в разных системах отсчета. Это противоречит принципу относительности, согласно которому сила, действующая на заряд, не должна зависеть от скорости наблюдателя.

Чтобы ликвидировать эти и другие возникающие противоречия,

Лоренц вывел новые законы связи координат и скоростей в движущихся системах отсчета, которые получили название *преобразование Лоренца*. Он также обнаружил, что при движении электрические взаимодействия изменяются, а тела должны сжиматься в направлении движения тем больше, чем больше скорость – “*лоренцево сокращение*”. Одновременно изменяются и ритмы всех процессов. Изменение масштабов времени и длины, как показал Пуанкаре, подчиняется важному закону симметрии. Он показал, что *принцип относительности означает симметрию законов электродинамики и механики относительно поворотов в четырехмерном пространстве*, где четвертая координата есть время, умноженное на скорость света. Однако все эти изменения не поддавались ясной физической интерпретации. Классическая физика так и не смогла объяснить эти факты.

Полное решение этой проблемы было дано А. Эйнштейном в **специальной теории относительности**. В отличие от Х. Лоренца и А. Пуанкаре он отверг представления о пространстве и времени как абсолютном и одинаковом для движущихся и неподвижных тел, показал относительность этих понятий и на этой основе объяснил универсальность преобразований Лоренца.

Специальная теория относительности основана на двух принципах:

1. Принцип постоянства скорости света: скорость света *одинакова и конечна* во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости движения источника; она является *предельной* (максимальной) скоростью распространения какого-либо сигнала и равна примерно $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

2. Принцип относительности: все инерциальные системы отсчета абсолютно равноправны, т.е. никакими физическими экспериментами невозможно установить движется система равномерно и прямолинейно или покоится.

Первый принцип фактически следует из второго. Поэтому, чтобы сохранить принцип относительности, необходимо допустить и принцип постоянства скорости света для любой системы, движущейся без ускорения. *Принцип относительности – это один из самых общих и фундаментальных законов природы*. Все существующие ныне физические теории удовлетворяют ему, так как входящие в них законы имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета. Совпадение выводов этих теорий с ре-

зультатами наблюдений, в свою очередь, подтверждает принцип относительности.

Сущность принципа предельной скорости состоит в том, что в природе существует инвариантная универсальная скорость, которая является верхним пределом для скорости распространения любых материальных тел и волн (значит и сигналов). Поэтому часто говорят, что *скорость света – это предельная скорость распространения сигналов. Это мировая постоянная.* Сам факт существования такой величины – фундаментальный закон природы, т.е. отражение объективных свойств пространства и времени, а не случайное свойство конкретных объектов: света, нейтрино и т.п. Таким образом, движение света принципиально отличается от движения всех других тел, скорость которых меньше скорости света.

В специальной теории относительности вместо преобразований Галилея используется **преобразование Лоренца**:

$$\begin{aligned}x' &= (x - vt)/(1 - \beta^2)^{1/2}, & y' &= y, & z' &= z, \\t' &= [t - (vx/c^2)]/(1 - \beta^2)^{1/2},\end{aligned}\quad (6.2)$$

где x, y и z – пространственные координаты, а t – время в покоящейся системе координат; штрихованные величины относятся к системе координат, движущейся со скоростью v относительно нештрихованной; $\beta=v/c$, c – скорость света. Преобразование (6.2) записано (ради простоты) для случая, когда движение происходит параллельно оси x .

Обратный переход имеет вид:

$$\begin{aligned}x &= (x' + vt')/(1 - \beta^2)^{1/2}, & y &= y', & z &= z', \\t &= [t' + (vx'/c^2)]/(1 - \beta^2)^{1/2}.\end{aligned}\quad (6.3)$$

Преобразования (6.2) и (6.3) выводятся из вышеуказанных основополагающих принципов.

Из (6.2) видно, что пространственные и временные переменные, в отличие от преобразований Галилея, ”перемешаны”, поэтому следует говорить не о системе координат, а о *системе отсчета*, т.е. о совокупности координат и часов. *Абсолютного времени нет*, так как каждая система отсчета характеризуется своим *собственным временем*. Указывая момент времени, надо указывать соответствующую систему отсчета. В отличие от классической физики здесь *для измерения необходимо иметь свои часы в каждой системе координат*. Важно отметить, что указанные особенности

проявляются лишь при скоростях, сравнимых со скоростью света. При $v \ll c$, т.е. $\beta \ll 1$, преобразования (6.2) совпадают с (6.1), и специальная теория относительности переходит в классическую механику как свой предельный случай.

При создании специальной теории относительности Эйнштейн не просто воспользовался уже известными преобразованиями Лоренца, он усмотрел в них принципиально новый физический смысл: *пространство и время при больших скоростях оказываются взаимосвязанными*, они существуют как единое целое, как *единый пространственно-временной континуум – пространство-время*. Нельзя отделять пространство и время друг от друга. Это приводит к ряду удивительных следствий, которые противоречат нашим привычным представлениям. Рассмотрим некоторые из них.

- **Одновременность**

Понятие **одновременности** совершенно необходимо, так как без него нельзя сравнивать время (ход часов) в разных точках, невозможно определить длину движущегося тела – просто нельзя строить физику. С обычной точки зрения *одновременными* считаются события, которые происходят в один и тот же момент времени. В классической физике события, происшедшие в разных точках пространства, считаются *одновременными*, если ни одно из них не может быть причиной или следствием другого. При этом если события являются одновременными в одной инерциальной системе отсчета, то они будут одновременными в других. Такое определение подразумевает *бесконечную скорость распространения сигналов*, поскольку только в этом случае оно однозначно. В теории относительности это не так, потому что (из-за конечности скорости света) такому определению может соответствовать множество одновременных событий, т.е. возникает неоднозначность.

Первое и наиболее важное следствие теории относительности состоит в *относительности понятия одновременности*: если в некоторой инерциальной системе отсчета два события являются одновременными, т.е. происходят в один и тот же момент времени, то в другой они будут неодновременными. Это непосредственно вытекает из преобразований Лоренца.

Действительно, пусть два события в нештрихованной системе имеют пространственно-временные координаты x_1, t_1 и x_2, t_2 , а в штрихованной, соответственно, x'_1, t'_1 , и x'_2, t'_2 . Согласно (6.2) в

штрихованной системе имеем

$$t'_2 - t'_1 = [(t_2 - t_1) - v(x_2 - x_1)/c^2] / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (6.4)$$

Предположим, что события происходят в нештрихованной системе одновременно, но в разных пространственных точках, т.е. $t_1 = t_2$ и $x_1 \neq x_2$. Тогда из (6.4) следует, что в штрихованной системе указанные события оказываются неодновременными, т.е. *одновременность – понятие относительное* (зависит от системы отсчета). Проанализировав понятие одновременности, Эйнштейн предложил новое определение одновременности. *Два события, которые произошли в точках А и В инерциальной системы отсчета К, одновременны, если световые сигналы, посланные из точек А и В доходят до точки в середине отрезка АВ в один и тот же момент времени.*

Отсюда вытекает строгое определение времени: *время – это совокупность показаний одинаковых часов, помещенных в разных точках пространства системы К, покоящихся в этой системе и имеющих одинаковые показания.* Это определение одновременности приводит к следующему правилу проверки часов на *синхронность* (часы, которые одновременно показывают одинаковое время, считаются синхронными). Пусть в точках А и В инерциальной системы К находится двое часов. Из точки А в момент t_{1A} по часам А посылается сигнал в В. Здесь он отражается (мгновенно) и возвращается обратно в А в момент t_{2A} по тем же часам А. Если в момент прихода сигнала в В часы В показывали время $t_B = (t_{1A} + t_{2A})/2$, то часы А и В считаются синхронными (идушими одинаково).

Установить одновременность событий, происходящих в разных местах, можно двумя способами. Сверить множество одинаковых часов (синхронизация часов) в одной точке, *перенести медленно* их в разные места и по ним проверять одновременность, когда часы показывают одно и то же время. Но это не всегда удобно. Проще сверять (синхронизовать) часы с помощью световых сигналов, так как скорость света не зависит от скорости источника и электромагнитные волны распространяются с одинаковой скоростью по всем направлениям.

Представим себе космонавта на борту движущегося космического корабля. Он сверяет часы на носу корабля и на корме, добиваясь, чтобы стрелки часов показывали одинаковое время в тот момент, когда на нос и на корму придут вспышки от источника

света, расположенного точно посередине. Это и будет означать одновременность. При этом если смотреть с Земли, то очевидно, что после вспышки корма двигается навстречу свету, а нос от него удаляется. В системе координат Земли скорость света та же, что и на корабле, и, значит, вспышка придет на корму раньше, чем на нос, т.е. одновременности нет, и часы сверены неправильно. С точки зрения специальной теории относительности это ничему не противоречит.

- **Относительность промежутков времени**

Рассмотрим в движущейся системе отсчета два события, происходящие в одной и той же точке ($x'_1 = x'_2$) в моменты времени t'_1 и t'_2 . Промежуток времени между этими событиями будет $\tau' = t'_2 - t'_1$. В неподвижной системе промежуток времени составляет $\tau = t_2 - t_1$. Используя преобразования Лоренца, можно показать, что эти промежутки времени связаны между собой следующим соотношением:

$$\tau = \tau' / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (6.5)$$

Отсюда видно, что *промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчета. Он минимален* в системе, где события происходят в одной и той же точке пространства или в системе отсчета, где они как бы покоятся (системе покоя), а в движущейся системе часы отстают пропорционально $\sqrt{1 - (v/c)^2}$, т.е. секунда на движущихся часах становится в $(1 - (v/c)^2)^{-0.5}$ раз длиннее, чем на неподвижных, и это отставание монотонно возрастает. Поэтому говорят, что в *движущейся системе отсчета время замедляется* – эффект *релятивистского замедления времени*. Промежуток времени между двумя событиями в системе покоя называют *собственным временем*.

Релятивистское замедление времени в движущихся системах отсчета относится к числу наиболее парадоксальных выводов теории относительности, вызывающих наибольший протест со стороны здравого смысла. Действительно, пусть с Земли стартовал космический корабль,двигающийся со скоростью 0,9998 с (с – скорость света), и через 50 лет, прошедших на Земле, возвратился обратно. Согласно теории относительности по часам корабля этот полет продолжался всего лишь год. Если космонавт, отправившись в полет в возрасте 25 лет, оставил на Земле сына, только что родившегося, то при встрече 50-летний сын будет приветствовать 26-летнего отца. Это представляется столь необычным:

как могло произойти, что космонавт состарился на один год, а сын на пятьдесят? Отметим, что биология здесь не причем, а такая постановка вопроса некорректна, поскольку она опирается на обыденное представление о некоем универсальном, везде и всюду одинаково текущем времени. На самом деле космонавт состарился на 1 год не за 50 лет, а за 1 год своего собственного времени. Однако по теории относительности на Земле другое время, и, принимая это во внимание, парадоксальность данной ситуации получает разумное объяснение.

Замедление хода часов при движении, каким бы невероятным оно ни казалось, находит подтверждение в физике высоких энергий. Большая часть субатомных частиц неустойчива, через некоторое время быстро распадается на несколько других. Экспериментально подтверждено, что продолжительность существования неустойчивой частицы зависит от скорости относительно наблюдателя. Частицы, движущиеся со скоростью $0,1c$ (здесь c – скорость света) живут в 1,7 раза дольше, чем их медлительные близнецы, а при $0,99c$ – в 7 раз дольше. С точки зрения частицы продолжительность ее существования постоянна, но с точки зрения наблюдателя в лаборатории "внутренние часы" частицы замедлили свой ход, и поэтому время ее существования увеличилось.

В космических лучах в верхних слоях атмосферы образуются частицы, называемые π -мезонами (пионы). Собственное время жизни пионов составляет 10^{-8} с, за это время, двигаясь даже со скоростью, почти равной световой, они могут пройти не больше чем $3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-8} = 300$ см. Между тем приборы фиксируют их на уровне моря, т.е. они проходят примерно 30 км, т.е. путь, в 10 000 раз больший, чем максимально для них возможный. Согласно теории относительности 10^{-8} сек – это собственное время жизни пиона, измеренное по часам, движущимся вместе с ним (покоящимся по отношению к нему). В системе отсчета Земли время жизни пиона оказывается намного больше, и за это "удлиненное" время пионы успевают пройти через земную атмосферу, где их и регистрируют.

- **Относительность длины**

Пусть стержень лежит на оси X . В покоящейся системе отсчета его длина будет $l_0 = x_2 - x_1$, где x_1, x_2 – координаты начала и конца стержня. Найдем его длину в движущейся системе K' . Для этого

выразим координаты x_1, x_2 в системе K' , используя (6.3):

$$x_2 - x_1 = [(x'_2 - x'_1) + v(t'_2 - t'_1)] / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (6.6)$$

В движущейся системе измерять координаты начала и конца стержня необходимо в один и тот же момент времени $t'_2 = t'_1$. Тогда из (6.6) получаем

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (6.7)$$

т.е. длина стержня в системе, где он покоится, будет наибольшей. В движущейся системе *длина сокращается* (в направлении движения). Этот эффект называют *релятивистским сокращением длины* или *лоренцевым сокращением*. Если стержень перпендикулярен оси X , то сокращения нет.

Пусть две шарообразные капсулы (в одной из них находится наблюдатель А, а в другой – Б) с большой скоростью движутся друг относительно друга. Наблюдателю А другая капсула будет представляться не сферой, а эллипсоидом вращения (тело как бы сплющивается, поскольку сокращение происходит вдоль направления движения); у собственной капсулы он никаких отклонений от сферической формы не обнаружит. То же самое относится и к наблюдателю Б. Об "истинной" длине не имеет смысла и говорить, так как длина объекта зависит от скорости движения относительно наблюдателя.

В физике высоких энергий ставятся эксперименты, в которых частицы сталкиваются на таких огромных скоростях, что они как бы "сплющиваются", приобретая форму "блина".

- **Скорость тела в разных системах отсчета**

Пусть тело равномерно движется в нештрихованной (покоящейся) системе со скоростью V в направлении оси X , а V' – скорость этого тела в штрихованной системе, движущейся со скоростью v относительно нештрихованной. Так как $V = x/t$ и $V' = x'/t'$, то, используя (6.2), получаем

$$V = x/t = (x' + vt') / (t' + vx'/c^2) = (V' + v) / (1 + vV'/c^2). \quad (6.8)$$

Отсюда видно, что при больших скоростях хорошо известное в ньютоновской механике правило сложения скоростей "не работает". При $v \ll c$ получаем классическое правило сложения скоростей. При $V'=c$ получаем, что $V=c$, т.е. не зависит от скорости движения источника света.

- **Закон пропорциональности массы и энергии**

Объединение пространства и времени в единое целое приводит к возникновению *связи* между многими другими основополагающими понятиями физики. Теория относительности показала, что энергия тела не обращается в нуль даже тогда, когда тело покоится. В этом случае энергия покоя E_0 оказывается пропорциональной массе m – *закон пропорциональности массы и энергии*. Этот закон устанавливает взаимосвязь между массой и энергией, которая выражается удивительно простой формулой:

$$E_0 = mc^2, \quad (6.9)$$

где c – скорость света.

Многие физики считают эту формулу одной из самых красивых в физике. Формула (6.9) показывает, что в инертной массе таятся огромные запасы энергии. Из-за большой величины квадрата скорости света даже очень малые изменения массы ведут к колоссальному изменению энергии. На этом основана, например, вся ядерная энергетика. Масса тела всегда меняется, когда изменяется его внутренняя энергия. Например, при нагревании масса утюга меняется (только очень незначительно, так как энергия изменяется мало). Также можно показать, что если частица движется со скоростью света, то ее масса равняется нулю. У безмассовой частицы нет системы координат, где она покоится (“покой ей только снится”). К таким частицам относятся, например, фотоны и нейтрино.

Закон пропорциональности массы и энергии утверждает, что масса не существует без энергии. Его важное значение состоит в том, что он связывает две противоположные характеристики: энергию, являющуюся мерой движения (изменения), и массу – меру инерции (устойчивости), которые раньше мыслились как независимые друг от друга. Таким образом, понятия, которые в нерелятивистской физике выглядели независимыми, в теории относительности представляются диалектически связанными, приводя, как говорил М. Борн, к “единению наших знаний о материальном мире”.

Представления о пространстве и времени настолько важны при описании природных явлений, что при их изменении меняется весь подход к описанию природы. При больших скоростях движения тел *пространство и время становятся неразделимыми*. В мире высоких скоростей необходимо использовать специальную теорию

относительности. Еще задолго до создания этой теории астрономы уже осознавали в одном контексте тесную связь пространства и времени. Суть в том, что они имеют дело с очень большими расстояниями, поэтому для них важен тот факт, что свету требуется определенное время для того, чтобы переместиться от наблюдаемого объекта к наблюдателю. Так как скорость света не является бесконечно большой, наблюдатель видит не настоящее положение небесных тел, а то, каким оно было некоторое время назад. Свет проходит расстояние между Солнцем и Землей примерно за 8 минут, и поэтому, когда бы мы не взглянули на Солнце, всегда увидим его таким, каким оно было 8 минут назад. Поэтому же мы видим ближайшую звезду такой, какой она была 4 года тому назад, а мощные телескопы позволяют нам наблюдать за процессами, которые происходили в других галактиках миллионы лет тому назад. Благодаря этому астрономы могут изучать эволюцию звезд, их скоплений и галактик на всех стадиях. Разнообразные явления, происходившие на протяжении миллионов лет, можно сейчас наблюдать в определенных участках неба. Поэтому астрономы хорошо знают о важном значении связи пространства и времени. Открытие специальной теории относительности заключается в том, что эта связь важна не только при больших расстояниях, но и при высоких скоростях. Даже на Земле измерение зависит от времени, учитывая состояние движения наблюдателя, и это подтверждено экспериментами.

В связи с релятивистским замедлением времени возникает *парадокс близнецов*. Пусть из некоторой точки инерциальной системы отсчета в момент времени $t = 0$ вылетает ракета и, совершив полет, возвращается обратно. При возвращении ракеты часы неподвижной системы координат (на Земле) показывают время t , а часы на ракете – $t' < t$. Поэтому если бы один из близнецов летал на ракете, а другой оставался на Земле, то при их встрече после полета первый был бы моложе второго. Парадокс возникает в результате следующего рассуждения. Так как движение относительно, то можно сказать, что двигался второй близнец, а близнец на ракете никуда не летал. Тогда более молодым должен быть первый. Возникает вопрос: “Кто же в действительности моложе?” Неправильность рассуждения состоит в том, что системы отсчета с близнецами не эквивалентны – одна из них инерциальная, а другая (ракета) – нет, поскольку, чтобы вернуться обратно,

ракета должна изменить скорость и повернуть обратно. Парадокса нет, потому что в неинерциальной системе необходимо еще учитывать внешние поля тяготения, которые также влияют на ход часов. Это делает временной промежуток в движущейся системе необратимым. Полное разрешение парадокса дает общая теория относительности.

Исследования в области теории относительности помогли нам познать ее математическое совершенство, но наша интуиция до сих пор здесь беспомощна. Мы не можем наглядно представить себе четырехмерное пространство-время, как и все остальные ее понятия. Когда мы сталкиваемся с явлениями природы, в которых объекты движутся со скоростью, близкой к скорости света, у нас всегда возникают затруднения. Такие явления сложно представить и описать при помощи обычного языка.

Выводы теории относительности кажутся странными лишь потому, что мы не можем воспринимать четырехмерный мир пространства-времени при помощи наших чувств, наблюдая лишь его трехмерные проекции. Трехмерные образцы выглядят поразному в разных системах координат; движущиеся предметы не похожи на покоящиеся; часы, двигаясь, замедляют свой ход. Эти выводы кажутся нам парадоксальными лишь потому, что мы не осознаем, что все эти неожиданные эффекты – лишь последствия проекций четырехмерных явлений в трехмерном мире наших чувств, подобно тому как тени – лишь проекции трехмерных предметов. Если бы мы могли увидеть, услышать – ощутить при помощи данных нам чувств четырехмерное пространство-время, парадоксы исчезли бы навсегда.

Специальная теория относительности – это не только теория движения с околосветовыми скоростями, это, по существу, новый взгляд на мир, взгляд, резко отличающийся от привычных нам классических представлений, которые хорошо ”работают” в обычной жизни.

6.3.3. Пространство и время в общей теории относительности

Что держит нас на этом шаре, кроме силы тяготения?

Е. Лец

Общая теория относительности (теория тяготения) дает еще

более глубокий анализ понятия пространства-времени, устанавливает **связь тяготения, геометрии и пространства** и приводит к *новому пониманию Вселенной*.

Гравитация в классической физике

Гравитационное взаимодействие – одно из четырех фундаментальных взаимодействий. Несмотря на универсальность, в микромире гравитационные силы ничтожны по сравнению со всеми остальными, поэтому здесь их обычно не учитывают. Но гравитация играет важную роль, когда речь идет об объектах космических масштабов. Земля – огромное тело, поэтому человек постоянно сталкивается с ее гравитацией.

Гравитация означает *тяготение, притяжение*. Источником гравитационного взаимодействия служит масса тела, которую называют *гравитационной или тяжелой массой (гравитационным зарядом)*. Гравитационное взаимодействие проявляется в виде притяжения массивных тел. Сила, с которой Земля притягивает некоторое тело, равна

$$F = GMm_g/r^2. \quad (6.10)$$

Здесь M и m_g – гравитационные массы Земли и тела, r – расстояние между центрами их масс, $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ – *гравитационная постоянная*, которую впервые измерил Кавендыш. Сила притяжения между двумя телами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Гравитационные силы являются *дальнодействующими*, т.е. они достаточно медленно уменьшаются с увеличением расстояния. Формула (6.10) есть математическое выражение *закона всемирного тяготения Ньютона*, согласно которому тела притягиваются не только к Земле, но и друг к другу с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. *Закон всемирного тяготения – фундаментальный закон природы*, он является *универсальным и всеобщим*, так как простирается на огромные расстояния и распространяется на все материальные тела. Природа этих сил долгое время оставалась нераскрытой. Ньютон, исходя из закона всемирного тяготения, рассчитал орбиты планет, на которые действует сила тяготения Солнца, и показал, что законы Кеплера также являются следствием этого закона.

Экспериментально установлено, что *все тела, независимо от их массы, химического состава и других свойств, движутся в*

гравитационном поле (в вакууме) одинаково. Например, в поле тяготения Земли все тела падают с одним и тем же ускорением g , которое легко вычислить, используя второй закон Ньютона и формулу (6.10):

$$g = (m_g/m_i)E, \quad (6.11)$$

где m_i – инертная масса тела, $E = GM/r^2$ – напряженность гравитационного поля Земли. Так как ускорение любых тел в гравитационном поле является величиной постоянной, то отношение m_g/m_i должно быть также постоянным, не зависящим от химического состава, формы тела, его размера и т.п. При соответствующем выборе системы единиц его можно сделать равным единице. Таким образом, *гравитационная масса равна инертной массе*, а ускорение свободного падения в поле тяготения Земли $g = 9.8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. Ускорение всех тел в заданном гравитационном поле одно и то же, и поэтому может считаться одной из его характеристик. Формально оно совпадает с напряженностью гравитационного поля. *Равенство инертной и гравитационной масс* или, как говорят, *эквивалентность инертной и гравитационной масс* хорошо подтверждено различными опытами с огромной точностью (до 10^{-12}). Это тоже фундаментальный закон природы.

До А. Эйнштейна, который задумался над вопросом, почему существует такая универсальная связь, этот факт считался случайным совпадением и никак не объяснялся. Анализируя эту проблему, он пришел к выводу, что *тяготение и инерция – эквивалентные явления*. Его следствие – состояние невесомости, которое возникает при свободном падении тел. Такое состояние возникает, например, на космическом корабле, который совершает полет вокруг земного шара. Хотя корабль находится в сфере действия почти таких же гравитационных сил, как и на поверхности Земли, но космонавт не ощущает их (все выглядит так, как если бы никакого тяготения вообще не было) по следующей причине. Движение космического корабля складывается из равномерного движения по горизонтали и ускоренного падения по вертикали к центру Земли. Равномерное движение, как известно, невозможно заметить. Что касается падения, то все предметы в кабине падают под действием притяжения Земли с одинаковым ускорением, т.е. если космонавт "упал" на один метр, то и кресло "ушло" из-под него ровно на один метр. Поэтому он может свободно парить над сиденьем.

А. Эйнштейна интересовал вопрос: "Нельзя ли принцип относительности распространить на неинерциальные системы?" Для описания движения в таких системах вводят некоторые фиктивные силы – *силы инерции* $\vec{F}_i = -m\vec{a}$ (\vec{a}, m – ускорение и масса тела, соответственно), чтобы можно было использовать известные законы механики, справедливые для инерциальных систем. Подчеркнем, что силы инерции обусловлены не взаимодействием, а характером движения системы отсчета. При переходе в другую неинерциальную систему они меняются. Таким образом, силы инерции – это учет неинерциальности системы отсчета.

Значит, невесомость возникает потому, что сила инерции, пропорциональная массе, точно уравновешивает силу тяжести, которая также пропорциональна массе, и поэтому человек ее не ощущает. Другими словами, гравитационные силы, проявляющиеся в системе отсчета, связанной с Землей, исчезают, если перейти в систему, движущуюся с ускорением свободного падения. С этим каждый человек постоянно сталкивается на Земле, которая движется, направляемая притяжением Солнца. Но мы этого притяжения не ощущаем. Силу тяготения можно увеличить, если перейти в ускоренно движущуюся систему отсчета (например, вращение в центрифуге или перегрузки, возникающие при запуске космических кораблей). Таким образом, можно утверждать, что *ускоренная система отсчета должна быть эквивалентна гравитационному полю*. Полный анализ этого явления дан Эйнштейном в общей теории относительности.

Различные системы геометрий

Геометрия – наука о свойствах пространства. Мы все привыкли к геометрии, которая называется евклидовой. Она построена на некоторой системе аксиом, фиксирующих основные свойства пространства. Одной из них является аксиома о параллельных прямых, которые нигде не пересекаются. Долгое время это была единственная геометрия и считалось, что она описывает реальное пространство. В XIX в. были построены другие геометрии (Лобачевский, Больяи, Гаусс, Риман). Сразу возник физический вопрос: "Какова геометрия окружающего нас мира?", так как теперь уже не было основания считать, что она обязательно евклидова. На этот вопрос можно ответить только опытным путем.

Чтобы понять суть новых геометрий, рассмотрим несколько примеров. Сделаем некоторые геометрические построения на плос-

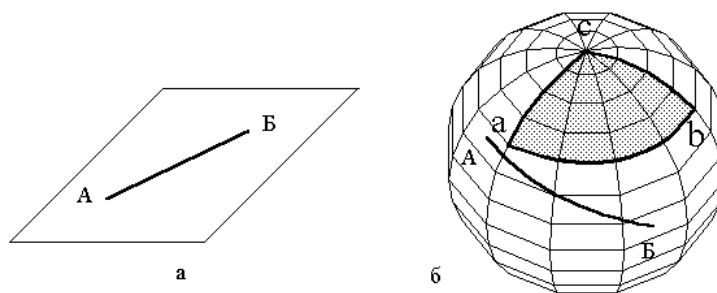


Рис. 6.2. а) Прямая линия на плоскости; б) “прямая линия” и треугольник на сфере

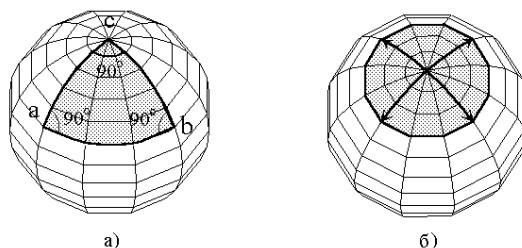


Рис. 6.3. а) На сфере треугольник может иметь три прямых угла; б) круг на сфере

кости и на поверхности шара. Отличие последней состоит в том, что она является искривленной по сравнению с плоскостью. Задача состоит в том, чтобы понять, можно ли установить, что поверхность шара искривлена, не выходя за пределы этой поверхности (в трехмерное пространство). Сначала построим прямую линию, которая есть кратчайшее расстояние между двумя точками на плоскости (рис. 6.2а) и на поверхности шара (рис. 6.2б). Результаты оказываются различными. В последнем случае прямая является дугой АБ большой окружности. Такие кратчайшие линии называют *геодезическими*.

Теперь построим треугольники. В треугольнике, который расположен на плоскости, сумма углов всегда равна 180° , тогда как на шаре эта сумма будет больше, как это видно из рис. 6.2б. В небольших треугольниках это превышение будет незначительным, но оно возрастает с увеличением размеров треугольника. Можно построить треугольник, в котором все три угла будут прямыми (рис. 6.3а). Если подсчитать отношение длины окружности к диаметру, то на шаре это число не будет равно π . Это нетрудно понять, так как диаметром на шаре будет дуга, которая всегда длиннее “настоящего” диаметра (рис. 6.3б). Такие простые примеры демонстрируют, что на поверхности шара геометрия отличается

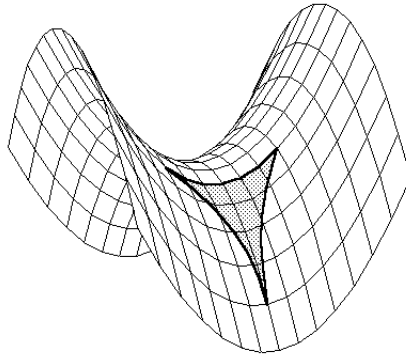


Рис. 6.4. Треугольник на гиперболической поверхности

от евклидовой, которая справедлива на плоскости. Это различие будет невелико для небольших фигур, но по мере увеличения их размеров разница будет возрастать. По отклонению от результатов евклидовой геометрии можно судить об искривлении поверхности: чем больше отклонение, тем больше искривление.

Рассмотрим гиперболическую поверхность, изображенную на рис. 6.4. Если на такой поверхности построить треугольник, то сумма его внутренних углов будет меньше 180^0 , т.е. и здесь геометрия также отличается от евклидовой. Сказанное о двумерных поверхностях можно перенести на трехмерное пространство и показать, что в искривленном трехмерном пространстве перестают действовать законы евклидовой геометрии, но наглядно такие пространства представить невозможно. Такие геометрии называют *неевклидовыми* (геометрия Лобачевского, геометрии Римана). Вплоть до создания общей теории относительности неевклидовы геометрии считались абстрактными и не имеющими никакого отношения к реальному миру. Открытие неевклидовых геометрий считается величайшим достижением человеческого разума.

Общая теория относительности и геометрия, связь пространства-времени с материей

Принцип относительности утверждает, что все инерциальные системы равноценны, а законы природы в них выглядят одинаково. Можно ли обобщить этот принцип на неинерциальные системы? Казалось бы нет, так как в них тело движется с ускорением, даже если на него не действуют силы со стороны других тел. Но всегда ли можно отличить ускорения, обусловленные силами инерции, от тех ускорений, которые вызваны физическим взаимодействием? Отличительная особенность таких "фиктивных" ускорений, свя-

занных с переходом в неинерциальные системы отсчета, состоит в том, что *все тела испытывают одинаковые ускорения*. Но все тела движутся с одинаковым ускорением и в случае однородного, т.е. постоянного по пространству, гравитационного поля.

Проанализировав такую ситуацию, А. Эйнштейн сформулировал **общий принцип эквивалентности**, суть которого состоит в следующем: *никакой локальный физический эксперимент, т.е. эксперимент, проводимый в малой части пространства, где всюду гравитационное поле можно считать одинаковым, однородным, не позволяет отличить гравитационное поле от инерции*. Или, более коротко, *тяготение в каждой точке пространства эквивалентно соответствующим образом подобранному ускорению системы отсчета*. Подчеркнем, что эквивалентность справедлива лишь *локально* – в малой части пространства. Это означает, что с учетом гравитационного поля все системы отсчета совершенно равноправны при описании локальных физических явлений. В каждой области пространства нужно вводить разные неинерциальные системы отсчета, и, таким образом, *пространство-время оказывается локально неоднородным и неизотропным*.

Этот принцип приводит к теснейшей *связи между гравитацией и геометрией*. Чтобы почувствовать, как гравитация приводит к изменению геометрии, рассмотрим мысленно следующую ситуацию (мысленный эксперимент). Предположим, что мы находимся на вращающемся с огромной скоростью диске. Наружные части диска движутся с большей скоростью, чем внутренние, и, следовательно, испытывают большее лоренцевское сокращение. Поэтому отношение длины большей окружности к длине малой окружности с центрами в середине диска не совпадает с отношением их радиусов, которые перпендикулярны движению и не сокращаются. Кроме того, часы на краях диска будут больше отставать от неподвижных часов в центре. Таким образом, на вращающемся диске геометрия оказывается неевклидовой (искривленной). Согласно принципу эквивалентности наблюдатель на диске вправе считать себя неподвижным, а на его систему действует сила тяготения, равная силе инерции. Тогда нарушение геометрии можно приписать силе тяжести. Следовательно, *геометрические свойства пространства-времени определяются физическими явлениями*, а не остаются неизменными свойствами пространства и времени.

Теория тяготения, построенная на основе теории относительности, называется общей теорией относительности и, по выражению Л. Ландау, является самой красивой из всех существующих физических теорий. Общая теория относительности описывает тяготение как воздействие материи на свойства четырехмерного пространства-времени, которые, в свою очередь, влияют на движение материи и другие физические процессы: материя искривляет пространство-время, а это искривление проявляет себя как тяготение и влияет на движение материи – в гравитационном поле пространство становится неевклидовым. В общем случае оно может изменяться и со временем. В таком пространстве движение тел по инерции происходит уже не по прямым, а по искривленным линиям и с переменной скоростью, так как пространство становится неевклидовым. Время в разных точках течет по-разному, причем чем сильнее гравитация, тем медленнее течет время. Общая теория относительности приводит к таким удивительным эффектам, как гравитационные волны, испускаемые ускоренно движущимися телами; гравитационному красному смещению – уменьшению длины волны света в сильном поле тяготения; предсказанию черных дыр и др. И, что самое главное, она привела к новым представлениям о Вселенной.

Уравнения общей теории относительности описывают связь пространства-времени с гравитационным полем или материей, при этом пространство-время оказывается искривленным гравитационным полем – неевклидовым. Поэтому *тяготение можно рассматривать как отступление от евклидовости пространства*. Так как гравитационные поля создаются всеми материальными объектами, то именно в них проявляется связь материи с пространством и временем.

Уравнения, описывающие связь между искривлением пространства и распределением материи в этом пространстве, называют *уравнениями Эйнштейна*. Из уравнений Эйнштейна для малых масс и скоростей получается закон тяготения Ньютона (т.е. *закон всемирного тяготения является приближенным*, хотя его в течение нескольких столетий считали абсолютно точным), а для больших – возникают поразительные изменения. Изменения геометрии вблизи звезды зависят от отношения массы к ее радиусу. Например, вблизи Солнца, согласно теории, возникают малые поправки, но возле нейтронной звезды, радиус которой во много раз

меньше радиуса Солнца, это уже не поправки, а значительные искажения геометрии. При помощи этих уравнений можно определить не только степень искривления пространства звезд или планет, но и выяснить, существует ли всеобщее, крупномасштабное искривление пространства, т.е. они позволяют определить структуру Вселенной как целого.

Однако нельзя считать, что тяготение есть причина искривления пространства. *Тяготение есть само искривление пространства* (между тяготением и искривлением пространства-времени нет причинно-следственных связей). Инерция и тяжесть – это две стороны одной и той же медали. *Движение тел в поле тяготения есть своеобразное движение по инерции*, но в искривленном пространстве-времени – это движение по геодезическим линиям. Как равномерное прямолинейное движение не вызывается действием сил, а представляет движение по инерции в евклидовом пространстве, так и *движение в поле тяготения* вызывается не действием гравитационных сил, приложенных к движущимся телам, а *представляет движение по инерции, но в неевклидовом пространстве*. В общей теории относительности пространство-время оказывается искривленным. Таково, например, пространство, окружающее Солнце. Кривизна этого пространства влияет на движение планет и имитирует то, что раньше называли гравитационным полем Солнца.

Если специальная теория относительности связала пространство и время в единое целое – пространственно-временной континуум, лишив их, таким образом, абсолютности, то *общая теория относительности лишила абсолютности само пространство-время*, которое оказалось ничто без материи, формой бытия которой оно является. А. Эйнштейн говорил, что раньше считали, что если каким-нибудь чудом все материальные вещи исчезли бы вдруг, то пространство и время остались бы. Согласно теории относительности вместе с вещами исчезли бы и пространство, и время. Общая теория относительности в очередной раз изменила наши представления о пространстве и времени, которые, в свою очередь, привели к совершенно новым представлениям о мире, в котором мы живем.

Теория гравитации Эйнштейна позволила объяснить ряд явлений, которые не объяснялись в рамках ньютоновой теории. Например, *движение перигелия Меркурия*. Суть этого явления состоит

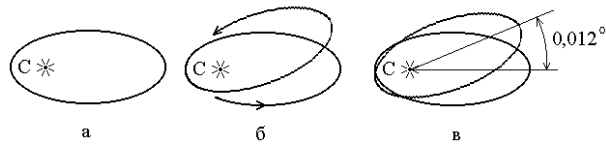


Рис. 6.5. Эллиптическая орбита планеты (а) и движение перигелия Меркурия (б,в)

в следующем. Согласно ньютоновой механике орбиты всех планет должны быть эллипсами (рис. 6.5а), положение которых в пространстве неизменно. Однако наблюдения показывают, что эти орбиты медленно поворачиваются (рис. 6.5б). Наиболее заметно это у Меркурия, ближайшей к Солнцу планете, испытывающей наибольшее гравитационное влияние. Расчет угла поворота орбиты этой планеты, основанный на общей теории относительности, дает величину 0,012 градуса (рис. 6.5в), хорошо совпадающую с измеренной величиной.

Рассмотрим некоторые следствия из общей теории относительности.

- **В гравитационном поле луч света распространяется по кривой.** Рассмотрим распространение луча света в лифте. Представим, что в отсутствие гравитации лифт покоится. Если в отверстие А в стенке лифта попадает световой луч и падает на противоположную стенку в точке Б (рис. 6.6а), то мы будем утверждать, что линия АБ – прямая. Пусть лифт движется вверх с ускорением g . За время, пока свет проходит расстояние между стенками, лифт успевает сместиться вверх, и луч света попадет уже не в точку Б, а в точку Б₁ (рис. 6.6б). Но согласно принципу эквивалентности ускоренное движение равнозначно наличию поля тяготения. Значит, в гравитационном поле луч должен двигаться по кривой. Линия АБ₁ сохраняет свойство, которым в евклидовой геометрии обладает прямая, – быть кратчайшим расстоянием между двумя точками.

Таким образом, луч света, ”пролетающий” вблизи Солнца, должен отклониться в сторону Солнца. Эффект можно наблюдать во время солнечного затмения. Отклонение от прямолинейного распространения проявляется в том, что все звезды, расположенные вблизи затененного Луной солнечного диска, визуально сместятся (отодвинутся) от Солнца. Данное явление неоднократно наблюдали. Оно очень слабое, но тем не менее наблюдаемое.

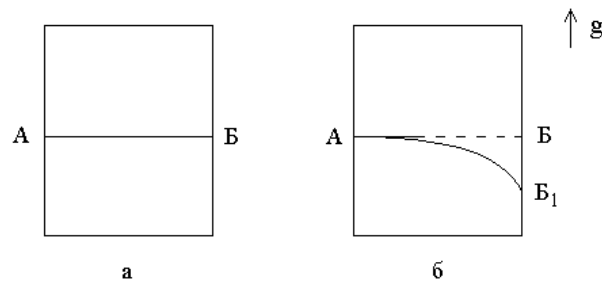


Рис. 6.6. Вид светового луча в покоящемся (а) и в движущемся (б) лифте

- Замедление хода часов в гравитационном поле (гравитационное смещение или изменение частоты фотонов).** Гравитация влияет на темп хода часов: *чем больше гравитация, тем медленнее идут часы.* Это, в свою очередь, приводит к изменению частоты световой волны, распространяющейся в гравитационном поле. Последнее можно представить так: свет, обладая массой, теряет энергию на преодоление гравитационного притяжения (аналогично тому, как для поднятия некоторого тела массой m на высоту H необходимо затратить определенную энергию). Потеря энергии означает увеличение его длины волны. Эти выводы теории гравитации подтверждены экспериментально с высокой точностью. Указанное замедление времени не следует путать с замедлением времени в специальной теории относительности. Это совершенно разные эффекты. Эффектом замедления времени в гравитационном поле объясняется парадокс близнецов.

- Гравитационные волны.** Общая теория относительности предсказывает, что должны существовать гравитационные волны, и *скорость распространения гравитации конечна и равна скорости распространения света.* Это значит, что если какое-то тело сдвинуть с места, то вызванное им искривление пространства-времени меняется не мгновенно. Сначала это скажется в непосредственной близости от тела, потом изменение будет захватывать все более далекие области и, наконец, во всем пространстве установится новое распределение кривизны, отвечающее измененному положению тела.

Теория гравитации также предсказывает, что *ускоренно движущиеся тела должны излучать гравитационные волны*, которые иногда называют *волнами переменной кривизны*. Причем они могут существовать самостоятельно. Мощность гравитационного излучения пропорциональна квадрату массы. Так как гра-

витационное взаимодействие слабое, то эти эффекты очень малы. Например, если раскачать механические колебания болванки массой 10 тонн, то мощность гравитационного излучения не превысит 10^{-20} Вт. Поэтому в лабораторных условиях их практически невозможно зарегистрировать. Однако можно воспользоваться естественными генераторами, существующими в природе. Ими могут оказаться объекты с большой массой. Такие объекты найдены – так называемые двойные звезды. При испускании гравитационных волн двойные звезды теряют энергию, расстояние между двумя звездами уменьшается, уменьшается и период обращения. Явно гравитационные волны пока еще не зарегистрированы, однако косвенные доказательства существования таких волн получены. Гравитационные волны в определенной мере подобны электромагнитным: они имеют такую же скорость распространения, переносят энергию, вызывают движение тел, лежащих на их пути. Но они имеют совершенно другую физическую природу.

6.3.4. Черные дыры

До сих пор мы рассматривали эффекты слабого гравитационного поля, которое приводит лишь к малым поправкам некоторых физических величин. Общая теория относительности предсказывает и такие эффекты, в которых искривление пространства-времени становится сильным и уже не сводится к малым поправкам в теории Ньютона. Один из таких эффектов называют *черной дырой*.

Черная дыра – это замкнутая область пространства-времени, которую ни один сигнал, в том числе и свет, не может покинуть. Граница, отделяющая эту область пространства-времени от всего остального мира, называется *горизонтом событий*: все, что происходит внутри горизонта событий, скрыто от глаз внешнего наблюдателя. Черные дыры обладают настолько сильным гравитационным полем, что даже свет не в состоянии преодолеть их гравитационное притяжение. При таких полях теория Ньютона не работает. Тем не менее она предсказывает возможность существования черных дыр.

Вспомним понятие второй космической скорости: это та скорость, которую необходимо сообщить некоторому телу, чтобы оно могло преодолеть гравитационное притяжение Земли и улететь от нее сколь угодно далеко. Для планеты Земля она составляет

примерно 11,2 км/с. Расчеты приводят к следующей связи второй космической скорости с массой и радиусом гравитирующего тела: $v_2 = \sqrt{2GM/R}$. Отсюда видно, что чем сильнее гравитационное поле (чем больше отношение M/R), тем больше вторая космическая скорость. Сравним ее со скоростью света: $v_2/c = (2GM/c^2 R)^{1/2}$. Если положить, что $R = r_g = 2GM/c^2$, получаем, что $v_2 = c$. В этом случае свет не сможет "оторваться" от гравитирующего тела. Величину r_g называют *гравитационным или шварцшильдовским радиусом*. Для Земли $M = 6 \cdot 10^{24}$ г и $r_g = 1$ см, для Солнца – $r_g = 3$ км.

Таким образом, чтобы тело массы M превратилось в черную дыру, необходимо его сжать до размеров с радиусом r_g . Область внутри сферы такого радиуса теряет связь с областью вне этой сферы, за исключением гравитационной связи. Во внешнем пространстве эта область проявляется лишь громадными силами тяготения. Все, что пролетает вблизи мимо, включая и свет, будет втягиваться внутрь сферы гравитационного радиуса и там исчезать. Поэтому такая область и называется *черной дырой*, поскольку она не видна в обычном понимании этого слова.

Черная дыра не имеет вещественной поверхности (границы). Наблюдатель, падающий в черную дыру, при пересечении ее "границы" не встретит ничего, кроме пустого пространства. Эта граница – *горизонт событий*, определяется только условием, согласно которому из внутренней области черной дыры из-за сильного тяготения не выходят наружу даже световые сигналы. Тем не менее с точки зрения наблюдателя, все время остающегося снаружи черной дыры, она во многих отношениях похожа на компактное тело, ограниченное, как иногда удобно представлять, поверхностной "мембраной" с определенными свойствами (внутри пропускает, обратно нет). Считается, что мембрана расположена как раз снаружи горизонта событий. Но это чисто условное представление, которое помогает работать нашей интуиции (такое мембранное представление черной дыры, вообще говоря, ограничено).

Известно, что гравитация приводит к замедлению времени, проявляющемся в сдвиге частоты фотонов, испускаемых источником света. Посмотрим, как изменяется темп течения времени, если приближаться к гравитационному радиусу черной дыры. Оказывается, что с точки зрения удаленного наблюдателя время вблизи r_g вообще останавливается. Предположим, что мы медленно опу-

каем на черную дыру на веревке источник света – прожектор, который излучает на определенной частоте ω_0 . Частота света ω , принимаемая наблюдателем, который расположен от черной дыры дальше, чем наш прожектор, будет меньше частоты ω_0 , измеряемой в системе отсчета прожектора. При приближении последнего к горизонту событий черной дыры частота света, измеряемая удаленным наблюдателем, стремится к нулю, т.е. испытывает бесконечное красное смещение. Если прожектору позволить падать в черную дыру, то принимаемая частота будет стремиться к нулю еще быстрее (за счет эффекта доплера).

Относительность времени, т.е. зависимость темпа хода часов от системы отсчета, проявляется вблизи черной дыры особенно ярко. Так, с точки зрения удаленного наблюдателя камень, свободно падающий на черную дыру, достигнет гравитационного радиуса за бесконечное время, тогда как по часам наблюдателя, падающего с камнем, пройдет конечный промежуток времени, прежде чем он пересечет горизонт событий.

Корабль с наблюдателем, упавший в черную дыру, никогда не сможет вернуться обратно. Он даже не сможет послать оттуда никаких сигналов, так как свет оттуда тоже не выходит. То, что происходит с ним и его кораблем внутри черной дыры, протекает уже вне времени внешнего наблюдателя. В этом смысле черные дыры представляют собой *дыры во времени Вселенной*. Но это не означает, что внутри черной дыры времени нет. Там время течет, но это "другое" время, текущее иначе, чем время внешнего наблюдателя.

Что будет с наблюдателем и его кораблем, упавшим в черную дыру? Назад он не вернется, так как сила тяготения неумолимо будет тянуть его вглубь черной дыры. Что с ним произойдет дальше? Силы тяготения будут увлекать его в область, где они становятся все сильнее и сильнее – чем ближе к центру дыры, тем тяготение будет сильнее. Поэтому точки тела, находящиеся ближе к центру, будут притягиваться сильнее, чем расположенные дальше. В результате притягиваемое тело будет растягиваться. Подобное растяжение испытывает водная оболочка Земли – ее океаны, которые притягиваются Луной. Так возникают приливы, а эти *силы* называют *приливными*. В начале падения наблюдателя в черную дыру его приливное растяжение может быть ничтожным, но оно будет нарастать в ходе падения. Теория показывает, что любое тело, попав в черную дыру, окажется в области, где

приливные силы становятся бесконечными (*сингулярность внутри черной дыры*). Здесь любое тело будет разорвано на части, перестав существовать как целое. Это означает, что в сингулярности время как бы перестает существовать, так как оно зависит от протекающих процессов.

Теория утверждает, что в сингулярности свойства времени изменяются настолько сильно, что его непрерывный поток обрывается, оно распадается на кванты. Но так как в теории относительности время и пространство едины, то в сингулярности на кванты распадается и единое пространство-время. Точной теории этого явления пока нет. Но оценки приводят к чудовищно малым величинам квантов времени, называемых *планкееонами*: $\tau = 10^{-43}$ с, пространственные размеры этих квантов $l = \tau \cdot c = 10^{-33}$ см. Вообразить такие масштабы мы не в состоянии. По-видимому, меньших промежутков времени, чем указанные, не существует.

Итак, в центре черной дыры имеет место сингулярность, где время распадается на дискретные кванты, а с приближением к ней понятия "раньше" и "позже" полностью теряют смысл, и, возможно, оказывается бессмысленным вопрос, что будет после сингулярности?

В сингулярности свойства времени сильно изменяются, приобретая квантовые черты. Образно можно сказать, что река времени дробится на неделимые далее капли... Но нельзя считать, что сингулярность – это граница времени, за которой существование материи происходит вне времени. Здесь пространственно-временные формы существования материи приобретают совсем особенный характер, а многие привычные понятия становятся даже бессмысленными. Однако это пока гипотезы, поскольку о характере законов природы на таких масштабах пока только догадываются. Это теоретические выводы, которые опираются на всю современную физику. Но не исключено, что с дальнейшим развитием физики они могут претерпеть изменения.

Черная дыра искривляет ход лучей света тем сильнее, чем ближе эти лучи к гравитационному радиусу. Причем это искривление может быть таким сильным, что луч может начать двигаться по окружности или начать двигаться по спирали, падая в черную дыру. В лабораторных условиях организовать черную дыру в настоящее время не представляется возможным. Возникает вопрос: "А существуют ли такие явления в природе, во Вселенной, в кос-

мосе?”

Оказывается, что черные дыры принадлежат к числу объектов, которые активно исследуются современной астрофизикой и служат иллюстрацией действия теории относительности. Такое может иметь место на заключительных этапах жизни звезд, когда в них выгорает ядерное топливо. Хорошо известно, что звезды светятся из-за их разогрева за счет ядерных реакций, идущих в ее недрах. Это не позволяет им сжиматься под действием гравитации. Однако, когда падает давление и температура в центральной части звезды, она под действием собственного притяжения начинает сжиматься. Если масса звезды меньше массы Солнца, то в результате сжатия она превращается в *белого карлика* – небольшую звезду с плотностью около тысячи тонн в 1 см^3 . Если ее масса превосходит полторы солнечных массы, то сжатие продолжается дальше. Звезда теряет устойчивость, взрываются остатки ядерного горючего, сохранившиеся в поверхностных слоях, со звезды срывается ее внешняя оболочка. Происходит явление, называемое *вспышкой Сверхновой*.

Если же масса сжимающейся звезды превосходит солнечную в 2–3 раза и более, то согласно теории тяготения даже при огромной плотности спрессованного вещества, достигающей плотности атомного ядра, упругость прижатых тел не может остановить катастрофического сжатия. Происходит, как говорят, *гравитационный коллапс*. В процессе сжатия напряженность поля тяготения на поверхности коллапсирующего тела растет, и наступает момент, когда вторая космическая скорость оказывается равной скорости света. Пространство сколлапсированного объекта как бы ”схлопывается”, и для внешнего наблюдателя он перестает существовать. Это и есть черная дыра. Так как при коллапсе масса звезды не меняется, то сохраняется ее статическое гравитационное поле. И хотя сколлапсированная звезда как бы исчезает из нашего мира, в действительности она продолжает взаимодействовать с окружающими объектами своим полем тяготения. Астрономические расчеты показывают, что в нашей Галактике примерно 30% звезд обладают массами достаточно большими, чтобы их существование закончилось гравитационным коллапсом. Подсчитано, что в нашей Галактике черных дыр не меньше миллиарда. Их можно считать останками ”умерших” звезд. Можно сравнить черные дыры с ”захоронениями” некогда светящегося звездного вещества.

Существует возможность возникновения черной дыры незвездного происхождения.

Как обнаружить черную дыру? Они не испускают излучения и, кроме того, находятся столь далеко от нас и столь малы, что не стоит и пытаться искать их в виде черных пятен на небе, в которых не видно звезд. Отклонение света черными дырами тоже малоперспективно. Все, что остается наблюдаемым от черной дыры, так это ее гравитационное поле. Если по какой-либо причине гравитационное поле вокруг черной дыры меняется, например, на нее падает звезда, то в пространстве должны распространяться гравитационные волны, которые можно пытаться зарегистрировать.

Гравитационное поле черной дыры также может воздействовать на ее окружение: газ, пыль или соседние звезды. Существует несколько возможностей. Например, в некоторой двойной системе, один из компонентов которой – обычная, хорошо наблюдаемая звезда, второй – черная дыра. Наблюдая за движением видимой звезды, мы, в принципе, можем определить массу невидимого компонента, о котором ничего не знаем, а только подозреваем его в "чернодырочности". Если ее масса окажется больше некоторой критической, необходимой для существования черной дыры, это будет служить доказательством, что невидимый компонент есть черная дыра, так как ни белый карлик, ни нейтронная звезда такой массой обладать не могут.

Имеется другая возможность. Если межзвездный газ падает под действием гравитации на черную дыру, он будет нагреваться и излучать энергию. Поэтому искать черную дыру следует в двойных системах. Эволюция этих звезд отличается от эволюции одиночных звезд, что обусловлено перетеканием значительных масс вещества от одной звезды на другую под действием тяготения.

В настоящее время черные дыры еще не наблюдали. Но уже имеются подозрения и качественные доказательства, где их искать. В заключение интересно отметить, что еще в 1795 г. П. Лаплас написал, что если бы диаметр светящейся звезды с той же плотностью, что и Земля, в 250 раз превосходил диаметр Солнца, то вследствие притяжения звезды ни один из испущенных ею лучей не смог бы дойти до нас; следовательно, не исключено, что самые большие из светящихся тел по этой причине являются невидимыми. Таким образом, за 120 лет до создания общей теории относительности Лаплас предвосхитил возможность существова-

ния черных дыр. Еще раньше об этом писал священник Митчел (1783 г.).

6.4. Симметрия пространства и времени

Мы уже отмечали, что симметрия относится не только к предметам, но и ко всем физическим явлениям и законам. Оказывается, что *физические законы инвариантны*, т.е. неизменны, *относительно перемещений и поворотов в пространстве*. Это обусловлено свойствами симметрии пространства.

Пространство *непрерывно и однородно*. Непрерывность пространства означает, что оно является сплошным, и разрывы в нем отсутствуют. Однородность пространства заключается в *физической равнозначности* всех его точек или в том, что законы природы не зависят от выбора места, они всюду одинаковы. Однородность отражает свойство симметрии пространства, называемое *симметрией по отношению к переносам (сдвигам) в пространстве*. Закон сохранения импульса есть следствие однородности пространства. Таким образом, перемещения в пространстве недостаточно для изменения состояния системы – это может произойти только в результате взаимодействия с другими системами.

В пространстве также нет и *физически выделенных направлений* – пространство *изотропно*, т.е. его свойства не зависят от направления. Закон сохранения момента импульса есть следствие изотропности пространства. Изотропность отражает симметрию пространства по отношению к поворотам в пространстве – поворот системы в пространстве не изменяет ее свойств.

Однородно не только пространство, но и *время*. Все физические процессы идут одинаково, когда бы они не начались. Это отражает как равномерность хода времени, так и то, что относительная скорость всех процессов в природе одинакова. Значит, *законы природы со временем не меняются, т.е. симметричны по отношению к переносу (сдвигу) во времени*. Если бы этой симметрии не было, то одна и та же причина в разное время приводила бы к разным следствиям. Эта симметрия отражает однородность времени, т.е. все моменты времени физически равноправны, равнозначны и любой из них может быть выбран в качестве начала отсчета. Отсюда следует, что течение времени само по себе не может вызывать изменение физических состояний системы. Показано, что закон сохранения энергии есть следствие однородности времени.

Таким образом, однородность пространства и времени и изотропность пространства выражают фундаментальные свойства природы и связаны с важнейшими законами физики – законами сохранения. Законы сохранения, выведенные из принципов симметрии, имеют большую область применимости тех или иных законов движения. Поэтому данные законы сохранения считают *универсальными и всеобщими*. Заметим, что без симметрии по отношению к переносам в пространстве и времени нельзя было бы говорить о существовании каких-либо законов природы.

Изотропно ли время? Изотропия времени, в силу его одномерности, означала бы равноправие двух взаимно противоположных направлений на оси времени. Это один из важнейших вопросов, который постоянно находится в поле зрения физики. На сегодня полной ясности здесь нет. В обычной жизни мы привыкли, что время течет в одну сторону – от прошлого к будущему, а обратное направление невозможно, т.е. два противоположных направления на оси времени вроде бы неравноправны. Это называют *стрелой времени*. Но при переходе на более глубокий уровень исследования, в микромир, дело обстоит несколько сложнее. *На уровне микромира прямое и обратное направления течения времени равноправны* в том смысле, что все фундаментальные законы обладают свойством *временной инвариантности*, а именно – обращение времени (изменение знака времени на противоположный), не изменяет вида уравнений движения. Это означает, что для любого возможного движения системы может осуществляться обратное во времени движение, когда система последовательно проходит в обратном порядке состояния, проходимые в ”прямом” движении. В классической механике уравнения движения также не меняют свой вид при замене знака времени на обратный.

В фундаментальных законах, от классической физики до теории относительности и квантовой физики, время не содержит различия между прошлым и будущим, т.е. фундаментальные физические законы симметричны по времени. Это позволяет многим утверждать, что время обратимо и, если посмотреть назад по времени, мы увидим то же, что и впереди (но в обратном порядке).

Однако хорошо известно, что в обычной жизни есть неизбежный процесс старения и не существует процесса омоложения, т.е. *в макромире время течет в одну сторону в том смысле, что все процессы идут только в одном направлении – от прошлого к*

будущему. Поэтому во всех явлениях, с которыми нам приходится иметь дело, будь то явления из области макроскопической физики, химии, биологии, геологии или истории, будущее и прошлое играют разные роли. Статистическая физика объясняет этот парадокс тем, что все процессы текут в одном направлении – от неравновесного состояния к равновесному. Однонаправленность времени имеет не абсолютный, а статистический характер, т.е. возможны случайные отклонения от нее. В связи с этим говорят, что существует *стрела времени*. Это один из трех основных парадоксов современной физики и естествознания – *парадокс времени*. В настоящее время на этот вопрос нет однозначного ответа, и для многих физиков ныне это вопрос веры. В последние десятилетия появились новые подходы к решению указанной проблемы, которые свидетельствуют о существовании стрелы времени, но окончательного однозначного ответа еще нет.

Принцип относительности есть симметрия по отношению к переходу из одной инерциальной системы отсчета в другую. Эта симметрия составляет сущность специальной теории относительности, установившей физическую равнозначность, равноправность всех инерциальных систем отсчета. Доказано, что преобразования Лоренца можно рассматривать как поворот в четырехмерном пространственно-временном континууме. Эта симметрия представляет обобщение симметрии по отношению к поворотам в обычном пространстве.

Подчеркнем, что *полная однородность свойственна лишь абстрактному евклидову пространству и является идеализацией*. Реальное пространство материальных систем неоднородно, оно искривлено в зависимости от распределения тяготеющих масс. С увеличением скорости движения тел и в мощных гравитационных полях происходит замедление всех процессов в телах, их собственное время как бы сокращается по отношению ко времени внешних систем, поэтому, строго говоря, во Вселенной отсутствует единое время, как и единое пространство, т.е. в мире существуют области с локальным ходом времени, который отличается от мирового.

Принципиально новый подход к таким фундаментальным понятиям, как пространство и время, масса и энергия, гравитация, не означает, что теория относительности перечеркивает классическую физику и разрушает стройное здание евклидовой геометрии. В явлениях, с которыми мы встречаемся ежедневно, релятивист-

ские эффекты практически не проявляются, а законы классической физики действуют безупречно. Даже в области пространства, занимаемого всей Солнечной системой, теория гравитации Эйнштейна дает очень малые отклонения от законов Ньютона. Но когда речь идет о масштабах мегамира, охватывающего большие звездные системы или объекты огромных масс, сосредоточенных в малом объеме, учет релятивистских эффектов становится просто необходимым.

Основные понятия и термины, которые необходимо знать:

близкодействие, взаимодействие, волна, далекодействие, движение, дифракция, интерференция, континуум, материя, поле, система, частица, черная дыра, физический вакуум, элементарная частица.

Контрольные вопросы

1. Какие виды материи различают в современной физике?
2. Правильно ли высказывание, что тела состоят из материи?
3. Какие представления о веществе и поле были выработаны в рамках классической физики?
4. В чем сущность идеи атомизма?
5. В чем сущность полевой концепции?
6. Опишите образы и свойства частицы и волны.
7. Назовите свойства пространства и времени в классической физике.
8. Сформулируйте принципы, положенные в основу специальной теории относительности, и основные следствия.
9. Что такое одновременность и как синхронизируют часы в специальной теории относительности?
10. Что означает выражение: время и длина относительны?
11. В чем состоит парадокс близнецов? Является ли он парадоксом?
12. Что понимают под стрелой времени и существует ли она?
13. Что означает однородность пространства и времени?
14. Сформулируйте свойства симметрии пространства.
15. Сформулируйте свойства пространства и времени в специальной теории относительности.
16. Как "работает" гравитация в классической физике?
17. В чем сущность принципа эквивалентности.
18. В чем состоит сущность связи геометрии и гравитации?
19. Опишите свойства пространства-времени в общей теории относительности.

20. Каковы следствия общей теории относительности?
21. Что такое черные дыры и как их можно наблюдать?

Литература: [21, 22, 24, 32, 34, 36, 39, 41, 42, 63].

Дополнительная литература: [1, 3, 4, 5, 7, 8, 16, 19, 62].