также известным закономерностям отражения и преломления света. В самом деле, отраженная телом и преломленная волны являются результатом интерференции вторичных волн, испускаемых движущимися электронами, которые имеются в теле. Если же в соответствии с гипотезой Ритца скорости вторичных волн зависят от движения электронов, то эти волны должны быть некогерентными и не могут интерферировать.

8. Для объяснения результата опыта Майкельсона Д. Фитцджеральд (1891) и независимо от него Г. Лоренц (1892) высказали гипотезу о том, что в результате движения линейный размер тела в направлении движения должен изменяться в $\sqrt{1-\beta^2}$ раз. Поэтому по отношению к эфиру длина горизонтального плеча интерферометра в опыте Майкельсона равна не l, а $l\sqrt{1-\beta^2}$. Следовательно, значение t_1 также должно отличаться от выражения (9.9) множителем $\sqrt{1-\beta^2}$:

$$t_1=\frac{2lc\sqrt{1-\beta^2}}{c^2-V^2}=\frac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

так что $t_1-t_2=0$ и никакого смещения интерференционных полос в опыте Майкельсона не должно быть. В этом случае интерференционный эффект, обусловленный движением Земли, полностью компенсируется эффектом сокращения размеров.

Гипотеза сокращения Лоренца — Фитцджеральда позволила согласовать электродинамику Лоренца с безуспешными попытками обнаружить в опыте Майкельсона и ряде других опытов, которые мы не рассматриваем здесь, эффекты второго порядка, обусловленные движением Земли относительно эфира. Однако сама эта гипотеза была крайне искусственной и чуждой всей теории Лоренца.

§ 9.3. Постулаты специальной теории относительности. Преобразование Лоренца

1. Принципиально новый подход к электродинамике движущихся тел был предложен основоположником теории относительности Эйнштейном (1905). Проанализировав огромный экспериментальный материал, Эйнштейн выбрал два наиболее бесспорных положения и построил на их основе свою теорию. Эти положения называются **постулатами специальной теории относительности.** Они формулируются следующим образом:

1) *в любых инерциальных системах отсчета все физические явления* (механические, электромагнитные и др.) *при одних и тех же условиях протекают одинаково*; иначе говоря, *с помощью любых опытов, проведенных в замкнутой системе тел, нельзя обнаружить, покоится эта система или движется равномерно и прямолинейно* [1];

2) *скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света*; она одинакова во всех направлениях и во всех инер-

[1] Как всегда, подразумевается движение относительно какой-нибудь инерциальной системы отсчета, например системы «неподвижных звезд».

циальных системах отсчета, т. е. представляет собой универсальную постоянную.

Первый постулат Эйнштейна выражает **принцип относительности**, являющийся обобщением механического принципа относительности Галилея на любые физические процессы. Его справедливость подтверждается тем, что все разнообразные опыты, ставившиеся с целью обнаружить влияние орбитального движения Земли на закономерности электромагнитных явлений, постоянно приводили к отрицательному результату. Второй постулат также безусловно подтверждается всеми экспериментами.

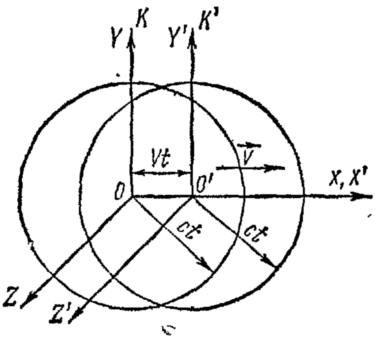

Рис. 9.5

Формулируя свои постулаты, Эйнштейн полностью отказался от эфира. Весь ход дальнейшего развития физики убедительно доказал правоту Эйнштейна. Электромагнитное поле само является особой формой материи и не нуждается в «придумывании» для него материального носителя — эфира.

2. На первый взгляд кажется, что постулаты Эйнштейна взаимно противоречивы. В самом деле, рассмотрим находящиеся в вакууме неподвижную инерциальную систему отсчета K (x, y, z) (рис. 9.5) и систему отсчета K' (x', y', z'), движущуюся равномерно и прямолинейно вдоль оси OX со скоростью $\mathbf{V}$. Пусть в начальный момент времени $t=0$, когда точки O и O' совпадали, в точке O была произведена световая вспышка. К моменту $t>0$ световое возмущение, распространяясь с одинаковой скоростью c по всем направлениям, достигает в неподвижной системе отсчета K всех точек сферы с центром в точке O и радиусом $r=ct$. Однако с таким же правом можно считать, что вспышка была сделана в точке O' в тот момент, когда она проходила через точку O. При этом световое возмущение распространяется относительно системы отсчета K' точно так же, поскольку, по второму постулату Эйнштейна, скорость света не должна зависеть от скорости $\mathbf{V}$ движения источника света — точки O'. По первому постулату Эйнштейна, в движущейся системе отсчета K' свет должен распространяться так же, как и в неподвижной. Следовательно, к моменту времени t возмущение, обусловленное вспышкой в точке O', должно достигнуть точек сферы с тем же радиусом ct. Однако центр этой сферы все время должен совпадать с точкой O', которая к моменту времени t удалится от O на расстояние Vt. Очевидно, что этот результат противоречит здравому смыслу, так как независимо от выбора системы отсчета световое возмущение должно к моменту времени t достигать вполне определенных точек пространства, которые не могут одновременно находиться на двух различных сферах. Именно это противоречие заставило В. Ритца усомниться в справедливости второго постулата Эйнштейна и высказать взамен него баллистическую гипотезу, о которой уже говорилось в § 9.2.

3. Величайшая заслуга Эйнштейна состоит в том, что он сумел найти причину кажущейся противоречивости предложенных им постулатов и устранить ее. Для этого Эйнштейну пришлось подвергнуть радикальному пересмотру общепринятые и считавшиеся «само собою разумеющимися» представления о свойствах пространства и времени. Эйнштейн показал, что в рассмотренном выше примере противоречие возникает не из-за применения постулатов теории относительности, а вследствие использования пространственно-временны́х соотношений, выражаемых преобразованием Галилея (9.1). На этом вопросе, лежащем в основе всей теории относительности, нужно остановиться подробнее.

Основополагающими понятиями всей физики служат понятия длины и времени. Для того чтобы этими понятиями можно было пользоваться, необходимо указать способы однозначного измерения расстояний и промежутков времени. Измерение длины какого-нибудь тела (например, стержня) производится путем ее сравнения с длиной эталонного тела, которая, по определению, считается равной одному метру (само собой разумеется, что при этом должны быть точно оговорены внешние условия — значения температуры, давления и т. д.). В качестве такого эталонного тела можно использовать, например, масштабную линейку, которая, таким образом, является необходимой принадлежностью всякой системы отсчета. Указанный способ измерения легко осуществить, прикладывая линейку к изучаемому стержню, если последний неподвижен относительно системы отсчета K и ее масштабной линейки. А как определить длину того же самого стержня, если он движется относительно системы вместе с системой K' (рис. 9.5)? Во-первых, длину стержня можно измерить указанным выше способом, пользуясь такой же масштабной линейкой, движущейся вместе с системой K' и являющейся эталоном длины в этой системе. Легко видеть, что при этом длина стержня l'_0 должна получиться такой же, как и при измерении ее в первом случае (l_0), когда стержень покоился относительно системы отсчета K. В самом де́ле, пусть $l'_0 \neq l_0$, например $l'_0 > l_0$. Можем теперь принять, что система K' покоится, а система K движется относительно нее со скоростью $-\mathbf{V}$. Тогда длина l_0 стержня, неподвижного относительно движущейся системы K, должна была бы быть больше l'_0, что противоречит сделанному выше допущению. Следовательно, $l'_0 = l_0$.

Длину стержня, движущегося вместе с системой K', можно также измерить с помощью масштабной линейки, находящейся в неподвижной системе K (ради простоты предполагается, что стержень расположен вдоль оси $O'X'$). Для этого, очевидно, нужно измерить расстояние l между двумя точками оси OX, с которыми совпадают концы движущегося стержня в произвольный, но один и тот же момент времени. Обозначим координаты этих точек через x_1 и x_2, тогда $l = x_2 - x_1$. В движущейся системе координаты концов стержня пусть равны x'_1 и x'_2, причем $x'_2 - x'_1 = l_0$, так как в системе отсчета K' стержень неподвижен.

Возникает вопрос: будет ли $l = l_0$? Иначе говоря, будут ли совпадать результаты измерений длины одного и того же стержня, когда он покоится относительно масштабной линейки и когда движется относительно нее? «Да, так должно быть»,— отвечали все до Эйнштейна. Это утверждение считалось настолько очевидным, что никто даже не пытался его проверять. Оно нашло свое выражение в преобразовании Галилея (9.1), из которого следует, что $l=l_0$, так как $x_2'-x_1'=x_2-x_1$.

Эйнштейн впервые ответил на этот вопрос иначе — равны l и l_0 или нет, должен показать опыт, до опыта (a priori) ничего по этому поводу сказать нельзя. Однако мы уже знаем, что для объяснения опыта Майкельсона Лоренцу и Фитцджеральду пришлось ввести гипотезу сокращения, согласно которой $l<l_0$: $l=l_0\sqrt{1-\beta^2}$.

4. Для измерения времени также необходим эталон, в качестве которого используется какой-либо реальный периодический процесс (например, движение Земли вокруг Солнца, качание маятника, движение стрелки часов и т. п.). Всякое измерение времени тесно связано с понятием одновременности двух событий [1]. Действительно, что означает утверждение: в 12 часов движущаяся материальная точка находилась в некоторой точке A пространства? Оно означает, что прохождение материальной точки через точку A пространства и прохождение стрелки эталонных часов через деление их шкалы, соответствующее, по определению, 12 часам, происходят одновременно.

Эйнштейн впервые обратил внимание на то, что в классической физике еще с времен Ньютона господствует убеждение о существовании некоего абсолютного времени, которое, по выражению Ньютона, «течет одинаково, безотносительно к чему-либо внешнему». Ньютон писал: «Длительность, или возраст, существования вещей остается одним и тем же независимо от того, быстры движения или медленны, или их нет вообще...» Иначе говоря, все вслед за Ньютоном были убеждены в том, что такие понятия, как «одновременность двух событий», «раньше» или «позже», являются априорными, т. е. ясными сами собой, безотносительно к какому-либо эксперименту.

Величайшая заслуга Эйнштейна заключается в том, что он отверг это заблуждение. Он впервые показал, что понятие одновременности вовсе не самоочевидно и, так же как и понятие длины, нуждается в четком определении, основанном на реальном физическом процессе, с помощью которого можно было бы проверить, одновременны или нет рассматриваемые события. Действительно, мы легко и однозначно можем установить одновременность двух событий по их совпадению, если они происходят в одном и том же месте. Однако, вообще говоря, совершенно не ясно, каким образом можно с помощью часов, находящихся в точке A, обнаружить одновременность или неодновременность двух событий, одно из которых происходит в точке A, а другое — в удаленной от нее точке B.

---

[1] Выше мы уже пользовались этим понятием, не уточняя его смысла, когда говорили об измерении длины движущегося стержня с помощью неподвижной масштабной линейки.

5. Важность решения этого вопроса для физики можно проиллюстрировать на следующем примере. Для экспериментального измерения скорости распространения некоторого сигнала, посылаемого из точки A в точку B, необходимо знать промежуток времени Δt между моментами отправления и прихода этого сигнала. Измерение Δt можно произвести с помощью двух одинаковых часов, одни из которых находятся в точке A, а вторые, после сверки синхронности их хода с ходом первых часов, перевезены из точки A в точку B. Пусть сигнал отправляется из A в момент времени t_1 (по первым часам) и приходит в B в момент времени t_2 (по вторым часам). Тогда, казалось бы, скорость сигнала $v=\frac{L}{t_2-t_1}$, где L — расстояние между точками A и B. Однако это было бы так на самом деле, если бы мы могли с уверенностью сказать, что после перевозки в точку B вторые часы продолжают идти синхронно с первыми часами, т. е. в момент отправления сигнала из точки A также показывают время t_1 и идут одинаково быстро с часами в точке A. Одинаково ли быстро идут эти часы, можно проверить на опыте, например посылая из A сигналы через определенные равные промежутки времени по первым часам и регистрируя по вторым часам промежутки времени между моментами прихода сигналов в точку B. Проверить же одинаковость показаний часов можно только с помощью сигнала, который распространялся бы из A в B мгновенно. Однако таких сигналов в природе не существует. Следовательно, говорит Эйнштейн, вопрос о синхронности часов в точках A и B, т. е. об одновременности прохождения стрелок этих часов через сходственные деления их шкал, можно решить только путем однозначного соглашения (определения) о том, когда следует считать эти часы синхронными.

За основу такого определения Эйнштейн берет реальный физический процесс — распространение света в вакууме. Пусть по часам в точке A световой сигнал отправляется в момент времени t_1 и после отражения в точке B возвращается в A в момент времени t_2. Тогда, по определению, *часы в точке B синхронны с часами в точке A, если они идут одинаково быстро и в момент прихода сигнала в точку B установленные в ней часы показывают время* $t=(t_1+t_2)/2$.

Выбор светового сигнала в вакууме в качестве реального физического процесса для синхронизации часов сделан Эйнштейном не случайно. Во-первых, как показывают опыты, скорость любого другого сигнала [1] не может превосходить скорости c света в вакууме. Во-вторых, согласно постулатам теории относительности, величина c одинакова во всех направлениях и во всех инерциальных системах отсчета.

Определение, данное Эйнштейном, устанавливает однозначный и, что особенно важно, практически осуществимый способ синхронизации часов, находящихся в различных точках пространства и перемещающихся вместе с рассматриваемой си-

[1] Под словом «сигнал» мы всюду понимаем любой физический процесс, способный оказывать какое-либо воздействие на встречающиеся на его пути препятствия.

стемой отсчета. Тем самым осуществляется **хронометризация системы отсчета,** т. е. в ней каждому событию соответствует вполне определенный момент времени [1] t независимо от места расположения той точки, в которой это событие происходит.

До Эйнштейна все были убеждены в том, что промежуток времени между одними и теми же двумя событиями не зависит от выбора системы отсчета. Это нашло, в частности, свое отражение в преобразовании Галилея для времени: $t'=t$, из которого следует, что

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t_2' - t_1' = \Delta t',$$

где t_i и t_i' — моменты времени совершения первого (t_1 и t_1') и второго (t_2 и t_2') событий, измеренные в неподвижной и движущейся инерциальных системах отсчета. Если $\Delta t=\Delta t'$, то два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчета ($\Delta t=0$), должны быть одновременными во всех других инерциальных системах отсчета ($\Delta t'=0$), т. е. одновременность абсолютна. В дальнейшем мы увидим, что в теории относительности одновременность двух событий, происходящих в разных точках пространства, относительна: события, одновременные в одной инерциальной системе отсчета, вовсе не одновременны в других инерциальных системах, движущихся относительно первой.

6. Эйнштейн показал, что в соответствии с двумя постулатами теории относительности связь между координатами и временем в двух инерциальных системах отсчета K и K', изображенных на рис. 9.1 и 9.5, выражается не преобразованием Галилея (9.1), а более сложным образом:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{9.10}$$

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{9.10'}$$

где $\beta=V/c$. Эти соотношения называются **преобразованием Лоренца.**

Формулы (9.10) можно получить следующим образом. Пусть в начальный момент времени $t=0$ из точки O неподвижной системы отсчета K (см. рис. 9.1) испускается весьма короткий (точечный) световой сигнал. В системе отсчета K координаты x, y, z точек, до которых дойдет сигнал к моменту времени t, удовлетворяют условию

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2. \tag{9.11}$$

В момент $t=0$ начало O' подвижной системы отсчета K' совпадает с точкой O. Часы в системе K' целесообразно установить так, чтобы в этот момент времени $t'=0$. Из постулатов теории относительности следует, что в системе отсчета K' закон распространения светового сигнала имеет вид, аналогичный (9.11), т. е. к моменту времени t' сигнал достигнет точек, координаты которых x', y', z' удовлетворяют условию

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2. \tag{9.11'}$$

---

[1] Значение t, конечно, всегда определяется с точностью до постоянного слагаемого, зависящего от выбора момента начала отсчета времени.

Таким образом, согласно постулатам специальной теории относительности координаты и время в системах отсчета K и K' должны удовлетворять соотношению

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=x^2+y^2+z^2-c^2t^2. \tag{9.12}$$

Преобразования координат и времени при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой должны быть л и н е й н ы м и, так как только такие соотношения не противоречат полному равноправию любых двух инерциальных систем отсчета, каждую из которых с равным правом можно принять за неподвижную.

Оси $O'Y'$ и $O'Z'$, а также попарно параллельные им оси OY и OZ лежат в плоскостях, перпендикулярных вектору $\mathbf{V}$ скорости движения подвижной системы K', т. е. ориентированы по отношению к $\mathbf{V}$ совершенно одинаково. Поэтому ясно, что связь между координатами y' и y должна быть такой же, как между z' и z. Иными словами, искомые преобразования имеют такой вид:

$$x'=\alpha_1x+\beta_1t, \quad y'=\alpha_2y+\beta_2t, \quad z'=\alpha_2z+\beta_2t, \quad t'=\alpha_3x+\beta_3t, \tag{9.13}$$

где α_1, α_2, α_3, β_1, β_2, β_3— постоянные коэффициенты, значения которых нужно определить.

Запишем координаты точки O' в системах отсчета K' и K:

$$x'_{O'}=y'_{O'}=z'_{O'}=0, \quad x_{O'}=Vt, \quad y_{O'}=z_{O'}=0. \tag{9.14}$$

Подставив эти значения в (9.13), получим $\alpha_1Vt+\beta_1t=0$ и $\beta_2t=0$, т. е.

$$\beta_1=-\alpha_1V \text{ и } \beta_2=0. \tag{9.15}$$

Следовательно, соотношения (9.13) можно переписать в виде

$$x'=\alpha_1(x-Vt), \quad y'=\alpha_2y, \quad z'=\alpha_2z, \quad t'=\alpha_3x+\beta_3t. \tag{9.16}$$

Для определения значения коэффициента α_2 воспользуемся условием полного равноправия систем отсчета K и K'. В частности, это условие означает, что размер l эталона длины $l'_0=1$ в системе K', измеренный из системы K, должен быть равен размеру l' эталона длины $l_0=1$ в системе K, измеренному из системы K'. Из второго уравнения (9.16) следует, что расстояния между двумя точками, лежащими на прямой, параллельной осям OY и $O'Y'$, измеренные в системах K' и K, связаны соотношением

$$\Delta y'=\alpha_2\Delta y.$$

Поэтому если эталоны длины расположены вдоль осей OY и OY', то при $\Delta y'=l'_0=1$ $\Delta y=l$, а при $\Delta y=l_0=1$ $\Delta y'=l'$, причем

$$l=1/\alpha_2 \text{ и } l'=\alpha_2.$$

Таким образом, равенство l и l' возможно только при условии

$$\alpha_2^2=1, \text{ или } \alpha_2=1^1. \tag{9.17}$$

Значения коэффициентов α_1, α_3 и β_3 найдем, подставляя выражения (9.16) для x', y', z' и t' в (9.12) и учитывая, что $\alpha_2=1$:

$$\alpha_1^2(x-Vt)^2-c^2(\alpha_3x+\beta_3t)^2=x^2-c^2t^2,$$

или

$$(\alpha_1^2-c^2\alpha_3^2)x^2-2(V\alpha_1^2+c^2\alpha_3\beta_3)xt-(c^2\beta_3^2-V^2\alpha_1^2)t^2=x^2-c^2t^2.$$

Это равенство должно выполняться тождественно, т. е. при любых значениях x и t. Поэтому

$$\alpha_1^2-c^2\alpha_3^2=1, \quad V\alpha_1^2+c^2\alpha_3\beta_3=0, \quad c^2\beta_3^2-V^2\alpha_1^2=c^2. \tag{9.18}$$

[1] Возможно также значение $\alpha_2=-1$. Однако оно в отличие от $\alpha_2=1$ означает только, что $y'=-y$ и $z'=-z$, т. е. что оси $O'Y'$ и $O'Z'$ антипараллельны осям OY и OZ.

Из первого и третьего уравнений (9.18) следует, что

$$\beta_3^2=1+\frac{V^2}{c^2}\alpha_1^2=1+V^2\alpha_3^2+\frac{V^2}{c^2}. \qquad (9.18')$$

Соответственно из первого и второго уравнений (9.18) имеем

$$\beta_3=-V\left(\alpha_3+\frac{1}{c^2\alpha_3}\right). \qquad (9.18'')$$

Подставим это значение β_3 в (9.18'):

$$V^2\left(\alpha_3+\frac{1}{c^2\alpha_3}\right)^2=1+V^2\alpha_3^2+\frac{V^2}{c^2}.$$

После преобразования получим $\alpha_3^2=\frac{V^2}{c^2(c^2-V^2)}$, *откуда*[1]

$$\alpha_3=-\frac{V/c^2}{\sqrt{1-V^2/c^2}} \qquad (9.19)$$

и, согласно (9.18''),

$$\beta_3=\frac{1}{\sqrt{1-V^2/c^2}}. \qquad (9.19')$$

Наконец, из первого уравнения (9.18) следует, что

$$\alpha_1^2=1+c^2\alpha_3^2=\frac{1}{1-V^2/c^2},$$

откуда[2]

$$\alpha_1=\frac{1}{\sqrt{1-V^2/c^2}}. \qquad (9.20)$$

Подставив выражения (9.17), (9.19), (9.19') и (9.20) для α_2, α_3, β_3 и α_1 в (9.16), получим преобразование Лоренца (9.10). Формулы (9.10') получаются из (9.10) путем несложных алгебраических преобразований.

Легко видеть, что при $V \ll c$ (строго говоря, при $c \to \infty$) формулы (9.10) совпадают с формулами преобразования Галилея (9.1). Таким образом, классическая механика, базирующаяся на преобразовании Галилея, пригодна лишь для рассмотрения движений тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме. В общем случае нужно пользоваться так называемой **релятивистской механикой**, основанной на постулатах теории относительности и вытекающем из них преобразовании Лоренца для координат и времени.

---

[1] Значение $\alpha_3=+\frac{V/c^2}{\sqrt{1-V^2/c^2}}$ не годится, так как при этом $\beta_3=-\frac{1}{\sqrt{1-V^2/c^2}}<0$ и возрастанию времени t в системе отсчета K соответствует убывание времени t' в системе отсчета K'.

[2] Значение $\alpha_1=-\frac{1}{\sqrt{1-V^2/c^2}}$ относится к случаю, когда оси координат OX и $O'X'$ направлены не в одну и ту же, а во взаимно противоположные стороны.