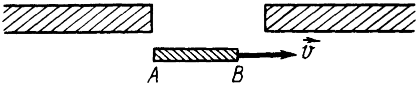

Рис. 69.3

в отличие от формулы сокращения Фицджеральда соотношение (69.2) имеет относительный, обратимый характер.

Действительно, если связать с телом систему Σ, а длину его измерять в системе Σ', то надо считать $l_0 = x_2 - x_1$ и

$$l = x_2' - x_1', \quad t_2' = t_1'. \tag{69.3}$$

Теперь уже для нахождения связи между l и l_0 нужно использовать не формулы (68.4), а аналогичные соотношения, вытекающие из обратных преобразований Лоренца (67.19):

$$x_2 - x_1 = \gamma\left[(x_2' - x_1') + v(t_2' - t_1')\right], t_2 - t_1 = \gamma\left[(t_2' - t_1') + v(x_2' - x_1')/c^2\right]. \tag{69.4}$$

Полагая, согласно (69.3), в первой из этих формул $t_2' = t_1'$, получаем $x_2 - x_1 = \gamma(x_2' - x_1')$, т. е. опять $l = l_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Таким образом, *при измерении длины движущегося тела всегда обнаруживается его сокращение.* В то же время по формуле Фицджеральда (64.1) тело сокращается лишь в том случае, когда оно наблюдается из системы отсчета, связанной с неподвижным эфиром; если же тело покоится относительно эфира, то из движущейся системы отсчета оно должно представляться удлиненным. Итак, в эфирной теории эффект сокращения абсолютен, тогда как в теории относительности он относителен и обусловлен относительностью одновременности пространственно-разобщенных событий.

Задача 69.1. *Стержень собственной длины l_0 движется вдоль оси X неподвижной системы отсчета Σ со скоростью u. Каким будет результат измерения его длины l' в системе Σ', движущейся относительно Σ со скоростью v?*

Задача 69.2. *Стержень AB собственной длины l_0 скользит со скоростью v вдоль стенки, имеющей отверстие той же ширины l_0* (рис. 69.3). *В тот момент, когда стержень поравнялся с отверстием, он получает извне некоторый импульс по направлению к стенке и проходит через отверстие. Как будет выглядеть этот процесс в системе отсчета Σ', движущейся вдоль стенки со скоростью v*?*

Задача 69.3. *Два электрона помещены в постоянное электрическое поле* **E** *плоского конденсатора. В момент времени $t=0$ электроны неподвижны и расстояние между ними равно l. Каково расстояние между электронами в момент, когда они приобретут скорость v?*

§ 70. ИЗМЕНЕНИЕ ХОДА ДВИЖУЩИХСЯ ЧАСОВ

Для измерения хода часов C', движущихся со скоростью v относительно неподвижной системы отсчета Σ, свяжем с ними систему отсчета Σ' и сравним их показания с показаниями синхронизованных часов C_1 и C_2, помещенных соответственно в точках x_1 и x_2 системы Σ. Сравнение будем производить в те моменты, когда часы C' проходят через данные

---

* Стержень считать безынерционным и неупругим.

точки (рис. 70.1). Пусть в эти моменты показания часов C_1 и C_2 равны соответственно t_1 и t_2, а показания часов C' — t'_1 и t'_2. Вводя соответствующие промежутки времени* $\tau_0 = t'_2 - t'_1$ и $\tau = t_2 - t_1$ и замечая, что в системе Σ' положение часов C' не изменяется, т. е. $x'_2 = x'_1$, из (69.4) выводим $t_2 - t_1 = \gamma(t'_2 - t'_1)$, или

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (70.1)$$

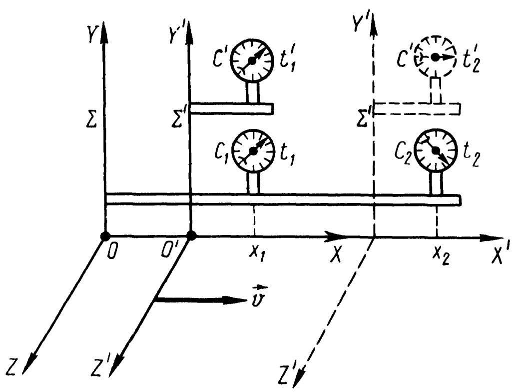

Рис. 70.1

Таким образом, промежуток времени, отмечаемый движущимися часами, оказывается меньшим, т. е. ход часов замедляется. Это означает, что в неподвижной системе отсчета все процессы в движущихся объектах протекают замедленно. Вследствие равноправия систем Σ и Σ' этот эффект должен быть обратимым, т. е. не только ход часов C' замедляется по отношению к ходу часов C системы Σ, но и, наоборот, наблюдение в системе Σ' должно показать замедление хода часов C по отношению к ходу часов C'. Непротиворечивость этого утверждения можно пояснить следующим образом.

При измерении хода часов C системы Σ из движущейся системы Σ' мы должны иметь в Σ' двое часов C'_1 и C'_2, расположенных в некоторых точках x'_1 и x'_2, и сравнивать их показания с показаниями часов C в те моменты, когда положения последних суть x'_1 и x'_2 (рис. 70.2). Так как эта процедура не отличается от предыдущей, проделанной в системе Σ, то не удивительно, что получается тот же результат, что и в (70.1). Как видно, все вновь сводится к относительности одновременности пространственно-разобщенных событий: совпадающие показания часов C'_1 и C'_2 не будут таковыми в системе Σ, и, наоборот, совпадающие показания часов C_1 и C_2 оказываются различными в движущейся системе отсчета Σ'. Обратимый характер соотношения (70.1) наглядно иллюстрируется следующими задачами.

Задача 70.1. *Часы движутся вдоль оси X системы Σ со скоростью u. Каков их ход при измерении в системе Σ', движущейся относительно Σ со скоростью v?*

Задача 70.2. *Выберем в качестве модели часов цилиндрическую полость высоты l с отражающими стенками, между которыми циркулирует световой импульс. Период колебаний для этих часов, очевидно, равен $\tau = 2l/c$. Показать, что если часы движутся со скоростью v* (рис. 70.3), *то период колебаний вследствие изменения формы полости станет равным $\tau' = \gamma 2l/c$.*

---

* τ_0 обычно называется *собственным временем* подвижной системы отсчета.

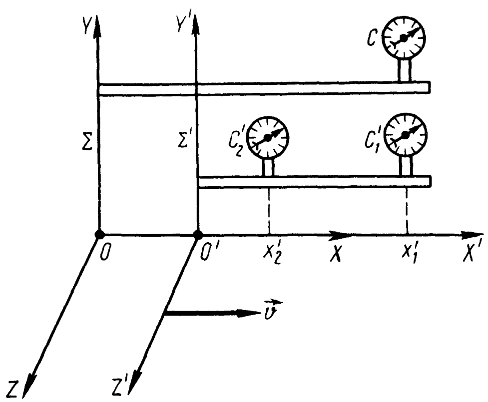

Рис 70 2

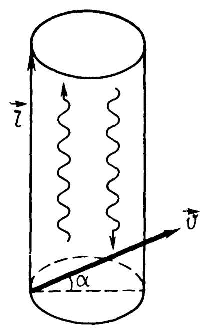

Рис 70 3

Как мы убедились, эффект замедления хода движущихся часов можно получить из эффекта сокращения движущихся масштабов, и поэтому относительный, обратимый характер обоих эффектов обусловлен одной и той же причиной — относительностью одновременности пространственно разобщенных событий.

Формула (70.1) впервые была экспериментально проверена при исследовании космического излучения. В верхних слоях атмосферы оно представляет собой в основном быстрые протоны. При их торможении происходит интенсивное рождение более легких заряженных частиц, в частности электронов e^-, позитронов e^+ и μ^+-мезонов (мюонов). Последние нестабильны и распадаются по закону

$$\mu^{\pm} \to e^{\pm} + \nu + \bar{\nu},$$

переходя в пару нейтрино-антинейтрино $\nu\bar{\nu}$ и электрон (позитрон). Период полураспада для медленных мюонов составляет примерно $\tau_0 = 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с. За это время мюоны, даже если бы они двигались со скоростью света, сумели бы проникнуть в атмосферу лишь на глубину $l = c\tau_0 \approx 0{,}66$ км, т. е. не достигли бы поверхности Земли. На самом же деле интенсивный поток быстрых мюонов обнаруживается и вблизи Земли, что говорит об увеличении времени жизни быстрых мюонов по сравнению с медленными.

Замедление времени, выражаемое формулой (70.1), повседневно проверяется при измерениях времен жизни нестабильных элементарных частиц, порождаемых в экспериментах с высокоэнергичными частицами, получаемыми на ускорителях.

§ 71. ПАРАДОКС ЧАСОВ

В § 70 мы установили, что эффект замедления хода часов, равномерно движущихся относительно системы отсчета наблюдателя, сам по себе еще не является парадоксальным, так как объясняется относительностью одновременности пространственно разобщенных со-