*1959 г. Сентябрь* **Т. LXIX, вып. 1**

*УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК*

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

### ОТ РЕДАКЦИИ

*В последнее время, после запуска искусственных спутников Земли, сильно повысился интерес к различным вопросам, связанным с космическими понятиями. В частности, вновь начал широко обсуждаться так называемый «парадокс часов» в теории относительности и возможность «путешествия во времени». Именно в этой связи редакция помещает статью М. Борна и статью К. Лефферта и Т. Донайе. Кроме того, после этих статей приводится список вышедших в последние годы работ и заметок, в которых обсуждается тот же круг вопросов. Более раннюю литературу на эту тему указывать вряд ли целесообразно. Отметим лишь, что впервые вопрос о путешествии во времени поставлен в основной работе Эйнштейна по частной теории относительности (Ann. d. Phys.* **17**, *891, 1905; см. также сборник «Принцип относительности», ОНТИ, 1935) и затем обсуждался Ланжевеном, Лауэ и Лоренцом (ссылки на эти работы см. в книге В. Паули «Теория относительности», § 5, Гостехиздат, 1947).*

# КОСМИЧЕСКИЕ ПУТЕШЕСТВИЯ И ПАРАДОКС ЧАСОВ *)

***Макс Борн***

Люди, свéдущие в космических полетах — я назову в первую очередь Е. Зенгера — смотрят на космические полеты со скоростями, приближающимися к скорости света, как на технически осуществимую проблему; для такого ускорения следует применять отдачу фотонов (световое давление). Зенгер подчеркивал, что любая точка космоса может быть достигнута в течение человеческой жизни, причем, возвращаясь на землю, путешественник, возможно, застанет грядущие поколения. Вот уже с год, как в английском журнале «Nature» развернулись дебаты, возбужденные высказываниями такого рода. Речь идет о развитии во времени процессов в очень быстро движущихся системах, и прежде всего о так называемом парадоксе часов Эйнштейна, согласно которому часы, покоящиеся в инерциальной системе, идут быстрее, чем механически им подобные движущиеся часы, совершающие замкнутое движение. Дингль, нападая на эйнштейновские и все связанные с ними соображения, утверждал, что этот результат противоречит смыслу теории относительности. В. Мак-Кри и другие авторы возражали ему, однако им не удалось убедить Дингля

*) M. B o r n, Ein Besuch bei den Raumfahren und das Uhrenparadoxen, Phys. Bl. **14**, 207 (1957). Перевод А. А. Рухадзе.

в том, что он не прав. Я был приглашен принять участие в диспуте и воспользовался случаем, чтобы вместе с Бимом просмотреть литературу. Мы нашли полную и удовлетворительную трактовку парадокса часов в книге Меллера*), но так как интересующие нас вопросы разбросаны, читать эту книгу неудобно. Поэтому мы полностью, но сжато изложили проблему**).

## 1. ПАРАДОКС ЧАСОВ

Качественно вопрос может быть изложен в нескольких строках. Согласно специальной теории относительности часы, движущиеся в системе $(x, y, z, t)$, показывают в собственной системе отсчета время $\tau$, определенное соотношением

$$c^2\,d\tau^2 = c^2\,dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2). \tag{1a}$$

Так как $|d\tau| < |dt|$, за исключением случая $dx = dy = dz = 0$, то общее время движения по замкнутому пути в собственной системе $\int_{t_1}^{t_2} d\tau$ меньше, чем время, измеренное покоящимся наблюдателем $A$. Итак, «путешественник» $B$ при возвращении окажется моложе, чем «домосед» $A$. В этом нет ничего удивительного, так как в физике известно большое количество величин, зависящих от пути. Собственное время относится именно к таким величинам и вместе с ним все непрерывные механические, атомарные, биологические процессы.

Кажущийся парадокс появляется в том случае, если это явление интерпретировать с точки зрения общей теории относительности. При этом прежний «путешественник» $B$ имеет право рассматривать себя находящимся в покое, а прежнего «домоседа» $A$ — движущимся. В таком случае «путешественник» $A$ должен возвратиться более молодым, чем «домосед» $B$, что противоречит полученному перед этим результату. Это — старый вопрос, который Дингль снова поднял. В действительности нет никакого парадокса. В самом деле, если перейти к системе координат, в которой $B$ покоится, то собственное время уже будет определяться не формулой (1a), а формулой $ic\,d\tau = dS$, где $dS$ — элемент длины, квадрат которого равен

$$dS^2 = g_{\mu\nu}\,dx^\mu\,dx^\nu \tag{1b}$$

$(x^1, x^2, x^3 = x, y, z;\ x^4 = ict)$; метрический тензор $g_{\mu\nu}$ определяется гравитационным полем, которое возникает вследствие того, что связанная с $B$ система отсчета не инерциальна.

В случае, когда относительная скорость мала по сравнению со скоростью света, простые, наглядные соображения Эйнштейна позволяют количественно оценить разность хода часов. При этом достаточно воспользоваться лишь элементарным следствием эйнштейновского принципа, а именно тем, что часы, которые находятся в постоянном гравитационном поле $g$ и которые удалены от других часов на расстоянии $\xi$ в направлении градиента поля, уходят вперед по сравнению с ними на время $\left(\frac{g\xi}{c^2}t\right)$.

Пусть $A$ покоится в точке $O$ в инерциальной системе координат, $B$ движется с постоянной скоростью $v$ вдоль оси $x$ от точки $O$ к точке, расположенной на расстоянии $\xi$, поворачивает обратно в момент времени $t_0$ (в инерциальной системе), причем для поворота требуется время $\delta t \ll t_0$, и возвращается в точку $O$ с постоянной скоростью $v$ к моменту времени $2t_0$.

*) Х. Меллер, Теория относительности, Оксфорд, 1952.

**) M. Born, W. Biem, Proc. Koninkl. nederl. akad. Wet., 61, 110 (1958).

Тогда по формуле сокращения времени

$$t_A = t_B \Big/ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cong t_B \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} + \ldots\right). \tag{2}$$

Соотношение (2) показывает, что собственное время $t_B$ меньше времени $2t_0$ движения, измеренного в инерциальной системе, на величину $\frac{v^2}{c^2} t_0$.

Если, наоборот, рассматривать $B$ покоящимся, то те же соображения, примененные к двум главным отрезкам пути, пройденным $A$ с постоянной скоростью $\pm v$, приводят к тому, что собственное время $t_A$ оказывается на величину $\frac{v^2}{c^2} t_0$ меньше собственного времени $t_B$, что противоречит предыдущему результату. Однако следует заметить, что связанная с $B$ система отсчета не инерциальна. Она совпадает только в течение основного времени движения (туда и обратно) с двумя инерциальными системами отсчета. В течение отрезка времени, когда существует ускорение, в системе $B$ появляются гравитационные поля. В начале и в конце пути $A$ и $B$ находятся практически в одном и том же месте пространства и поэтому присутствующие там гравитационные поля не влияют на относительный ход часов. Для определения разности хода часов следует принимать во внимание время действия ускорения $\delta t$ при повороте. При этом из-за индуцированного гравитационного поля, которое в течение короткого промежутка времени $\delta t$ можно приближенно считать постоянным в пространстве, возникает разница в показаниях часов $A$ и $B$, равная $(g\xi/c^2)\,\delta t$. Легко показать, что эта разность в два раза больше отставания часов $A$ от часов $B$, которое происходит из-за сокращения времени. Так как изменение скорости $A$ по отношению к $B$ за время поворота $\delta t$ равно $2v$, ускорение равно $g = \frac{2v}{\delta t}$. Расстояние между часами в момент поворота равно $\xi = vt_0$. Следовательно,

$$(g\xi/c^2)\,\delta t = 2\frac{v^2}{c^2} t_0, \tag{3}$$

как и утверждалось. Вычитая из (3) эффект сокращения времени, находим в системе наблюдателя $B$ ту же разность показаний часов, что и в инерциальной системе $A$.

Эти соображения были отвергнуты Динглем по причинам, которые отчасти основаны на недоразумениях, связанных со смыслом эквивалентности относительно ускоряющихся систем (Дингль утверждал, что инерциальные системы физически не должны выделяться среди других систем отсчета, так как это противоречило бы постулату относительности. Это недоразумение показывает силу влияния слов «теория относительности». Следовало бы вместо этих слов говорить, согласно предложению Фоккера, о хроногеометрии), отчасти на том возражении, что сделанные выше упрощающие предположения, $v/c \ll 1$ и $\delta t/t_0 \ll 1$, незаконны.

Чтобы опровергнуть эти возражения Дингля, Бим и я написали вышеназванную работу. Результат работы оправдывает приведенные выше элементарные соображения и является их обобщением на произвольные скорости и ускорения.

## 2. УПРОЩЕННОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ (РАССМОТРЕНИЕ)

Хотя предыдущие соображения достаточно просты для физика, я все же обдумывал, нельзя ли пояснить эффект изменения времени более элементарным путем. Речь идет прежде всего об обычном сокращении времени, так как влияние ускорения можно учесть впоследствии из общих соображений. Кроме того, следовало бы, кажется, исходить из преобразований Лоренца. При этом результат можно получить в несколько строк, но и это все еще сложно. Находясь в таком состоянии, я очень обрадовался, найдя статью Г. Бонди *) под названием «Юность космических путешественников», который сделал именно то, что я искал. Эта работа является настолько привлекательной, что я ее изложу в краткой форме.

В работе рассматривается одномерное движение и используются $(xt)$ диаграммы. Пусть $A_1$ и $A_2$— два наблюдателя, покоящиеся в инерциальной системе отсчета; их мировые линии являются двумя параллельными

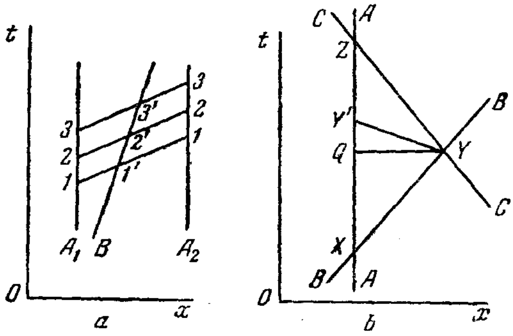


Рис. 1. $(xt)$-диаграмма движения.

прямыми (рис. 1*а*). Оба имеют физически одинаковые часы. Испускаемые наблюдателем $A_1$ световые сигналы через равные промежутки времени $t$ будут приниматься наблюдателем $A_2$ тоже через равные промежутки времени $t'$.

Пусть наблюдатель $B$ движется между $A_1$ и $A_2$ в направлении от $A_1$ к $A_2$ со скоростью $v$ меньшей, чем скорость света $c$. Наблюдатель $B$ несет часы, физически идентичные с часами наблюдателей $A_1$ и $A_2$. Излученные $A_1$ в моменты времени 1, 2, 3... (по часам $A_1$) световые сигналы достигают наблюдателя $B$ соответственно в моменты времени $1', 2', 3'...$ (по часам $B$). Из-за доплер-эффекта (который является опытным фактом) интервал $t'$ по часам $B$ не будет равен соответствующему интервалу $t$ по часам $A$, а

$$t' = kt, \tag{4}$$

где $k$ — функция относительной скорости $v$, причем $k > 1$.

Согласно принципу относительности можно рассматривать $B$ покоящимся, а $A_1$ и $A_2$— движущимся. Если $B$ излучает световые сигналы точно в моменты $1'$, $2'$, $3'$ ..., соответствующие моментам прихода сигналов из $A_1$ в $B$, то сигналы, посылаемые наблюдателем $B$ в направлении $A_2$, будут идентичны сигналам, посылаемым непосредственно из $A_1$ в $A_2$. Таким образом, имеет место то же самое соотношение $t'=kt$, которое теперь следует читать $t=t'/k$. Это означает, что доплеровский эффект при сближении обратен доплеровскому эффекту при удалении.

После этой небольшой подготовки Бонди не сразу переходит к рассмотрению ускоренного движения $B$, а заменяет его, следуя Хальсбери, равномерным движением (рис. 1,*б*). Наблюдатель $A$ покоится в инерциальной системе. Движущийся с постоянной скоростью $v$ в этой системе наблюдатель $B$ встречается с наблюдателем $A$ в точке $X$ мировой линии $A$; в этот момент оба они сверяют свои часы. Третий наблюдатель $C$ движется тоже с постоянной скоростью $-v$ в инерциальной системе $A$ и встречается с наб-

*) H. Bondi, Discovery, 18, 505 (1957). Здесь же помещена забавная статья Г. Гудхарта «О биологическом времени».

людателем $B$ в точке $Y$ мировой линии $B$, и затем с $A$ в точке $Z$ мировой линии $A$. Проекция $Q$ точки $Y$ на мировую линию $A$ делит отрезок $XZ$ на две равные части.

В момент встречи $Y$ наблюдателей $B$ и $C$ испускается световой сигнал, который доходит до мировой линии $A$ в момент $Y'$. Очевидно, что

$$XQ = QZ = t_0; \quad QY = vt_0; \quad QY' = \frac{QY}{c} = \frac{v}{c}\, t_0,$$

а также

$$\left.\begin{aligned} XY' &= t_0\left(1 + \frac{v}{c}\right); \\ Y'Z &= t_0\left(1 - \frac{v}{c}\right). \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

С другой стороны, $XY'$ и $Y'Z$ являются теми отрезками мировой линии $A$, которые принимают световые сигналы, испущенные на мировой линии $B$ между моментами $X$ и $Y$ или на мировой линии $C$ между моментами $Y$ и $Z$. Пусть $t_1$ — интервал времени, измеренный наблюдателем $B$ при движении между точками $X$ и $Y$, который из-за симметрии равен интервалу времени, измеренному наблюдателем $C$ при движении между точками $Y$ и $Z$. Так как в первом случае имеем взаимное удаление наблюдателей $B$ и $A$, а во втором взаимное сближение наблюдателей $C$ и $A$, то в соответствии со сказанным выше

$$XY' = kt_1; \quad Y'Z = \frac{1}{k}\, t_1. \tag{6}$$

Сравнивая соотношения (5) и (6), имеем

$$\left.\begin{aligned} kt_1 &= \left(1 + \frac{v}{c}\right) t_0, \\ \frac{1}{k}\, t_1 &= \left(1 - \frac{v}{c}\right) t_0. \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Разделив первое соотношение (7) на второе, получаем

$$k^2 = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \Big/ \left(1 - \frac{v}{c}\right) = \frac{\left(1 + \frac{v}{c}\right)^2}{1 - v^2/c^2}, \tag{8}$$

или

$$k = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \Big/ \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Это известная релятивистская формула эффекта Доплера, подтвержденная экспериментом.

С другой стороны, умножая соотношения (7) друг на друга и извлекая корень, получаем известную формулу сокращения времени:

$$t_1 = t_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}. \tag{9}$$

Переход от модели Хальсбери к действительному ускоренному движению одного тела (наблюдателя) от точки $X$ через $Y$ к точке $Z$, естественно, следует производить путем сглаживания угла поворота. При этом можно произвольно увеличивать отрезки $XZ$, $XY$, $YZ$, не меняя характер сглаживания угла поворота. Это приводит к тому, что относительное время ускорения в инерциальной системе координат можно сколь угодно уменьшить. Естественно, следует также уменьшить абсолютную величину ускорения, так как только в этом случае (при небольшом ускорении) механизм, используемый в качестве часов, может работать. Если часы уронить на пол, из-за большого ускорения они превратятся в бесполезный кусок металла.

Конкретный пример эффекта разности хода часов можно рассчитать с помощью простой пифагоровой тройки чисел: $5^2+12^2=13^2$, т. е. $25+$ $+144=169$. Полагая $\frac{v}{c}=\frac{12}{13}$, имеем $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=\frac{5}{13}$.

Если $t_0$ исчислять в годах, то наибольшее достигаемое удаление наблюдателя $B$ от наблюдателя $A$ в световых годах есть $\frac{v}{c}\cdot t_0$. Чтобы достигнуть Сириус (6 световых лет), понадобится время $t_0={}^{13}/_2$ лет, так как $\frac{v}{c}t_0=$ $=\frac{12}{13}\cdot\frac{13}{2}=6$. За время путешествия на Сириус и обратно наблюдатель $A$ постареет на 13 лет, в то время как $B$ — всего на 5 лет.