

Э.Ф. Тейлор

Физика пространства-времени

**Москва
«Книга по Требованию»**

Э1 **Э.Ф. Тейлор**
Физика пространства-времени / Э.Ф. Тейлор – М.: Книга по Требованию, 2023. – 317 с.

ISBN 978-5-458-33807-3

Предлагаемая вниманию читателей книга — учебник по частной теории относительности для студентов-физиков младших курсов и школьников старших классов, написанный в том новом стиле, который, получив заслуженное признание, успешно пробивает себе дорогу в современных вузах и, будем надеяться, в скором времени завоюет также среднюю школу. Эта книга — учебник для начинающих физиков, а так как идеи теории относительности стали в наши дни краеугольным камнем общечеловеческой культуры, это и учебник для всех молодых людей, интересующихся естественными науками. Он написан просто и скрупулезно строго: его авторы — крупные физики и отличные педагоги. Особенно хорошо известно имя Джона Арчибалда Уилера, «старожила» Принстона, одного из патриархов ядерной физики. Того самого Уилера, который вместе с Нильсом Бором является автором знаменитой теории деления атомных ядер, открывшей эпоху технических приложений ядерной энергии; ядерщика, «на старости лет» (да простит мне эти слова Уилер, который всегда остается молодым) переключившегося на гравитацию. Именно участие Уилера в создании этой книги наложило на нее отпечаток специфической деловитости и вместе с тем непринужденности, наглядного и творческого в своей основе подхода к самым сокровенным и глубоким «тайнам» теории относительности. Профессор Эдвин Ф. Тейлор известен больше как педагог. Следует сказать, однако, что и Уилер много внимания уделил преподаванию, и его ученики добились больших успехов: достаточно назвать Ричарда П. Фейнмана, лауреата Нобелевской премии по физике.

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

то можно с уверенностью утверждать, что и электромагнитное, и гравитационное, и все другие физические поля — это разные конкретные виды материи. Заметим при этом, что сведение всего к полям — программа привлекательная, но, увы, по сей день она остается лишь программой.

Стремясь избавиться от динамической трактовки явлений, авторы призывают отказаться от термина «гравитационное поле», вводя вместо него «приливное поле», и тут же поясняют, что оба термина — синонимы. Трудно ожидать, что этот новый термин привьется, так как его преимущества сомнительны даже в чисто методическом отношении. Главное в их аргументации — факт отсутствия «гравитационной силы» в локально инерциальной системе отсчета. Если наш читатель в дальнейшем познакомится с общей теорией относительности детальнее (например, по отличной стандартной книге Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица «Теория поля», изд-во «Наука», 1967), то он заметит, что на пробную частицу, конечно, вообще не действует никакая *ковариантная* (т. е. в данном случае 4-векторная) гравитационная сила. Однако достаточно взять две пробные массы, столь малые, чтобы их взаимодействием можно было пренебречь, и тогда «разность» этих, «равных нулю», гравитационных векторных сил, действующих со стороны на наши частицы, окажется *отличной от нуля*, если в данной четырехмерной области пространство-время искривлено, т. е. если здесь объективно присутствует гравитация. Читателю предлагается поразмыслить над тем, насколько эта ситуация (эффект девиации геодезических) напоминает приведенную в книге притчу о двух путешественниках.

Однако есть (очень немногие) пункты, касающиеся и частной теории относительности, когда авторы оказываются в плену традиционных не вполне точных представлений. Таков вопрос о соотношении между преобразованием Галилея и преобразованием Лоренца. Эти преобразования действительно отличаются друг от друга не только по форме записи; различие между ними сводится к тому, что второе из них относится к классу ортогональных преобразований, первое же — нет, если рассматривать его с 4-мерной точки зрения. Теория относительности доказывает *не безусловную непригодность* преобразования Галилея при больших скоростях, а несостоятельность подхода к нему как к 3-мерному преобразованию. Если же последовательно учитывать, что преобразование Галилея есть 4-мерное преобразование координат пространства-времени, то отсюда автоматически следует лишь недекартов характер системы координат, к которой оно приводит (вспомним, например, недекартовы координаты в случаях сферической или полярной систем, сравнительно простые ввиду своей ортогональности и 3-мерности).

Как показал Мёллер в своей книге (С. Мёллер, *The Theory of Relativity*, Oxford, 1952), единственным отличием системы координат, к которой приводит преобразование Галилея, от декартовой (получаемой при преобразовании Лоренца) является *неортогональность оси времени к пространственным осям*, причем здесь применим стандартный метод ортогонализации, и тогда в совокупности преобразование Галилея и преобразование, ортогонализирующее все 4 координатные оси, автоматически дает обычное преобразование Лоренца! Это преобразование ортогонализации уже не затрагивает системы отсчета, так что преобразования Галилея и Лоренца физически эквивалентны. И можно без труда показать, что первое приводит в точности к тем же релятивистским эффектам, к каким приводит второе. Все дело в том, что не всякое координатное время тождественно физическому (наблюдаемому) времени, и физическим является только то время, которое ортогонально пространственным измерениям. Итак, в ряде случаев переход к физическому времени в теории сводится к стандартным математическим вычислениям, и его можно совершить, используя так называемый формализм хронометрических инвариантов Зельманова [А. Л. Зельманов, Доклады АН СССР, 107, 815 (1956)].

Кстати сказать, этот формализм позволяет исследовать уже в рамках частной теории относительности физические эффекты в неинерциальных системах отсчета, вопреки широко распространенному противоположному взгляду, разделяемому, очевидно, и авторами этой книги. Но в монографии В. А. Фока «Теория пространства, времени и тяготения» (Физматгиз, 1961) частная теория относительности уже была сформулирована в произвольных (в том числе ускоренно движущихся) системах координат и, следовательно, в неинерциальных системах отсчета. Если теперь к подходу Фока добавить аппарат формализма Зельманова, то мы непосредственно придем к связи между математическим выражением теории в неинерциальных системах отсчета и физическими наблюдаемыми величинами, так что синтез этих двух формулировок дает все эффекты неинерциальных систем наряду с обычными «инерциальными» релятивистскими эффектами. Однако детальное изложение вопроса требует более мощного математического аппарата, чем используемый в книге Тейлора и Уилера, и мы не будем здесь касаться его подробнее, отсылая читателя к нашей книге «Физические поля в общей теории относительности» («Наука», 1969), где наряду с другими вопросами излагаются основы формализма Зельманова и некоторые его применения.

Тем не менее факт применимости частной теории относительности к описанию неинерциальных систем отсчета не следует понимать как *полное приравнивание* неинерциальных систем к инерциальным. Следует помнить, что в неинерциальных системах отсчета физические законы специфически видоизменяются. Этот факт играет определяющую роль при переходе к общей теории относительности, где инерциальную систему отсчета можно вводить лишь локально (*неглобальность* инерциальных систем в присутствии истинной гравитации, т. е. искривления пространства-времени).

Если это предисловие прочтет начинающий физик, студент или школьник (правда, предисловиям редко выпадает такая честь), пусть он не думает, что переводчик решил подавить его своей ученостью. Мои цели совсем иные. Я не сомневаюсь, что яркая, оригинальная книга Тейлора и Уилера произведет большое впечатление, вдохновляющее молодого читателя на изучение физики; надеюсь, что она и после прочтения много лет не будет сдана им в макулатуру. Иными словами, пусть читатель возвращается к этому учебнику вновь и вновь; может быть, прочтя тогда сделанные в предисловии замечания, он задумается над путями развития теории относительности и — кто знает? — возможно, из-под его пера выйдет еще более совершенный учебник. А пока для него главное — читать эту книгу и систематически решать упражнения.

* * *

Второе издание книги дополнено ответами на упражнения, присланными авторами. Читателя, таким образом, ожидает искушение сразу заглянуть в эти ответы, не утруждая себя решением упражнений. Если он пойдет на это — тем хуже для него. Напротив, уже решив упражнение, полезно посмотреть ответ и сравнить свой метод решения с предлагаемым авторами.

В этом издании мы добавили новую задачу, по духу близкую к составленным самими авторами и касающуюся одного визуально наблюдаемого эффекта, где наряду с обычной релятивистской кинематикой важную роль играют законы распространения света (задача № 54а).

Редакция и переводчик благодарят авторов книги за любезную присылку ответов на упражнения.

Н. Мицкевич

1.

ГЕОМЕТРИЯ ПРОСТРАНСТВА- ВРЕМЕНИ

1. ПРИТЧА О ЗЕМЛЕМЕРАХ

Жили-были в тридевятом царстве два племени — дневное и ночное, и правил ими король. Королевские земли для нужд дневного племени мерил дневной землемер. Направления на север и на восток он определял по магнитной стрелке компаса. Работая, он откладывал к востоку от центра столичной площади расстояния в метрах (x в метрах), а расстояния в северном направлении, которые считались священными, он измерял в других единицах — милях (y в милях). Он делал свое дело аккуратно и добросовестно, так что люди его племени часто пользовались записями своего землемера.

*Дневной землемер ориентировался
на магнитный северный полюс*

Люди ночного племени пользовались услугами другого землемера, который определял направления на север и на восток по Полярной звезде. И этот землемер отсчитывал расстояния к востоку от центра столичной площади в метрах (x' в метрах), а священные расстояния к северу — в милях (y' в милях). Он тоже делал свое дело аккуратно и добросовестно. Все углы земельных участков характеризовались в его реестре значениями двух координат: x' и y' .

*Ночной землемер ориентировался
на Полярную звезду*

Однако настал день, когда в землемерном училище появился студент, лишенный предрассудков. Вопреки установившейся традиции он стал посещать занятия, которые вели и дневной, и ночной землемеры — главы обоих соперничающих направлений. Первый из них научил нашего студента на дневных занятиях, как определять положение городских ворот и углов земельных участков по своему методу. На ночных занятиях студент изучил метод другого землемера. Шли дни и ночи, и наш студент все больше задумывался над тем, как привести в разумное соответствие оба эти метода определения местоположения объектов. Он произвел сравнение данных о поло-

Таблица 1. Две разные системы данных, характеризующие одну и ту же точку

Точка (место)	Данные, взятые относительно координатных осей дневного землемера, ориентированных по магнитному компасу (x в метрах, y в милях)		Данные, взятые относительно координатных осей ночного землемера, ориентированных по Полярной звезде (x' в метрах, y' в милях)	
	x	y	x'	y'
Городская площадь	0	0	0	0
Ворота A	x_A	y_A	x'_A	y'_A
Ворота B	x_B	y_B	x'_B	y'_B
Прочие ворота

жении городских ворот относительно центра столичной площади, полученных обоими землемерами, и получил табл. 1.

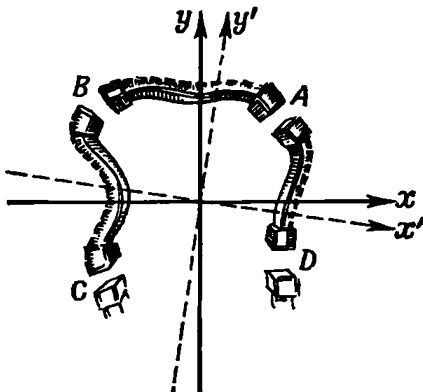
В нарушение всех традиций студент сделал смелый и еретический шаг и перевел результаты измерений в северном направлении, прежде всегда выражавшиеся в милях, в метры с помощью постоянного множителя перевода k . Тогда он обнаружил, что величина $\sqrt{(x_A)^2 + (ky_A)^2}$, вычисленная по данным дневного землемера о положении ворот A , численно в точности равна величине $\sqrt{(x'_A)^2 + (ky'_A)^2}$, вычисленной по данным ночного землемера для тех же ворот A . Проведя эти операции с данными о положении ворот B , студент и для них нашел полное согласие. Возбуждение студента достигло предела, когда он испробовал свой метод на данных о всех других городских воротах и во всех случаях получил подтверждение своей догадки. Он решил дать имя новооткрытой величине и назвал

$$\sqrt{(x)^2 + (ky)^2} \quad (1)$$

расстоянием точки (x, y) от центра города. Он заявил, что им открыт принцип инвариантности расстояния, т. е. что расстояния, вычисленные с помощью координат дневного и ночного землемеров, в точности совпадают, хотя сами значения этих координат совершенно различны.

Открытие: расстояние инвариантно

Эта притча иллюстрирует то примитивное состояние, в котором находилась физика до того, как Эйнштейн в Берне, Лоренц в Лейдене и Пуан-



Р и с. 1. Схема города и городских ворот с нанесенными на нее осями координат, используемыми двумя разными землемерами.

каре в Париже открыли частную теорию относительности. Насколько примитивное?

1. Землемеры мифического королевства измеряли расстояния в северном направлении в священных единицах — милях, иных, чем единицы, в которых они измеряли расстояния в восточном направлении. Аналогично люди, занимавшиеся физикой, измеряли время в священных единицах — секундах, иных, чем единицы, в которых они измеряли пространство. Никому не приходило в голову применить и здесь и там одни и те же единицы или попытаться комбинировать друг с другом возведенные в квадрат пространственную и временную координаты, выраженные в метрах. Множитель перехода между секундами и метрами, а именно скорость света $c = 2,997925 \times 10^8$ метра в секунду, считался священным числом. Никто не считал его просто множителем перехода, подобным множителю перехода между милями и метрами, т. е. множителем, который возник лишь благодаря исторической случайности и лишен глубокого физического смысла.

2. В нашей притче северные координаты y и y' , определенные разными землемерами, не очень сильно отличались друг от друга, потому что соответствующие направления на север были разделены лишь малым углом 10° . Наш мифический студент сначала думал, что малое различие между y и y' вызвано просто ошибками в геодезической съемке. Аналогично этому люди думали, что время между взрывами двух хлопучек будет одним и тем же, кто бы его ни измерял. И лишь в 1905 г. мы узнали, что разница во времени между двумя событиями (первое из которых берется в качестве начала отсчета — «опорное событие») в действительности неодинакова (равна t и t') для наблюдателей, находящихся в разных состояниях движения. Пусть первый наблюдатель неподвижен относительно лаборатории, а второй наблюдатель пролетает мимо в сверхскоростной ракете. Ракета влетает через парадный вход, пронесется через длинный коридор и вылетает в дверь черного хода. В коридоре взрываются сначала первая хлопучка («опорное событие»), а затем вторая («событие А»). Оба наблюдателя уславливаются между собой, что опорное событие определяет начало отсчета времени и начало отсчета расстояния.

Пусть второй взрыв произошел, например, через 5 сек после первого по данным лабораторных часов и на 12 м дальше по коридору. Тогда его временная координата равна $t_A = 5$ сек, а пространственная $x_A = 12$ м.

Дальнейшие взрывы и события также происходят по длине коридора. Данные обоих наблюдателей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Пространственные и временные координаты одних и тех же событий, получаемые двумя наблюдателями, движущимися относительно друг друга. Для простоты значения координат y и z приняты равными нулю, а ракета считается движущейся в направлении оси x

Событие	Значения координат, измеренные наблюдателем, находящимся			
	в покое в лаборатории (x в метрах, t в секундах)		в ракете (движущийся с нею) (x' в метрах, t' в секундах)	
Опорное событие	0	0	0	0
Событие А	x_A	t_A	x'_A	t'_A
Событие В	x_B	t_B	x'_B	t'_B
Прочие события

*Первый наблюдатель использует лабораторную систему отсчета
Второй наблюдатель использует систему отсчета ракеты*

3. Открытие понятия расстояния мифическим студентом подобно открытию в 1905 г. Эйнштейном и Пуанкаре понятия *интервала*. Интервал, вычисленный по данным измерений одного наблюдателя,

$$\text{Интервал} = \sqrt{(ct_A)^2 - (x_A)^2} \quad (2)$$

в точности равен интервалу, вычисленному по данным измерений другого наблюдателя,

$$\text{Интервал} = \sqrt{(ct'_A)^2 - (x'_A)^2}, \quad (3)$$

даже если фигурирующие в этих вычислениях координаты *по отдельности не равны друг другу*. Два наблюдателя припишут пространственным и временным координатам событий A, B, C, \dots относительно одного и того же опорного события разные значения, но, вычислив эйнштейновские *интервалы* между этими событиями, они обнаружат, что соответствующие величины совпадают. Эта *инвариантность интервала* (его независимость от выбора системы отсчета) вынуждает признать, что время невозможно отделить от пространства. Пространство и время — части единого целого, которое называется *пространством-временем*. Геометрия пространства-времени в действительности характеризуется четырьмя измерениями. Можно сказать, что «направление временной оси» зависит от состояния движения наблюдателя точно так же, как направление оси y землемера зависело от его метода ориентации на «север».

Открытие: интервал инвариантен

В остальной части этой главы мы будем заниматься развитием аналогии между снятием планов в пространстве и взаимным сопоставлением событий в пространстве-времени. Обзор, предвосхищающий наши выводы, представлен в табл. 3. Для того чтобы почувствовать единство пространства и времени, мы обращаемся к способу, помогающему лучше разглядеть ландшафт; для

Таблица 3. Детализация притчи о землемерах, предвосхищающая дальнейший анализ

<i>Притча о землемерах — геометрия пространства</i>	<i>Физическая параллель — геометрия пространства-времени</i>
Задача землемера — определить положение точки (ворот A), пользуясь одной из двух систем координат, повернутых относительно друг друга	Задача физика — определить положение в пространстве и времени события (взрыв хлопушки A), пользуясь одной из двух движущихся относительно друг друга систем отсчета
Две системы координат — ориентированная по магнитному компасу и ориентированная по Полярной звезде	Две системы отсчета — лабораторная система отсчета и система отсчета ракеты
Для удобства все землемеры условились измерять положения относительно общего начала (центр городской площади)	Для удобства все физики условились измерять положения событий в пространстве и во времени относительно общего опорного события (взрыв опорной хлопушки)

 Притча о землемерах — геометрия пространства

 Физическая параллель — геометрия пространства-времени

Анализ результатов, полученных землемером, упрощается, если координаты точки x и y измерены в одинаковых единицах — метрах

Взяты по отдельности, координаты x_A и y_A ворот A имеют разные значения в двух системах координат, повернутых относительно друг друга

Инвариантность длины. Расстояние (длина) $(x_A^2 + y_A^2)^{1/2}$ от ворот A до городской площади получается одинаковым, если его вычислять по результатам измерений в любой из двух повернутых относительно друг друга систем (x_A и y_A измерены в метрах)

Преобразование поворота. Пользуясь евклидовой геометрией, землемер может решить следующую задачу: по данным значениям координат x'_A и y'_A ворот A в системе ночного землемера и относительному наклону соответствующих осей найти координаты x_A и y_A тех же самых ворот в системе дневного землемера

Анализ результатов, полученных физиком, упрощается, если координаты события x и t измерены в одинаковых единицах — метрах

Взяты по отдельности, координаты x_A и t_A события A имеют разные значения в двух системах отсчета, равномерно движущихся относительно друг друга

Инвариантность интервала. Интервал $(t_A^2 - x_A^2)^{1/2}$ между событием A и опорным событием получается одинаковым, если его вычислять по результатам измерений в любой из двух систем отсчета, движущихся относительно друг друга (x_A и t_A измерены в метрах)

Преобразование Лоренца. Пользуясь лоренцевой геометрией, физик может решить следующую задачу: по данным значениям координат x'_A и t'_A события A в системе ракеты и скорости ракеты относительно лабораторной системы отсчета найти координаты того же самого события x_A и t_A в лабораторной системе

этого нужно посмотреть на него под разными углами. Поэтому мы сравниваем пространственную и временную координаты одного и того же события в двух *разных* системах отсчета, движущихся относительно друг друга.

Притча о землемерах подсказывает нам, что было бы полезно перейти к одинаковым единицам для измерения как пространства, так и времени. Поэтому возьмем в качестве такой единицы метр. В метрах можно измерять и время. Если установить на обоих концах полуметрового стержня по зеркалу, то между этими зеркалами может отражаться взад и вперед луч световой вспышки. Такое устройство представляет собой *часы*. Можно сказать, что эти часы издадут «тик-так» каждый раз, когда свет возвращается к первому зеркалу. Между всеми последовательными возвращениями световой вспышки проходит путь, в общей сложности равный *1 метру*. Мы назовем поэтому промежуток времени между двумя последовательными «тик-так» таких часов *1 метром светового времени* или, проще, *1 метром времени*. (Проверьте, что *1 секунда* приблизительно равна $3 \cdot 10^8$ *метрам* светового времени.)

 Время измеряется в метрах

Одна из целей физики — отыскание простых взаимосвязей между событиями. В нашем случае для этого целесообразно выбрать специальную систему отсчета, относительно которой законы физики имеют простую форму. Заметим, что вблизи Земли все предметы подвержены действию силы тяжести. Это действие усложняет известные нам по обыденному опыту законы движения. Чтобы исключить подобные усложняющие обстоятельства, мы сконцентрируем наше внимание в следующем параграфе на свободно



Р и с. 2. Рисунок из первых изданий «Из пушки на Луну» Ж. Верна. Кличка бедного пса была Sputnik.

падающей вблизи Земли системе отсчета. В такой системе отсчета сила тяжести не ощущается, и мы назовем эту лишенную тяготения систему отсчета *инерциальной*. В частной теории относительности исследуются классические законы физики, взятые относительно инерциальной системы отсчета.

Упрощение: переход к свободно падающей лаборатории

Принципы частной теории относительности замечательно просты. Они много проще аксиом геометрии Евклида или правил управления автомобилем. Однако и геометрия Евклида, и автомобиль были созданы поколениями обыкновенных людей, даже не испытывшими в полной мере удивления, которого заслуживали плоды их творчества. Некоторые из лучших умов XX в. выступали против идей теории относительности, и не потому, что их природа темна, а по той простой причине, что человеку трудно преодолеть установившийся взгляд на вещи. Теперь относительность уже выиграла сражение. Мы уже можем выразить ее понятия так просто, что правильный взгляд на вещи устанавливается сам собой, — это значит «делать плохое трудным, а хорошее — простым»¹⁾. Понимание теории относительности отныне не есть проблема *обучения*, а просто дело *интуиции* — практикуемого подхода к вещам. При таком подходе громадное число прежде непостижимых опытных данных становятся совершенно естественными и понятными²⁾.

¹⁾ Высказывание Эйнштейна по аналогичному поводу в письме архитектору Корбюзье.

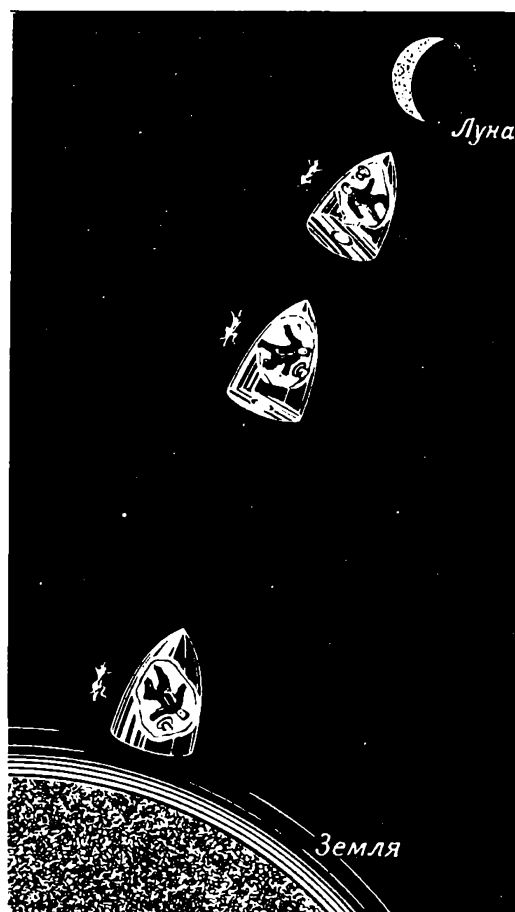
²⁾ Исчерпывающий список литературы по частной теории относительности для начинающих, а также ряд отписок работ см. в книге *Special Relativity Theory, Selected Reprints*, опубликованной Американским институтом физики для Американской ассоциации учителей физики в 1963 г. [В советском издании обширную библиографию по частной теории относительности см. в книге: У. И. Ф р а н к ф у р т, *Очерки по истории специальной теории относительности*, Изд-во АН СССР, М., 1961.— *Прим. перев.*]

2. ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА

Менее чем через месяц после того, как капитуляцией при Аппоматоксе закончилась гражданская война в Америке (1861—1865), французский писатель Жюль Верн начал писать свой роман «Из пушки на Луну». В этом романе рассказывалось о том, как выдающиеся американские артиллерийские инженеры отлили в специальной шахте во Флориде гигантскую пушку, направленную жерлом в небо. Из этой пушки был выпущен десятитонный снаряд, в котором находились трое людей и несколько животных. Когда снаряд устремился в свободный полет к Луне, покинув канал ствола пушки, его пассажиры могли, как обычно, ходить внутри снаряда по дну, расположенному ближе к Земле (см. рис. 3а). При дальнейшем полете пассажиры чувствовали, что их все меньше и меньше прижимает к полу космического корабля, пока, наконец, в той точке, где Земля и Луна притягивают к себе тела с равной силой, но в противоположных направлениях, эти пассажиры стали свободно парить, оторвавшись от пола. Затем, приближаясь к Луне,



Р и с. 3а. Неправильное предсказание. Жюль Верн полагал, что пассажир свободно летящего снаряда будет стоять на том дне снаряда, которое ближе к Земле или к Луне, в зависимости от того, притяжение которой из них сильнее, но что собака будет парить рядом со снарядом в течение всего путешествия.



Р и с. 3б. Правильным было бы предсказание, что и пассажир будет парить внутри снаряда в течение всего путешествия. Жюль Верн прав, описывая движение собаки.

они снова смогли ходить, но теперь уже по противоположной стороне своего корабля, обращенной к Луне. В начале полета одна из находившихся в снаряде собак погибла от ран, полученных при запуске. Пассажиры выбросили ее труп в люк на дне снаряда, но обнаружили, что он следует за снарядом в течение всего путешествия.

Пассажиры жюльверновского космического корабля ощущали свой вес

Этот рассказ приводит к парадоксу, играющему решающую роль для теории относительности. Жюль Верн считал возможным, что гравитационное притяжение со стороны Земли способно прижимать пассажира к стороне снаряда, обращенной к Земле, на первоначальном этапе путешествия. Он считал также естественным, что труп собаки будет все время оставаться вблизи снаряда, так как и снаряд, и собака независимо друг от друга движутся по одной и той же траектории в пространстве. Но если собака летит *снаружи* рядом с космическим кораблем в течение всего путешествия, то почему бы и пассажиру не парить свободно *внутри* космического корабля? Ведь если бы мы распилили снаряд на две части, не стал ли бы пассажир, оказавшийся теперь «снаружи», свободно парить над полом?

Парадокс пассажира и собаки

Наш опыт в области реальных космических полетов позволяет разрешить этот парадокс. Жюль Верн ошибался, описывая состояние пассажира внутри космического корабля. Подобно находящейся снаружи корабля собаке, пассажир внутри корабля совершает тот же путь в пространстве, что и космический корабль. Поэтому он должен свободно парить относительно корабля в течение всего путешествия (рис. 3б). Конечно, гравитационное поле Земли действует на пассажира. Но оно действует и на космический корабль. В самом деле, относительно Земли *ускорение космического корабля* под действием его гравитационного поля *в точности равно ускорению пассажира* под действием этого поля. Ввиду равенства этих ускорений между пассажиром и космическим кораблем не будет существовать *относительного* ускорения. Итак, космический корабль служит системой отсчета («инерциальной системой отсчета»), по отношению к которой пассажир не испытывает ускорения.

Пассажир реального космического корабля испытывает состояние невесомости

Утверждение о том, что ускорение пассажира относительно космического корабля равно нулю, вовсе не равносильно утверждению, что их относительная скорость обязательно равна нулю. Пассажир может отталкиваться от пола или стен, в результате чего он пролетит внутри корабля и ударится о стену. Но если его начальная скорость относительно корабля была равна нулю, то этот случай будет самым интересным, так как равная нулю скорость будет постоянно сохраняться и в дальнейшем. И пассажир, и космический корабль будут следовать в пространстве одним и тем же путем. Как это замечательно, что пассажир, даже лишенный возможности взглянуть наружу, тем не менее следует строго предопределенной орбите! Лишенный возможности двигаться, он даже с закрытыми глазами не касается стен. Можно ли в большей степени исключить влияние тяготения?!