

ГЛЕБ АНФИЛОВ



БЕГСТВО ОТ УДИВЛЕНИЙ

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ

В этой книжке поясняется, что такое

**ДВИЖЕНИЕ,
МЕХАНИКА,
ТЯГОТЕНИЕ,
ПРИЧИННОСТЬ,
ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ,
ПРОСТРАНСТВО,
ВРЕМЯ,
ВСЕЛЕННАЯ**

Рисунки Б. Лаврова

Анфилов Г. Б.

А73 Бегство от удивлений. Книга для юных любителей физики с философским складом ума. Рис. Б. Лаврова. Второе издание. М., «Дет. лит.», 1974.

288 с.

Книга рассказывает о рождении и развитии механики как науки, искавшей и ищущей ответы на самые простые и глубокие вопросы об устройстве природы.

А $\frac{70803-205}{M101(03)-74}$ 478-74

Приглашение к бегству

Двадцатый век — это эпоха
бегства от чуда.

Альберт Эйнштейн

В возрасте пяти или шести лет Альберт Эйнштейн испытал чудо, которое запомнилось ему на всю жизнь. Это чудо подарил ему его отец. Это был компас.

Маленький Эйнштейн рассматривал, как пляшет намагниченная стрелка. И размышлял. И не мог разгадать загадку: почему стрелка все время направлена на север? «То, что стрелка вела себя так определенно,— писал Эйнштейн в старости,— никак не подходило к тому роду явлений, которые могли найти место в моем неосознанном мире понятий (действие через прикосновение). Я помню еще и сейчас — или мне кажется, что я помню,— что этот случай произвел на меня глубокое и длительное впечатление».

Так пришло первое удивление. Эйнштейн вспоминал о нем как о начале сознательного взгляда на мир.

В зрелые годы удивлений стало много. Эйнштейн черпал их в привычном и внешне ничуть не странном. Он часто говорил об этом. И огорчался, что «человек так не реагирует на то, что видит с малых лет. Ему не кажется удивительным падение тел, ветер и дождь, он не удивляется Луне и тому, что она не падает...»

Самого же Эйнштейна умение удивляться непонятности мира не покинуло до последних дней. И это не было умильно-пассивным созерцанием тайны или мистическим трепетом перед чудом. Эйнштейн не дорожил удивлениями. Он уходил, убежал от них, постигая их причины.

Вот почему развитие умственного мира ученого, по словам Эйнштейна, «представляет в известном смысле преодоление чувства удивления, непрерывное бегство от удивительного, от чуда».

В этой книжке мы тоже обратим внимание на замаскированные чудеса, еще более «обыкновенные», чем компас. Главным образом — на падающий камень. И попытаемся пройти дорогой, которую проложили некогда Галилео Галилей и Исаак Ньютон, по которой «бежал от удивлений» Альберт Эйнштейн.

Книжка эта — без претензий на строгую научность, со скромными потугами на развлекательность (местами). Кое-где будет рассказано о предметах сложных; там читателю придется проявить усидчивость.

Но сперва читать будет легко: на первых порах речь пойдет о вещах, которые должны быть знакомы по урокам физики. Тот, кто умудрен в школьной механике и увенчан лаврами пятерок, может проглядеть всю первую часть бегло, со снисходительным чувством понимания сути дела, и даже, пожалуй, совсем опустить ее. Только пусть он имеет в виду, что там говорится об удивительных странностях падения, которые в рамках классической физики объяснения, увы, не находят. Весь последующий рассказ — разветвленный, изобилующий отступлениями, иногда нелегкий для быстрого чтения, — будет посвящен чудесам падающего камня и, в связи с этим, специальной и общей теории относительности. А в самом конце вас ждет небольшая экскурсия в дали Вселенной, в проблемы ее истории и будущего.

Таким образом, глубокие знатоки школьной физики, видимо, сразу приступят ко второй части.

Ну, а не знатоки, читатели, лишенные избытка самоуверенности и обладающие не столько физическим и математическим складом ума, сколько философским, склонным, скорее, к желанию понять проблемы в общих чертах, нежели в деталях, — словом, те, кто не стремится стать профессионалом-физиком, а просто хочет расширить свой кругозор, хочет понять главное в природе и во многом верит науке на слово (на их стороне симпатии автора, и как раз для них, в основном, написана эта книжка), — я надеюсь, начнут читать с начала.

Очень хочется, чтобы именно они дочитали ее до конца.

УДИВЛЕНИЕ ПАДЕНИЮ

Глава I. КАМЕНЬ И ПУШИНКА

Через пустоту

Тяжесть и опасность падения — это первое, что осознает человек, освободившись от младенческих пеленок. Первый шаг, первый прыжок — и он убеждается: предстоит прожить жизнь в мире, где всегда что-то тянется к земле и падает. Освоиться с таким положением вещей помогают синяки, шишки, разбитые тарелки — словом, опыт, копящийся с юных лет. И в конце концов человек, умудренный житейским опытом, начинает думать, что он многое постиг и знает.

А так ли это?

Проверьте-ка себя — хотя бы на том же явлении падения.

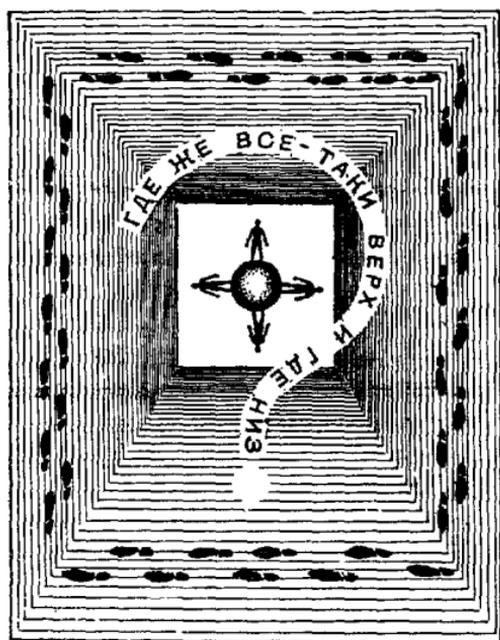
Вот вопрос. Почему камень падает?

Отвечают по-разному:

— Потому, что он тяжелый.

— Потому, что его притягивает Земля.

Первый ответ восходит к глубочайшей старине. Наши предки, веря своим учителям, древним мудрецам, считали, что разным телам присущи два противоположных свойства — тяжесть и легкость. И что всему на свете назначено свое «естественное» место: тяжелому — внизу, легкому — вверху. Вот и стремятся книзу камни, а дым, наоборот, поднимается. Но что такое «низ» и почему он для камня «естественнее», чем «верх», древние мудрецы не сказали.



Прошли века, и «низ» перемешался с «верхом». Очень просто: Земля оказалась шаром. Небо Австралии для нас — внизу. Но австралийские сосульки не падают на Луну, когда она оказывается «под Австралией».

Что касается свойства «легкости», то его, как выяснили, не оказалось в природе. Все тела наделены тяжестью, хоть и в разной степени. Дым поднимается не потому, что он легкий, а потому, что он увлекается теплым воздухом, который менее тяжел, чем окружающий

холодный воздух. Так в воде всплывает пробка.

Как видите, с первым вариантом ответа связано немало недоразумений и заблуждений.

Второй вариант значительно моложе. Ему не более четырехсот лет. В XVI веке знаменитый астроном Иоганн Кеплер с величайшей осторожностью высказал привычную для нашего времени мысль: «Не камень стремится к Земле, а, скорее, Земля его влечет к себе». В этих словах была четко провозглашена идея земного тяготения. Предположение о таинственной силе, которая исходит от нашей планеты, пронизывает пустоту, «хватает» камень и тащит его книзу. Как будто ясно.

Но чуть-чуть поразмыслите, и в этом традиционном, школьном объяснении вы найдете повод для удивления. В самом деле, почему же земное тяготение может влиять на камень через пустоту, иа расстоянии? Как Земля «хватает» камень, не «дотрагиваясь» до него? Ведь то самое «действие без прикосновения», которому поразился юный Эйнштейн, разглядывавший компас, на падающем камне еще заметнее и нагляднее. Между Землей и камнем не видно никаких нитей, никаких пружин — и тем не менее происходит падение.

Разве это не чудо?

Нетерпеливым читателям, верно, хочется спросить: а в самом деле, почему это так? Почему Земля через пустоту тянет к себе камни и все остальные тела?

Получить ответ сейчас — значит, сразу, без особых усилий, «убежать от удивления». Но столь поспешное бегство не удастся. Простой с виду вопрос на деле обрачивается труднейшей и сложнейшей научной проблемой.

Гонна без победителя

Чтобы понять причины чуда, нужно сперва изучить его подробности, точно разузнать, *как* оно происходит. Без ответа на вопрос «как» не узнаешь и *почему* именно так, а не иначе устроена и действует природа.

Уход от всеобъемлющего *почему* может показаться уступкой, жертвой незнанию. Но в действительности наоборот — именно здесь шаг вперед. Это доказано всей историей науки.

Итак, не *почему* это так, а прежде всего *как* это так?

Сначала — как падают тела?

Вот задача.

Некий чудак, глаза с моста в реку, уронил кепку, решил догнать ее в воздухе и для этого сам нарочно упал с моста. Удался ли ему замысел? Соппротивление воздуха не учитывать.

Вариант задачи. Что быстрее свалится со стола — дверной ключ или спичка? Какая из двух сосулук, вместе оторвавшихся от карниза, скорее достигнет тротуара — большая или маленькая?

Второй (более острый) вариант. Что раньше упадет на землю, сорвавшись одновременно с одинаковой высоты (при условии отсутствия помех) — тополиная пушинка или пушечное ядро?

Все эти варианты составили маленькую анкету, которую я предложил людям вполне культурным — пятерым школьникам-восьмиклассникам и трем взрослым, журналистам. Получился легонький тест на физический кругозор.

Трое из опрошенных (в их числе два школьника) ответили правильно. Остальные же, те, кто начисто за-

был школьную физику, уверенно заявили: чужак догонит кепку, большая сосулька обгонит маленькую, так же как ядро — пушинку. Потому что, говорили они, тяжелое должно падать быстрее легкого, так как сильнее притягивается Землей.

Хорошо, когда культура человека сочетается с минимумом знаний. Увы, так бывает не всегда, что и засвидетельствовал мой тест.

В действительности гонка любых тел, падающих без помех, — гонка без победителя. Уроните пушинку и ядро в безвоздушном пространстве, и вы увидите, что они полетят вниз рядышком, ни на йоту не опережая друг друга. Это касается любых тел, лишь бы не было помех падению. И это — тоже чудо. Великое чудо природы. Потому что просто невозможно поверить, не убедившись воочию, что пушинка и ядро падают одинаково быстро. Житейский опыт этого знания не дает. Больше того, он противоречит этому знанию. Нужен опыт научный — физический эксперимент. Впервые его провел, по свидетельству многих историков науки, великий итальянец Галилео Галилей.

Башня в Пизе

Наклонная башня в итальянском городе Пизе сейчас доставляет массу хлопот. Она наклоняется все больше и грозит вообще упасть. Итальянцы, кажется, всерьез забеспокоились и решили укрепить это уникальное архитектурное сооружение. Пока, правда, лишь разрабатываются проекты. Но надо надеяться, Пизанская башня будет спасена и сохранена.

Почет башне — по заслугам. Она не только памятник зодчества. Она была чуть ли не самым первым в мире физическим прибором. И изучалось на ней то самое явление, которое ныне угрожает ее сохранности, — падение.

Четыре века назад молодой профессор Пизанского университета Галилей (в ту пору еще не снискавший славы всемирно известного физика, даже не сделавший еще окончательного выбора между медициной, живописью и философией) бросал с этой башни пушечные ядра и мушкетные пули. И смотрел, как они падают.

Пули и ядра падали одинаково быстро, и Галилей восхищенно удивлялся этому. Удивлялся потому, что с детских лет его учили догме: тяжелое падает быстрее легкого, и тем быстрее, чем оно тяжелее. В старых книгах это утверждение выдавалось за непререкаемую истину, ибо так заявил в свое время величайший из мыслителей древности Аристотель.

Галилей осмелился кощунственно проверить и отвергнуть это мнение, призвав в свидетели природу. Так он совершил первое великое дело своей жизни, положил начало экспериментальной физике.

Громкие слова эти сказаны не напрасно. Наблюдение и вывод Галилея были научным подвигом, блестящим прозрением человеческого ума, переломом в научном взгляде на мир.

Тогда не принято было апеллировать к природе в решении научных задач. Считалось, что все на свете объяснимо одними лишь рассуждениями. А потому важные коллеги молодого профессора, собравшиеся внизу, у подножия башни, не желали верить своим глазам, осыпали Галилея суровыми упреками, не хотели слушать его слов. И они были отнюдь не глупцами. Нет, они были людьми просвещенными, знали древние языки, умели толковать античные тексты, разбирались в математике, находили удовольствие в философских диспутах, где изощрялись в красноречии и формальной логике. Но к естественности, к живому физическому явлению они питали надменное равнодушие.

Такое уж было время — не родилась еще настоящая физика. Исследовательский ум, еще юный, незрелый, был тогда, пожалуй, слишком хвастлив. Он упивался собой и переоценивал себя. Он стыдился задавать вопросы неразумной стихии. Опыт представлялся ему занятием низким, даже жульническим. Прибегнуть к опыту значило как бы расписаться в собственной умственной слабости.

Галилей тоже был сыном своей эпохи. И он не чурался витиеватой мудрости голых рассуждений. И он упражнялся в богословии. И чтил Аристотеля, ревностно его штудировал. И сперва послушно шел по его стопам. А потом сумел в нем усомниться.

На такое, правда, кое-кто решался и до Галилея. Но именно Галилей первым в истории науки довел

еретические антиаристотелевские раздумья о падающих телах до конкретного эксперимента. Первым сознательно решился задать вопрос природе о свойствах падения.

На брюзжание пизанских коллег Галилей не уставал отвечать. По-всякому. Иногда — во вкусе оппонентов (в духе модных в те времена схоластических споров) и даже язвительными стихами. Но главное — он продолжал свои опыты. Вновь и вновь лазал на башню, старался узнать, зависит ли быстрота падения не только от веса, но и от материала, от формы тел. Этой проблеме была посвящена серия экспериментов. Круглые ядра, продолговатые пули, железные, медные — все летело с башни вниз. Экспериментировать было трудно: слишком скоро брошенные тела оказывались на земле.

Вода течет в бокал

Зато у себя дома в рабочем кабинете, который стал первой на нашей планете физической лабораторией, Галилей ухитрился замедлить падение. Оно стало доступно и взгляду и тщательному, неторопливому изучению.

Ради этого Галилей построил длинный (в двенадцать локтей) наклонный желоб. Изнутри обил его гладкой кожей. И спускал по нему отшлифованные шары из железа, бронзы, кости.

Делал, например, так.

К шару, находившемуся в желобе, прикреплял нитку. Перекидывал ее через блок, а к другому ее концу подвешивал гирию, которая могла опускаться или подниматься отвесно. Гирию тянула вниз ее собственная тяжесть, а вверх, через нить, — шарик из наклонного желоба. В результате шарик и гирия двигались так, как хотел экспериментатор — вверх или вниз, быстро или медленно, смотря по наклону желоба, весу шарика и весу гири. Шарик и гирия могли, таким образом, перемещаться под действием силы тяжести. А это и было падение. Правда, не свободное, искусственно замедленное.

Сперва Галилей отыскал закон устойчивого состояния этой системы: вес гири, помноженный на высоту поднятого конца наклонного желоба, должен быть ра-

вен весу шарика, помноженному на длину желоба. Так появилось условие равновесия системы — галилеевский закон наклонной плоскости.

О падении и его секретах еще ничего не было сказано.

Неподвижность изучать нетрудно: она постоянна во времени. Проходят секунды, минуты, часы — ничто не меняется. Весы да линейки — вот и все, что нужно для измерений¹.

Затем Галилей стал изучать движение шаров. Это тот день и был днем рождения физики (увы, календарная дата его неведома). Потому что именно тогда подвергся первому лабораторному исследованию процесс, изменяющийся во времени. Пошли в ход не только линейки, но и часы. Галилей научился отмеривать длительность событий, то есть исполнять главную операцию, присущую всякому физическому эксперименту.

Поучительна легенда о лабораторных часах Галилея.

В то время нельзя было купить в магазине секундомер. Даже ходиков еще не изобрели. Галилей же вышел из положения совсем особым образом. Он отсчитывал время ударами своего пульса, потом, как уверяют давние биографы, устроил неплохие лабораторные часы из неожиданных составных частей: ведра, весов и хрустального бокала. В дне ведра проделал дырочку, через которую текла ровная струйка воды. По солнцу замечал, сколько унций воды вытекало за час, и затем высчитывал вес воды, вытекающей за минуту и за секунду.

И вот опыт. Ученый опускает в желоб шар и тут же подставляет под струйку бокал. Когда шар достигает заранее намеченной точки, быстро отодвигает бокал. Чем дальше катился шар, тем больше натекло воды. Ее остается поставить на весы — и время измерено. Чем не секундомер!

¹ Потому-то с глубокой древности начала развиваться статика — область физики, занимающаяся всякого рода неподвижностями: уравновешенными весами, блоками, рычагами. Все это вещи нужные, понимать их важно и полезно, недаром им посвятил много времени прославленный грек Архимед. Даже в неподвижности он подметил многое, что необходимо изобретателям всевозможных машин. Тем не менее, если быть придирчивым, это еще не была настоящая физика. Это была только подготовка к ней. А подлинная физика началась с изучения движений.

«Мои секунды мокрые, — говорил Галилей, — но зато их можно взвешивать».

Соблюдая элементарную строгость, стоит, впрочем, заметить, что эти часы не так просты, как может показаться. Вряд ли Галилей учитывал уменьшение давления (а значит, и скорости) водяной струи с понижением уровня воды в ведре. Этим можно пренебречь, лишь если ведро очень широкое, а струйка — узкая. Возможно, так оно и было.

Открытие ускорения

Галилеевский рабочий кабинет — прародитель всех нынешних роскошных физических лабораторий и институтов. А потому, глядя с уважением на современные циклотроны и реакторы, не лишне вспомнить, как в старой Пизе катились по желобу шары, спускались на нитях гири, текли водяные «стрелки» часов¹. Эта большая работа, повторенная потом в тысячах и тысячах лабораторий — научных, университетских, школьных, — была первой классической серией экспериментов с движением тел под действием тяжести.

Из множества опытов Галилей отыскал главную особенность такого движения — оно *равноускоренное*. Чем дальше от начала пути, тем быстрее, причем скорость нарастает в равные промежутки времени строго одинаковыми порциями. Галилей первым понял, что, кроме скорости, у падающих камней и скатывающихся шаров есть еще *ускорение* — скорость изменения скорости. Желоб горизонтален — ускорения нет, есть только скорость. Шар катится равномерно. Появился наклон, и шар ускоряется. Круче наклонен желоб — больше ускорение. Это нехитрое понятие — замечательное открытие науки XVI века. Потому что прежде движение умели различать только по скоростям.

¹ Кое-кто из современных историков науки ставит под сомнение рассказы первых биографов Галилея о его широких экспериментах. Сведения об этих опытах (вплоть до эпизодов с Пизанской башней) считают вымыслом восторженных учеников великого итальянца. Однако главенствует сегодня точка зрения, разделенная в этой книжке. Она провозглашает Галилея достоверным основоположником именно экспериментальной физики.

И еще Галилей вывел формулу пути равноускоренного движения. Вот она, хорошо знакомая нашим семиклассникам:

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

Путь S равен половине ускорения a , помноженной на квадрат времени t . Отличная формула! Знаешь время и ускорение — легко подсчитать путь, пройденный катящимся по желобу шаром. Знаешь путь и ускорение — вычислишь время. Знаешь время и путь — вычислишь ускорение. В том числе и таинственное ускорение силы тяжести, которое с удивительным постоянством гонит вниз падающие сосульки и пушечные ядра.

В самом деле: измерь высоту Пизанской башни (S) и засеки длительность падения с нее ядра (t), а потом подставь полученные величины в нашу формулу. В аккуратном опыте ускорение силы тяжести у поверхности Земли для всех тел неизменно составляет 9,81 метра в секунду за секунду. Оно обозначается буквой g . Это то самое «же», о котором теперь так много говорят космонавты. Галилей этой цифры, правда, получить не смог. Слишком уж несовершенны были приборы. Однако было окончательно сделано важнейшее заключение: не только вес, но и материал падающего тела на быстроту его падения не влияют. Если что и замедляет падение, так это воздух (или трение о желоб). Догадка по тому времени замечательная. Лишь значительно позднее, с изобретением воздушных насосов, она была подтверждена опытом.

Самоотверженный альпинист

По подсказкам Галилея мы выяснили, как падают тела: все с одним и тем же ускорением, независимо от веса и всего прочего. Но житейский опыт уверяет нас: именно вес заставляет тело падать. Если так, то получите каверзный вопрос: тело, которое ничего не весит, и падать не должно? Верно?

Давайте сообразим. И пока сделаем вид, что ничего не знаем о силе тяготения, действующей «через пустоту». Пусть вес — только давление на опору.

В самом деле, вес неподвижных тел всегда проявляется как давление на опору. Камень, лежащий на моей ладони, давит на нее. Гирия давит на чашку весов. Все неподвижное весомо, если поблизости находится Земля.

Убери из-под гири опору — гирия начнет падать. Почему?

Хочется сказать: она начинает падать потому, что имеет вес.

Не будем спорить против этого жедания. Но спросим еще: а движущиеся тела — имеют они вес? Начнут они падать, если из-под них убрать опору?

Попробуем разобраться логически.

Альпинист, нагруженный рюкзаком, лезет на гору. Поднимается на вершину и все время ощущает вес рюкзака. При таком движении «ноша тянет». Идти с рюкзаком тяжело. Сорвешься с горной тропки — полетишь в пропасть.

Ну, а каково с рюкзаком падать, тяжело или легко? Или, скажем, такой вопрос: с каким рюкзаком легче падать, с тяжелым или легким? Сохранится вес у падающего рюкзака? И у падающего альпиниста?

Ради опыта альпинист самоотверженно спрыгивает с горы. Низвергается вниз. Но... если альпинист и его рюкзак сохраняют в падении свой вес (как давление на опору), то выйдет несурaziца.

Судите сами. Альпинист летит вниз, а рюкзак, раз он сохраняет вес и, значит, давит на альпиниста сверху, подгоняет его падение. Без рюкзака он падал бы медленнее. Тяжелее рюкзак — вроде бы быстрее падение.

С другой стороны, и один рюкзак без альпиниста падал бы медленнее, потому что альпинист не тянул бы его своим (сохранившимся) весом снизу. А привязав к себе медленно падающий рюкзак, альпинист замедлил бы, словно парашютом, и собственное падение. Выходит, тяжелее рюкзак — медленнее падение.

Вот и несурaziца: если в падении тела сохраняют вес, то, надев рюкзак, альпинист должен падать одновременно и быстрее и медленнее, чем без рюкзака. Такого быть не может, это — противоречие, чепуха.

Вывод: надетый рюкзак во время падения, во-первых, не давит на альпиниста и, во-вторых, не тянет его вверх. Другими словами, падающий рюкзак ничего не

весит. И альпинист тоже ничего не весит, когда падает. У человека, свалившегося с горы вместе с поклажей, «ноша не тянет». Для всех без исключения свободно падающих тел тяжести не существует. Они пребывают в состоянии невесомости.

Странный получился вывод. Тяжесть — причина падения, а все, что падает, не имеет этой самой тяжести, невесомо. Для новичка это неожиданно и удивительно.

Но если вдуматься, вывод логичен¹. Он отлично согласуется с тем, что мы узнали раньше о постоянстве земного ускорения. В свободном падении нет тяжести (именно как давления на опору). Падающие песчинка и мельничный жернов не давят друг на друга — летят рядом в полном равноправии, в каждый момент с одинаковой скоростью, с одинаковым ускорением g .

Кто прав, кто виноват

Итак, вес, как давление на опору, отнюдь не прикован к телу навечно. Его нет у тел, которые свободно падают. Узнав это, давайте-ка рискнем ответить на манящее «почему»: почему все тела падают одинаково быстро, с равным ускорением? Попробуем сказать: потому что в падении они теряют вес, а это делает невозможным падение с разными ускорениями (во избежание чепухи, с которой мы столкнулись, когда рассуждали об альпинисте и его рюкзаке).

Если хотите, можете перевернуть вопрос. Спросить: почему падающие тела теряют вес? И ответить: потому что они падают с одинаковым ускорением (стало быть, не могут давить друг на друга).

Удовлетворены вы?

Едва ли. Это ведь что-то вроде слов «потому что потому», глубокомысленно сказанных в ответ на «почему».

Пропажа веса — важный признак падения, но, под-

¹ Хотя, честно говоря, и не очень строг. В нем предполагается, что соединение разных тел сопровождается простым арифметическим сложением их весов, а это верно лишь в нашем мире, мире больших тел и не очень больших сил. В микромире иногда дело обстоит сложнее — в своем месте об этом будет сказано.



Копью присуще свойство инерции



метив этот признак, мы еще не нашли его причины. Как не нашли мы и причины одинакового ускорения всех свободно падающих тел. Приведенные ответы ничего не объясняют, только сваливают вину с больной головы на здоровую. Ускорение падения постоянно — виновата-де потеря веса. Вес падающего тела пропал — надо винить постоянство ускорения в падении.

А тут правых и виноватых искать бессмысленно. Падающие тела пунктуально исполняют законы природы. Значит, я рано попытался отвечать на «почему». Удивление разрешить пока не удалось.

Столь же таинственным осталось и наше главное удивление — тому, что Земля действует на камень через пустоту, без всякого прикосновения.

Глава 2. ЧТО ТАКОЕ ИНЕРЦИЯ

Куда залетит копьё

Через двадцать строк вас ждет сообщение еще об одном чуде природы. Чтобы легче понять его, сделаем физкультурную разминку — займемся метанием копьё.

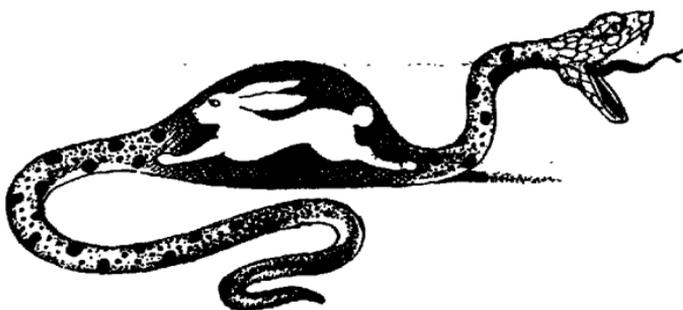
Я разбежался по зеленому полю стадиона, сосредоточил волю в резком броске — и копьё летит вперед. Дальше, выше!.. Ниже... Упало. Далеко оно пролетело? Для нашей космической эры — не очень. Если метров на 100, значит, я мировой рекордсмен.

А хорошо бы закинуть копьё прочь от стадиона, километров этак за сто, за тысячу, вообще куда-нибудь в бездну Вселенной. Как вы думаете, много силы надо иметь для этого?

Да почти совсем не надо. Любой ребенок способен на такое, если только он предварительно уберет с дороги помехи движению копьё. Главных помех немного — всего две. Первая — Земля. Она влечет к себе брошенное копьё (так сказал бы Кеплер) и заставляет его

в конце концов упасть. Вторая помеха — воздух, который тормозит копьё. Вот и все. Уничтожьте Землю и воздух — и от малейшего толчка ваше копьё улетит куда угодно.

Здесь мы и столкнулись с очередным чудом природы. Для неискушенного в физике человека оно, пожалуй, еще удивительнее, чем чудеса тяготения, действующего через пустоту, и одинаковой ускоренности падающих тел. Ведь загадка тяготения видна сразу, постоянство земного ускорения легко заметить по упавшим с карниза сосулькам. А неуничтожимость начатого движения никак не увидишь: все в нашем мире, где невозможно «убрать с дороги» Землю и воздух, тормозится и падает. Древние мудрецы думали поэтому, что движение брошенного камня происходит потому, что его проталкивает вперед воздух, окружающая среда. Так же, как удав проталкивает проглоченного кролика.



Хитро? Не очень. При таком объяснении совсем непонятно, почему же копьё, летящее в воздухе, тормозится.

В действительности разогнанное копьё летит само, если не встречает помех, летит, ничем не подталкиваемое, как угодно далеко — по прямой линии, с постоянной скоростью.

Но все-таки почему бы копьё, летящему в пустоте вдалеке от планет и звезд, не остановиться вдруг или, наоборот, разогнаться, свернуть по дуге, завертеться по какой-нибудь спирали, кувыркнуться? Что заставляет его держаться прямого пути, сохранять скорость? Постепенно сложилось такое мнение.

Копьё, как и любому другому физическому телу, присуще свойство инерции, которое и олицетворяет это

универсальное стремление всех тел к сохранению покоя или равномерного прямого движения. Копье «все равно», покоится оно или движется. Оба состояния для него равноценны. И благодаря своей инерции оно бережно хранит каждое.

В фразах, которые вы только что прочитали, изложен знаменитый закон инерции. О нем догадывались многие мыслители — и гениально многогранный Леонардо да Винчи, и Галилей, и французский философ Рене Декарт. Но только великий английский ученый Исаак Ньютон до конца понял его значение, назвал его первым законом механики и поставил в основу этой области физического знания. В конце главы мы к этому закону еще вернемся. А потом и в конце книжки.

Сложено нулей

Надеюсь, вы не в претензии, что я обращаюсь с Землей, как футболист с мячом: захотел и отбросил ее, чтобы «не мешала». Ради удобства рассуждений и наглядности ученые нередко устраивают подобные «мысленные эксперименты». Значит, и нам с вами они не запрещены.

Итак, мы откинули Землю вместе с ее любопытным умением придавать вес всему, что пребывает рядом. Поэтому наше летящее по инерции копьё не будет ничего весить: тяжести-то неоткуда взяться, нет того, что заставляло бы наше копьё давить на опору. Вес тела вдали от Земли, если верить Кеплеру, равен нулю.

Ну, а если мы теперь вернем Землю и поставим ее где-нибудь подле летящего копьё так, чтобы оно попало в зону земного притяжения, — приобретет тогда наше копьё вес? Новичка тянет сказать: да, приобретет. А на самом деле — нет.

Как только Земля водворена на место, копьё начнет на нее падать — двигаться в направлении ее центра. Кроме того, оно будет продолжать по инерции лететь вперед, ибо появление Земли не сможет отменить первоначальный толчок, в свое время пославший копьё по прямому пути. Получается совмещение двух движений. Копьё будет сразу и лететь вперед (прямо и с постоянной скоростью) и отвесно падать в направлении к Земле (с ускорением свободного падения).

В первом движении вес копы равен нулю. Во втором движении, которое только и добавилось из-за возвращения Земли, вес копы тоже равен нулю, ибо падающие тела не имеют тяжести. Займемся сложением: нуль плюс нуль равно нулю.

Вывод: несмотря на возвращение Земли, свободно брошенное копы продолжает оставаться невесомым.

Падает аверх

Неожиданное известие: не только прославленные космонавты, но и остальные люди, в том числе читатели этой книжки (как и всех остальных), некоторую часть своей жизни проводят в состоянии невесомости. Удивились? Очень хорошо.

Пусть Земля где-то в стороне. Копы брошено и летит в определенном направлении, например вправо, точно по строке, которую вы сейчас читаете. Берем в руки Землю и помещаем ее перед летящим копы — так, чтобы центр планеты находился на прямой линии, продолжающей вправо ту же строку.

Что произойдет с копы?

Направление его движения не изменится. Путь останется таким же прямым, как и без Земли. Только из равномерного полет превратится в ускоренный. Получится нечто вроде обыкновенного отвесного падения, но с большей начальной скоростью, а потому более быстрое, хоть и с прежним ускорением. И, разумеется, копы останется невесомым (ибо, напоминая, складывая нули, получаем нуль).

Случай второй. Подносим Землю с противоположной стороны — помещаем ее центр слева от копы на прежней линии.

Теперь копы сперва будет лететь, как и раньше, вперед (от Земли), но не равномерно, а замедленно (потому что Земля тянет его назад), потом замедлится настолько, что на мгновение остановится (в этот момент полностью исчезнет скорость, сообщенная копы первоначальным толчком), и тут же двинется назад, к Земле, в обычном отвесном падении.

Опять, по известной вам причине, копы останется невесомым, несмотря на то что некоторое время оно

двигалось не к Земле, а от Земли — падало вверх! — и на бесконечно малое мгновение останавливалось, когда меняло направление.

Гагарин или Брумель?

Перекидка планеты вовсе не обязательна. И не трогая ее, можно прийти к тем же заключениям.

Вы стоите на стадионе и бросаете вверх все то же копьё, если оно вам еще не надоело. Во время взмаха оно ускоряется, а вылетев из рук, участвует сразу в двух движениях: равномерном, направленном вверх (точно таком же, как если бы не было Земли), и ускоренном, направленном вниз — отвесном падении. Тут тяготение включается не с запозданием (что мы делали раньше из соображений наглядности), а сразу после разгона. Результат же прежний: едва копьё вырвалось из ваших рук, оно потеряло вес. Если, конечно, пренебречь сопротивлением воздуха.

Можно закинуть копьё не вверх, а куда-нибудь вбок, под углом к вертикали — опять после толчка будет сложение прямолинейного равномерного движения по инерции с отвесным падением. Значит, исчезнет тяжесть. Только на этот раз искривится путь.

Многим кажется странным, что брошенный камень теряет вес тотчас после вылета из руки. Легче согласиться, что он невесом во время движения вниз. Но интуиция подводит. И вверх и вниз брошенное тело летит, не имея ни грамма веса.

Все, что вы подбрасываете — камни, палки, пятаки, мячи, самих себя (когда прыгаете), — после броска пребывает в свободном падении и потому невесомо (разумеется, до тех пор, пока можно не считаться с сопротивлением воздуха). И поскольку прыжки случаются довольно часто в вашей жизни (я уж не говорю о бесконечных падениях, особенно в младенческом возрасте), эту часть жизни вы находите в состоянии невесомости.

По той же причине Валерий Брумель, я думаю, был в невесомости больше, чем Юрий Гагарин. Если Брумель ежедневно совершал десять тренировочных прыжков длительностью по полторы секунды каждый (это соответствует двухметровой высоте прыжка), то за де-

сять лет (за вычетом воскресений) он был в невесомости примерно пятнадцать часов. Это почти в десять раз дольше орбитального полета корабля «Восток».

Впрочем, и Гагарин спортсмен. И он прыгал, бегал, упражнялся на батуте. К тому же он старше Брумеля. Так что, возможно, Гагарин и тут первый.

Опровергаем фантастов

Не стоит в сотый раз журить за ошибку Жюль Верна, который в романе «Из пушки на Луну» уверял, что невесомость в снаряде наступит где-то в середине пути между Землей и Луной (когда-де уравниваются притяжения Земли и Луны). Теперь вину приписывают ученому-консультанту знаменитого фантаста: консультанто обязан был знать, что на самом деле невесомость должна была наступить тотчас по вылете снаряда из жерла пушки.

Но, видимо, по этому примеру, а также и по собственной инициативе писатели-фантасты сочинили затем массу небезлиц про невесомость. Например, «падая на чужую планету, звездолетки всем своим существом чувствовали ее могучее тяготение». Или «двигатели умолкли, ракета удалялась от Земли, и постепенно все вещи становились легче». Объясните сами, почему это неверно.

Даже теперь, в разгар космической эры, про невесомость то и дело говорят опрометчивые вещи. Многие ваши друзья, читатель, считают, что наши космонавты были невесомы потому, что оказались далеко от Земли. Ручаюсь, что по крайней мере человек шесть из десяти думают в таком роде (сам проверял!). В действительности и космонавты в своих кораблях-спутниках падали.

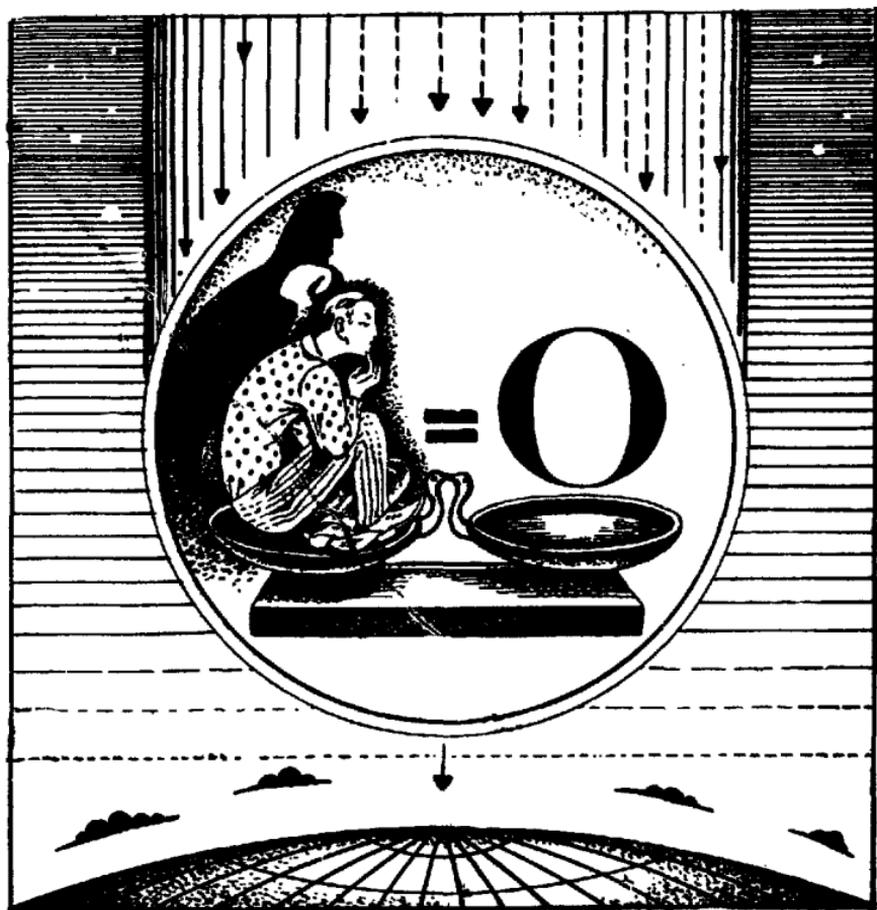
Ракета-носитель настолько сильно разогнала корабль-спутник, что когда он был отпущен ракетой и перешел в свободное падение, то, сворачиваемый к Земле тяготением, не успевал упасть на нее. Движение корабля по инерции, направленное всегда вперед вдоль касательной к криволинейной орбите, было очень быстрым — около восьми километров в секунду. Вот и кружился корабль вокруг планеты, совершая виток за витком. Падал и не мог упасть!

Алексей Леонов, который выбрался из корабля в космос, тоже падал и не мог упасть. В космосе он даже не отстал от корабля и не опередил его по той же самой причине, по которой маленькая сосулька не отстала в падении от большой и не опередила ее.

Будь скорость космического корабля больше одиннадцати километров в секунду, он, падая, улетел бы прочь от Земли. При шестнадцати километрах в секунду ушел бы даже из Солнечной системы!

Ванна невесомости

Теперь вы можете без всяких хлопот исполнить старый замысел Уэллса — избавить человека от веса. Если под руками нет космической ракеты и корабля-спутни-



ка, надо попросить человека подпрыгнуть, только и всего.

Так, правда, он освободится от тяжести ненадолго.

Лучше посадить его в самолет и попросить пилота, чтобы тот забрался повыше, разогнался вверх и резко снизил тягу двигателей — чтобы она преодолевала только сопротивление воздуха. В этом режиме самолет полетит по «баллистической кривой» — сначала поднимется с замедлением, а потом будет ускоренно опускаться. Движение самолета будет таким, как если бы у Земли отсутствовала атмосфера. Произойдет полная имитация свободного падения в безвоздушной среде.

Если самолет высотный и достаточно быстроходный, а летчик опытный, каждый баллистический прыжок продлится довольно долго — минуту, а то и больше.

Именно таким способом проходят тренировку космонавты, чтобы подготовиться к многодневной невесомости космического полета. В самолетах устраивают «ванны невесомости» — просторные кабины, где удобно парить в воздухе, кувыряться, отталкиваясь от мягких стенок, в критических случаях хвататься за поручни — и все это без риска с непривычки натворить бед на каком-нибудь пульте.

Ванну эту я сейчас использую, с вашего разрешения, не по прямому назначению: пусть она побудет боксерским рингом.

Зачем боксеру вес?

Какой-нибудь рекордсмен-сверхтяжеловес, позабывший чудесные школьные годы, наверное, обидится на этот вопрос. Он убежден, что вес ему совершенно необходим — чтобы тяжелыми были кулаки, весомыми удары. Предложите этому боксеру лишиться веса, и он, я думаю, пошлет вас в нокдаун. Все же проявите такт и постарайтесь зазвать в ванну невесомости даже не одного спортсмена, а двух, да еще разных весовых категорий. Если вам это удастся, сделайте эксперимент — упростите боксеров, ради интересов научной популяризации, провести небольшой показательный бой. Достаточно одного раунда.

И вот в ванне невесомости дерутся два боксера, тя-

желовес и легковес. Лучше сказать, бывший тяжеловес и бывший легковес. Теперь они оба «ничегоневесы», ибо вес каждого равен нулю. Казалось бы, весовые категории спортсменов выравнены, шансы на победу одинаковые. Но присмотримся к бою.

Довольно быстро боксеры освоились с необычной обстановкой. Им уже не мешает отсутствие верха и низа, невозможность опираться на ноги. Опытные спортсмены применились к невесомости и азартно дерутся. Бывший легковес подвижен и быстр. Так и сыплет свингами по неповоротливому и спокойному бывшему тяжеловесу. Тот не спешит. Удары его неторопливы. Но какой эффект от каждого! Боковой крюк — и легковес (бывший) завертелся, как волчок. Могучий аперкот — и бывший легковес мчится к потолку, отскакивает от него мячиком. Бывший тяжеловес, несмотря на свою невесомость, буквально давит бывшего легковеса. И за его явным преимуществом вы, не дождавись конца раунда, прекращаете бой. Хватит. Бокс — не уличная драка. Даже во имя науки не следует допускать избияния людей.

Разбор поединка

Произошло доказательство того, что вес боксеру совсем не обязателен. Бывший тяжеловес победил, сбросив все свои килограммы! Почему же? Может быть, у победителя лучше развиты мышцы?

Это нетрудно проверить.

После боя, отходив обессилевшего легковеса (а лучше, разумеется, до боя, чтобы оба спортсмена были свежими), вы даете им по эспандеру — пусть посоревнуются в растягивании тугой резины. И выясняется, что оба они могут растянуть эспандер одинаковое число раз. Значит, мышцы у них развиты одинаково.

Ради строгости допустим, что, кроме того, вы проверили быстроту их спортивной реакции, стратегические навыки, тактические приемы, опыт, даже, если хотите, умственные способности. Во избежание придинок, оговоримся еще одним невероятным условием: наши боксеры дрались в рыцарских латах и поэтому с одинаковой болезненностью переносили удары равной силы



(дабы не давать легковесу преимущества, известного по стихотворной строке из «Василия Теркина»: «Хорошо, что легок телом, отлетел, а то б конец...»).

Так, буквально все качества боксеров, кроме веса, оказались как будто одинаковыми. А во время боя равным — нулевым — был и вес.

В чем же, в конце концов, было преимущество бывшего тяжеловеса?

Его преимущество — в инерции, в том самом свойстве сохранять покой или прямолинейное равномерное движение, которое положено Ньютоном в основу механики. Инерция ведь у разных тел разная. Больше инерция — значит, тело медленнее реагирует на толчок или напор, а если уж движется, то крепко держит скорость и быстрее рушит преграды.

Об этом и свидетельствовала картина боксерского

боя. Бывший тяжеловес посылал удары, от которых бывший легковес вертелся, кувыркался и отскакивал. Наоборот, от весьма сильных наскоков бывшего легковеса противник только слегка покачивался. После боя нельзя было сказать традиционное «победил сильнейший» (оба одинаково сильны). В невесомости не годились и слова «победил тяжелейший». Надо было объявить: «Победил инерционнейший».

Разумеется, печальный исход поединка можно было предотвратить, если бы вы не ограничились лишением боксеров веса, а еще и заранее учили инерцию каждого из них. Можно было измерить инерцию до боя?

Можно.

А как? Как вообще измерить инерцию?

Поставлен вопрос, который имеет в физике исключительную важность. Перед ответом — еще одно замечание. Оно хоть и не ново для внимательных читателей, но должно их немножко запутать, сбить с толку и вместе с тем дать верное направление мысли. Вот какое замечание.

Инерция действует всюду, в любых условиях, в любых состояниях. Она неотделима от тела — будь то сосулька, дождевая капля или целая планета. Она — не то, что вес, который может быть, а может и не быть. Потому что невесомое тело тоже обладает инерцией — недаром мы уничтожили Землю вместе с ее тяготением, когда швыряли в космос копьё, полетевшее затем по инерции, или устраивали поединок невесомых боксеров, в котором победил инерционнейший.

Это замечание и должно вас запутать. И вот почему.

В кажущемся противоречии с тем, что сейчас было сказано, инерцию тела проще всего определить с помощью взвешивания.

Что нужно охотнику

В магазин приходит охотник и просит отвесить ему пять килограммов дроби. Какое физическое свойство он покупает? Инерцию. Инерционный полет выстреленных дробинок — вот что ему требуется. Ведь благодаря инерции, стремлению сохранить равномерное прямоли-

нейное движение летящие дробины погубят утку, которая на них неосторожно наткнется.

Заметьте: охотнику совсем не нужен вес дробинок. Охотник рад купить невесомую, но достаточно инерционную дробь — легче было бы шагать по лесу. Если бы можно было охотиться в далеком космосе (на каких-нибудь живых комет, придуманных фантастами), перед выходом на охоту космонавты запасались бы именно невесомыми дробишками или пулями.

Но дробь продается на вес. Ибо вот непреложное правило: если уж тело имеет тяжесть, то в одинаковых условиях взвешивания она тем больше, чем больше инерционность, присущая телу. Здесь прямая пропорциональность. Давным-давно об этом знают и охотники, и артиллеристы, и продавцы в охотничьих магазинах. И, конечно, физики.

Поэтому исход боя наших невесомых боксеров был предрешен заранее: тяжеловес на Земле инерционнее легковеса и остается таким же в ванне невесомости. На случай, если вам придется судить боксерские встречи в межпланетных полетах, запомните: весовые категории спортсменов следует сохранить, но лучше переименовать их в категории инерционности. Да и на Земле их вернее называть именно так.

Все сказанное, однако, не значит, что единицами веса можно измерять инерцию. Килограммы веса не годятся на эту должность по той же старой причине: они «прогульщики». Пока дробины в магазине или в охотничьем патронташе — они весят, а после выстрела — невесомы.

Как же быть? Кого взять на вакантную должность?

Что нужно домашним хозяевам

Инерцию покупают не часто. Редко приобретают в чистом виде и вес — это делают, например, спортсмены-тяжелоатлеты, когда обзаводятся гирями, гантелями и штангами. Толпы людей, снующих ежедневно по магазинам, не интересуются ни весом, ни инерцией. Ну зачем вам, скажем, инерционность яблока? Чтобы швырнуть его и разбить чье-то окно? Никчемное занятие! Домашние хозяйки, как и охотники, страдающие от

тяжести дробы, с удовольствием лишили бы веса свои сумки, набитые снедью. В булках и колбасах, пачках сахара и пакетах крупы нас интересует не тяжесть, а количество вещества. Ибо десятком невесомых сосисок можно отлично позавтракать в кабине космического корабля.

Количество вещества в физике называют массой. Лучше сказать: чем больше в теле вещества, тем больше его масса.

И по тысячелетнему опыту тружеников прилавка, подтвержденному физиками, массу можно измерять по «бесплатному приложению» — весу. Потому-то во всех продуктовых магазинах стоят весы. Причем тут, как и при взвешивании инерционности, прямая пропорциональность: во сколько раз больше масса тела, во столько раз больше и его вес (разумеется, опять-таки при равных условиях взвешивания). Тело тем больше давит на опору, чем больше в нем вещества, чем больше его масса.

Но, в отличие от веса, масса не «прогульщица». Она всегда при теле: и на Земле, и в космосе, при любом движении. В том числе и во время свободного падения, когда тело невесомо.

Так же, как инерция.

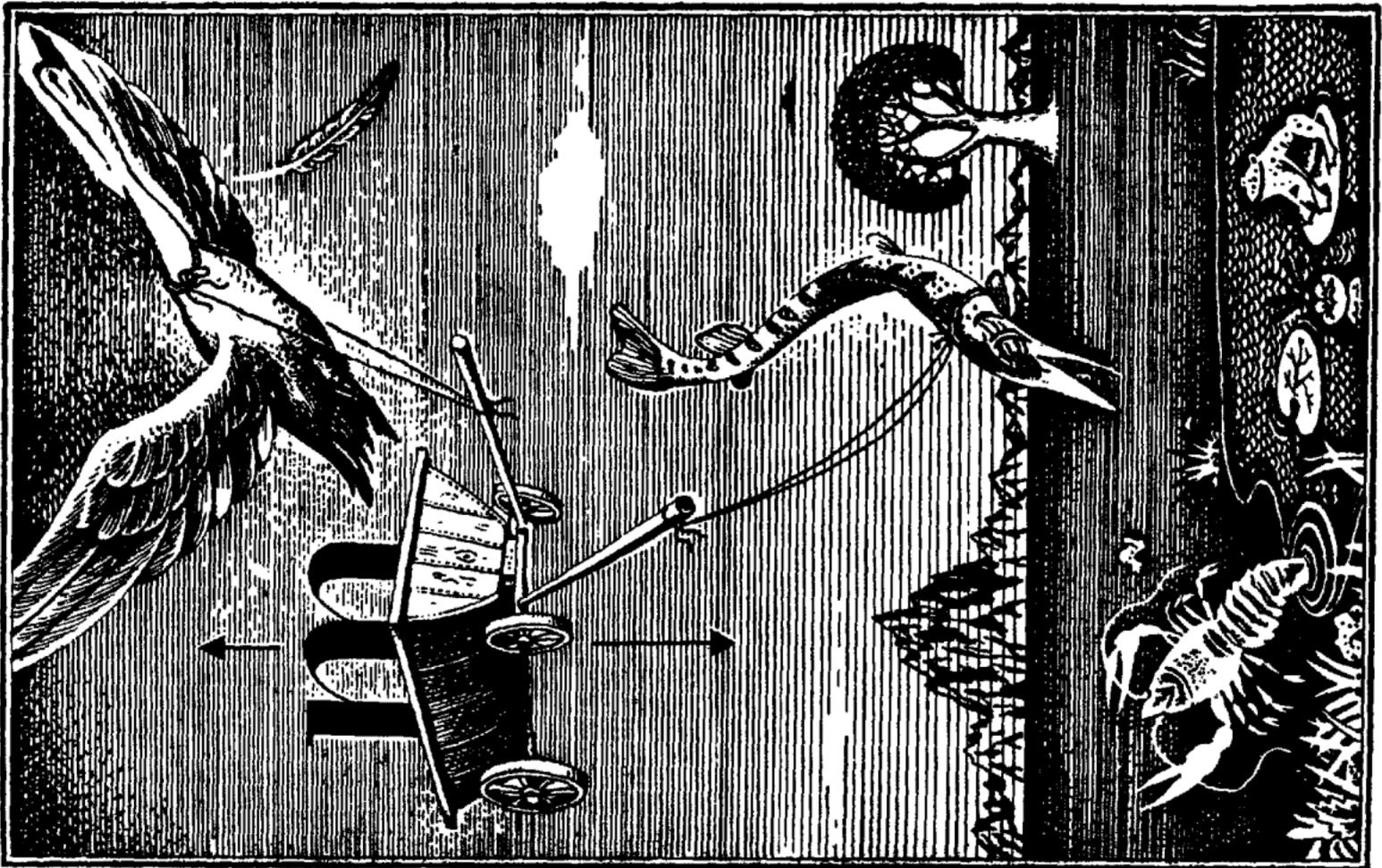
Отсюда вывод: именно количество вещества, массу, можно принять на вакантную должность меры инерции. И в единицах массы измерять инерционную способность тел.

Лобдь и щуна

Не будем спешить. Позволим себе воспоминания и повторения.

Отыскана мера для измерения инерции — количество вещества, масса. Количество вещества, значит, замедляет разгон и торможение тела. Но обратите внимание: то же самое количество вещества, та же самая масса, весит. Будучи неподвижной и находясь вблизи Земли, давит на опору. А когда опору убирают, начинает падать.

Вот только сейчас, после подготовки, содержащейся на предыдущих страницах, я рискну наконец назвать



вес «по-школьному» — силой тяготения. Так, как вслед за Кеплером учил Ньютон.

А в связи с этим пришла пора разъяснить, что именно Ньютон понимал под термином *сила*.

В физике сила есть всегда результат взаимодействия тел, их влияние друг на друга, то, что нарушает покой или равномерное прямолинейное движение взаимодействующих тел, сообщает им ускорение. Сила тяготения — влияние Земли на камень. Тайнственное влияние, которое Ньютон назвал *дальнодействием*, потому что оно происходит без контакта, «через пустоту». Даже если камня вблизи Земли нет, там есть нечто, что подействовало бы на камень, будь он там. Это нечто, посредством которого Земля «через пустоту» влияет на камень, именуют *гравитационным полем* или *полем тяготения*.

По какому закону дальнодействующая сила тяготения действует на тело — об этом пойдет речь в следующей главе. А сейчас отметим лишь то, что эта сила приложена к веществу тела, к его массе. Именно за массу «хватает» Земля «через пустоту» камень или копьё и заставляет их падать, тянет к себе, ускоряет.

Такова точка зрения Ньютона.

Еще раз. Действуя на сосульку, сорвавшуюся с карниза, земное притяжение ее разгоняет. Массе присуще ускорение в поле тяжести. Но, кроме того, она же, эта же самая масса, благодаря своей инерционности, противится ускорению, замедляет разгон сосульки. Вот вам замечательное противоречие, заложенное ие в человеческих рассуждениях, а в самой сути природы! Прочувствуйте его хорошенько.

Можно условиться в следующем (физики так и делают): в одном и том же теле уживаются две разные массы, наделенные противоположными свойствами. Та, что «слушается» силу тяготения, ускоряется к Земле, называется *тяжелой* массой. Или *гравитационной*. А та, что «не желает» поддаваться силе, «старается» сохранить покой или равномерное прямолинейное движение, уменьшает поэтому разгон, — *инертной*, инерционной.

Сосулька падает — и в ней непрерывно конкурируют противоположные стремления: ускоряться и не ускоряться. В одном возу из старой крыловской басни спрятались невидимый лебедь и невидимая щука — вот, если

хотите, сравнение (не очень верное, правда,— это скоро выяснится).

Во всяком случае, теперь ясно, что делать дальше. Надо разгадать «спор» двух масс. Тогда, надо надеяться, будет понятней и само явление падения сосульки.

Сила побеждает

В басне о раке, лебедь и щуке «воз и ныне там». Он неподвижен, потому что к нему приложены силы, уравновешивающие друг друга. У нас — иное. Отличие не только в том, что отсутствует «рак», это не так уж важно. Наш «воз» не неподвижен, несмотря на старания «лебедя» (инерции), он падает вниз — туда, куда его тянет «щука» (сила тяготения).

Значит ли это, что тяжелая масса больше инертной?

Нет. Инерция — не сила (хоть и существуют так называемые *силы инерции* — о них будет сказано немного позже). Сравнить инерцию с лебедем, строго говоря, нельзя, ибо настоящий лебедь, который «рвется в облака», прикладывает к настоящему возу именно силу — то, что изменяет скорость воза, придает ему ускорение. Инерция же — это пассивное «неподчинение» силе.

Дабы не запутаться в словах, применим математические символы. С их помощью все сказанное записывается коротко и наглядно во *втором законе механики*: ускорение тела (a) прямо пропорционально приложенной силе (F) и обратно пропорционально инерции, то есть инертной массе тела (m_i). Вот формула:

$$a = \frac{F}{m_i}.$$

Из нее, в частности, следует, что лишь в предельном случае — при бесконечно большой инертной массе — ускорение равно нулю. А когда инертная масса хоть и велика, но конечна, то даже под ничтожным напором тело пусть очень медленно, но разгоняется. Сила побеждает любую инерцию. Активное начало держит верх над пассивностью. И поэтому все, что имеет массу, должно падать.

Внимание! Мы, кажется, близки к ньютоновской (классической) разгадке одного из чудес падения.

В сосульках и пылинках, песчинках и жерновах непрерывно «спорят» две массы: тяжелая и инертная. И хоть самому факту падения этот спор не мешает (сила тяготения всегда побеждает и сдвигает тело с места), но именно тяжелая и инертная массы определяют исход гонки падающих тел.

Спор масс

Как же они соотносятся, эти две массы, какая из них все-таки больше? Теперь сообразить нетрудно.

Пусть больше тяжелая масса. Тогда она «переспорила» бы соседку и тяжелые тела лучше «слушались» бы силу, чем «упрямились»,— падали бы быстрее легких. Падающий жернов обогнал бы падающую песчинку. Но с первых страниц этой книжки мы отлично помним, что это не так.

Пусть больше инертная масса. Тогда, наоборот, легкие тела падали бы быстрее тяжелых. Песчинка обогнала бы жернов. Однако и этого не наблюдается в природе. Гонка падающих тел не имеет победителя.

Единственно возможный вывод: массы-соседки не могут друг друга «переспорить», а потому тяжелая масса равна инертной. Всегда равна, в любых условиях. Чтобы до конца соблюсти точность, надо сказать, что во всяком случае обе массы пропорциональны: во сколько раз возрастает одна, во столько увеличивается и другая, а при соответствующем выборе единиц измерения пропорциональность становится равенством. И в результате падающие тела падают так, как увидел Галилей: с постоянным ускорением, не зависящим от массы.

Вот она, как будто, причина чуда, которую мы так долго искали! Равенство тяжелой и инертной масс!

Можно поставить множество тонких опытов для проверки этого заключения. Тут не только свободное падение тел. Всевозможные маятники, балансы, крутильные весы, вариометры позволяют скрупулезнейшим образом экспериментально измерить обе массы. В начале нашего века многочисленные опыты такого рода исполнил венгерский физик Роланд Этвеш. В тончайшем приборе, который изобрел Этвеш, и в других, более

поздних, равенство тяжелой и инертной масс было подтверждено вплоть до одиннадцатого знака после запятой. Даже в стомиллионных долях процента оно оказалось безупречным! Вне всякой зависимости от химического состава, плотности, состояния тел.

Именно поэтому жернов и пушинка падают в пустоте одинаково быстро. Именно поэтому они в падении ничего не весят.

Хочется свободно вздохнуть и сделать перерыв в бегстве от нашего удивления. С тем, однако, чтобы после перерыва выставить еще одно «почему»: почему же тяжелая масса равна инертной?

В самом деле, почему? Что это за странное равенство?

Тут ньютоновская механика молчит. Ответа не знает.

Ответ лежит за ее пределами, куда мы в свое время заглянем. И в конце концов окажется, что существует совсем иной, гораздо более простой (с точки зрения «устройства природы», хоть и гораздо более сложный для понимания) способ объяснения загадки падения. Способ, обходящийся без разговоров о делении массы на тяжелую и инертную, даже без истолкования веса как дальнедействующей, мгновенно проникающей «через пустоту» силы тяготения...

Поскольку сразу постичь все это невозможно, примиритесь с постепенностью познания. Еще долго мы не покинем ньютоновских владений, где нас ждет немало поучительного и многозначительного.

Глава 3. ЧТО ТАКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Закон-пословица

Широкой публике лучше других знаком третий закон механики. Он так хорошо известен, что стал новой поговоркой. Ньютоновскую формулировку: «Всякое действие имеет равное и противоположно направленное противодействие» — сейчас употребляют, мне кажется, чаще, чем старую: «Как аукнется — так и откликнется». Смысл схож, только первое выражение определеннее и точнее.

Правда, непосвященные чаще изрекают эту сентен-

цию по поводу событий бытовых или уличных — всякого рода склок и потасовок, и там, пожалуй, действие далеко не всегда равно противодействию. Если же речь идет о физике, то закон должен быть проверен экспериментально и соблюдаться всегда.

Для проверки Ньютон собственноручно поставил несколько опытов. Вот один из них.

На дощечке, плавающей в воде, лежат магнитная подковка и кусочек железа. Всем известно, что магнитом железо притягивается. А железом притягивается магнит? Да, притягивается — это следует из простейшего опыта. Итак, магнит и железо на дощечке, притянувшись, толкают друг друга в разные стороны. Что толкает сильнее? Если магнит, то дощечка поплывет, разгоняясь, в направлении линии, проведенной от магнита к железу и дальше. Если сильнее толкает железо, дощечка тронется, получив ускорение в обратную сторону. В обоих этих случаях действие магнита на железо не будет равно противодействию железа на магнит.

Ньютон убедился: дощечка, нагруженная притянувшимися магнитом и железом, либо недвижима, если она покоилась, либо плывет равномерно по прямой, если она раньше двигалась. Значит, третий закон верен: действие в точности равно противодействию.

Вместо плавающей дощечки можно вообразить Землю в мировом пространстве. Если бы взаимное тяготение разных ее частей не уравновешивалось, планета унеслась бы в бесконечность, непрерывно ускоряя самое себя.

Вы вправе еще представить, что величайший силач, потерявший весла, пытается сдвинуть лодку давлением изнутри на ее нос. В лучшем случае он не сломает лодку, которая ни на миллиметр не продвинется вперед. По той же причине барон Мюнхаузен не сможет поднять себя за волосы.

Воздесущая реактивность

А что случится, если силач сломает лодку или Мюнхаузен, переусердствовав, оторвет себе голову?

Во исполнение третьего закона произойдет отдача, то самое, что толкает приклад выстрелившего ружья

в плечо охотника и движет космическую ракету. Когда оторванный нос лодки ринется вперед, корма ее отскочит назад. Выбрасывая мощный поток раскаленных газов, реактивный двигатель поднимает и разгоняет космический корабль.

И не только космический.

«ТУ-104» — это атмосферный реактивный самолет. Его двигатель схож с ракетным. Но вот это любопытно. Не только он, но и все прочие самолеты, в том числе и винтовые, тоже, строго говоря, реактивные. Да и автомобили, паровозы, пароходы, велосипеды, брички, дилижансы, пешеходы опять-таки реактивны. Таковы, по сути дела, почти все окружающие нас движения. Все, которые подчинены третьему закону Ньютона и обязаны ему своим существованием. Ракета отличается лишь тем, что сама готовит реактивное «рабочее тело» — раскаленные газы, которые она выбрасывает прочь и противодействие которых ее движет в обратную сторону. А для винтового самолета, автомобиля, парохода реактивное «рабочее тело» уже готово — воздух, дорога, вода. «Отбрасывая» их назад, экипаж движется вперед. Действует третий закон.

Я иду по планете потому, что своими ногами толкаю ее назад. Планета, правда, не спешит разгоняться в обратную сторону. Потому что обладает колоссальной массой. Будь на моем месте белка, а на месте планеты колесо, реактивность движения стала бы очень заметна — масса колеса сравнительно невелика, а значит, и его инерционность.

Третий закон Ньютона, как видите, проявляет свое действие очень широко. Однако лишь до тех пор, пока на сцену не выходят силы инерции — то единственное в механике, что ему не подчинено, действия этих сил не сопровождаются противодействиями. Почему это происходит, вы узнаете чуть позже. Предварительно несколько существенных замечаний.

По Пушкину

Читатель уже вобрал в свою голову столько премудрости, что я задам ему сейчас глубочайший философский и физический вопрос: *что есть движение?*

В самом деле, что? Мы все время говорим «движется», а понимаем ли, что значит это слово?

У Пушкина:

— Движенья нет,— сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить.

Иначе (и длиннее) говоря, мудрец стал с течением времени менять свое пространственное положение по отношению к «брадатому» коллеге. Этим было без слов сказано все. Этим была определена сущность механического движения — именно так, как она понимается в физике.

Запомните: движение есть изменение с течением времени положения тела *в какой-либо системе отсчета*. Последние слова совершенно обязательны. Очень важно четко представить себе: без системы отсчета пространства и времени движения не существует.

Для «брадатого мудреца» системой отсчета служила, видимо, скамья и земля, на которой он сидел, плюс удары его сердца, игравшие роль часов. В этой системе второй мудрец менял свое положение. А значит, двигался. Ничего иного в понятие механического движения физик не вкладывает.

Система отсчета — это некая материальная основа для измерения расстояний и длительностей. Скажем, набор скрепленных линеек, угломерных инструментов, часов. Даже если их нет, их всегда можно *домыслить*, вообразить, когда речь идет о движении. Так мы и делали раньше, рассуждая о падающих камнях и летящих копьях. Так будем делать и впредь — и часто с большей определенностью и конкретностью.

Сказанное сейчас дает пищу для сложных и глубоких раздумий. Мы займемся ими позже, в следующих частях этой книжки. Но самые существенные особенности систем отсчета, их связь с законами движения надо отметить сразу.

Инерциальность и неинерциальность

Представьте себе огромную кастрюлю, парящую где-то в космосе далеко от планет и звезд. Может быть, это внутренняя полость фантастической «летающей тарелки».

Иллюминаторы задраены. Нет никаких возможностей посмотреть изнутри на небо, увидеть усыпанную звездами небесную сферу.

Вы внутри этой кастрюли. Обутые в башмаки с намагниченными подошвами, шагаете по жестяному дну. И имеете следующее научное задание: установить ускорение либо вращение кастрюли или доказать, что то и другое отсутствует.

Поразмыслив, вы, я думаю, решите заданную задачу.

Можно сделать, например, так: нарисовать на дне идеальную прямую (скажем, с помощью светового луча) и бросить вдоль нее копьё. Так вот, если копьё, летя по инерции, будет с неизменной скоростью точно следовать нарисованной прямой линии, наша кастрюля не вращается и не испытывает ускорений.

Если же брошенное копьё куда-то свернет от прямой, закружит, разгонится или затормозится, резонно заключить, что «на самом деле» вращается и ускоряется кастрюля.

Логика умозаключений тут основывается на первом законе механики, на признании инерции. Выводы выглядят вполне разумными (до некоторого предела, впрочем, который в своем месте — еще очень не скоро — будет отмечен). И здесь четко проступает роль системы отсчета в изучении движения.

Теперь важное определение. Постарайтесь его запомнить.

Кастрюля, которая после опыта с копьём выглядит невращающейся и неускоряющейся, плюс часы, по которым зафиксировано постоянство скорости копьё, есть пример *инерциальной* системы отсчета. В ней движение по инерции равномерно и прямолинейно. Значит, исполняется первый закон Ньютона.

Все остальные системы отсчета физики называют *неинерциальными*.

Опыт Леона Фуно

За неинерциальной системой отсчета совсем не обязательно отправляться в космос. Не требуется никаких межзвездных кастрюль и «летающих тарелок». Можно

остаться на Земле, пойти в городской сад и покататься на «колесе смеха» — горизонтальном скользком вращающемся диске. Вы на себе почувствуете неинерциальность системы отсчета, связанной с диском, — очень быстро окажетесь отброшенным прочь от центра вращения.

Можно поехать в Ленинград и посетить Исаакиевский собор. Там ясно видно, что и система отсчета, связанная с Землей, тоже неинерциальна.

Дорого бы дал Галилей за идею опыта, поставленного в 1851 году французским физиком Леоном Фуко. На протяжении нескольких минут этот опыт просто и наглядно доказывал то, что великий итальянец стремился доказать всю жизнь — вращение земного шара. Теперь знаменитый эксперимент Фуко постоянно демонстрируется в Исаакиевском соборе.

На длинном (98 метров) подвесе раскачивается массивный шар. В каждом качании он летит из края в край обширного помещения над полом, расчерченным четкими прямыми линиями. Маятник Фуко — вроде копыя, которое мы с вами швыряли в космосе. Разгоняется он, правда, земным тяготением, но благодаря инерции сохраняет плоскость своих колебаний. Земля же, медленно поворачиваясь, сдвигает из-под нее пол собора. Летящий шар чуть-чуть сворачивает от прямых линий, начерченных на полу. Через две-три минуты накапливается весьма заметное отклонение.

Простейший вывод: Земля вертится.

Более тонкий вывод: система отсчета, связанная с земным шаром, неинерциальна.

Но справедливы ли в этом случае уравнения механики? Можно ли применить формулу второго закона? Действуют ли на маятник Фуко (или лучше все-таки на наше «космическое копые» — дабы не мешало притяжение Земли) какие-то силы?

Да. Пусть второй закон торжествует: раз есть ускорения, значит, есть и силы. Эти силы, под влиянием которых наше копые «само» ускоряется, тормозится, сворачивает вбок в неинерциальной системе отсчета, принято называть *силами инерции*.

С такой точки зрения на колесе смеха вы оказались во власти *центробежной силы инерции*. Она-то и согнала вас с диска. А маятник Фуко был подвержен *силе*

инерции Кориолиса (по имени физика, который ее впервые изучил). Она действует на тела, *движущиеся* во вращающейся системе отсчета. Благодаря ей маятник Фуко и смещает в такой системе плоскость своих качаний.

Конечно, вы можете покинуть вращающуюся Землю и рассматривать качания маятника Фуко в какой-то не вращающейся, инерциальной системе отсчета (для малых промежутков времени в качестве ее опоры годится хотя бы Луна). Тогда вы вправе заявить, что смещения пола собора вызваны никакими не силами, а именно вращением земного шара. Однако этот бесспорный факт не делает силы инерции фиктивными, что иногда неосторожно говорят. Коль уж явление разыгрывается в неинерциальной системе отсчета, силы инерции присутствуют обязательно и бывают порой очень эффективны — скажем, рвут на части быстро вращающийся маховик.

Видите: «пассивное непослушание», каким выглядело свойство инерции в инерциальной системе отсчета, для неинерциальной обернулось активным действием.

И еще. Обратите, пожалуйста, внимание на существенную деталь: силы инерции в равной мере ускоряют тела разной массы. Когда над дном нашей вращающейся и ускоряющейся «космической кастрюли» летят рядом свободно брошенные ядро и пуля, пути их и скорости меняются относительно кастрюли совершенно одинаково. При взгляде извне это ничуть не удивительно. Ведь кастрюля-то одна, она вращается или ускоряется одинаково и для ядра, и для пули. Все же подмеченный сейчас факт очень многозначителен. В нем раскрывается некое (пока чисто формальное) сходство между инерцией и тяготением (тяжесть столь же «равнодушна» к массам тел, когда сообщает им ускорение). Придет время, об этом сходстве мы поговорим подробнее и поподробнее.

Действие без противодействия

И, наконец, самое, на мой взгляд, странное качество сил инерции. Это единственный вид сил, не подчиняющийся, оказывается, третьему закону Ньютона. Когда брошенное копьё сворачивает в сторону от прямой, проведенной по дну вращающейся «кастрюли», оно не вос-

принимает никакого противодействия, потому что ни с чем как будто не связано.

Тут стоит вспомнить, что в прошлом веке австрийский физик Эрнст Мах сделал на этот счет одно очень заманчивое предположение. Вот что он допустил (без всякого доказательства): через свойство инерции любое тело соединено какими-то невидимыми «нитями» или «пружинами» со всей, пусть даже безмерно удаленной, материей Вселенной. Бесчисленные звезды — это, как говорил Мах, «не бумажные фонарики». Разбросанные тут и там в безграничном мире, они каким-то способом сообща действуют на каждую звезду или планету, на каждый камень, копьё, пушинку — и заставляют их хранить покой или равномерное прямолинейное движение относительно инерциальных систем отсчета.

Или, если хотите, сообщают им ускорения в неинерциальных системах, порождая силы инерции.

Окажись этот «принцип Маха» справедлив, силы инерции стали бы подчинены третьему закону механики. Как и все прочие силы. Действие звезд на копьё — вот что сдвигало бы его с прямого пути в неинерциальной системе отсчета. И вся материя мира поворачивала бы плоскость качаний маятника Фуко над полом Исаакиевского собора. Наоборот, копьё, «привязанное» принципом Маха к звездам, оказывало бы при ускорениях противодействие на звезды.

Выходит, бросая мяч, вы толкали бы в обратную сторону всю Вселенную? Вроде того. Это, пожалуй, приятно — быть в силах толкнуть весь мир!

Но я снова вынужден предостеречь своих читателей от поспешности. Верен или неверен принцип Маха, можно будет судить только в самом конце этой книжки. Все-таки я не стерплю и уже сейчас скажу вам: увы, в современной науке принципу Маха места пока не нашлось. Надеюсь, это признание не охладит читательский интерес. Я ведь старался, чтобы сильнее всего вы удивились не инерции, а тяжести. Чуду падающих ядер и пуль, пушинок и сосулков. Именно от этого удивления нам предстоит попытаться убежать.

Таким образом, об основаниях классической механики сказано уже довольно много. Разобрано поведение падающих тел, объяснены все три закона, отмечены некоторые тонкости.

Пора кое-что сказать о конкретных делах ньютоновской механики, о ее замечательных достижениях в объяснении природы.

Глава 4. МОГУЩЕСТВО МЕХАНИКИ

Дорога в школу

Я думаю, древнегреческие школьники были ничуть не глупее современных пионеров, даже из числа отличников. И учителя у них были, быть может, неплохие. Вся разница в уровне знаний. Учителя помнили слова своих учителей, которые еще очень мало знали, еще не умели смотреть в глубь вещей.

Видя быстро летящее копьё, заброшенное сильной рукой, хотелось сказать, что сила рождает скорость. Так и говорили, и учили, и заучивали. А это была ошибка, ибо сила дает не скорость, а ускорение.

Видя лист, падающий медленнее шишки, обобщили это на все тела и объявили, что тяжелое падает быстрее легкого, — снова ошибка.

Видя восходящее и плывущее по небосводу Солнце, уверовали, что оно кружится вокруг Земли. Так и записали в священных книгах, а потом, спустя века и тысячелетия, гнали в тюрьмы и на костер несогласных и прорливых.

Ошибки громоздились друг на друга, сбивали с толку, путали мысли, вживались в сознание. Из этих ошибок, освященных религией, авторитетами, традициями, строилось представление о мире — очень наивное, неверное, непохожее на наше. С такой «моделью мира» было трудно искать истину даже людям умным и талантливым.

И все-таки от года к году, от века к веку копились крупинцы истины. И вспыхивали открытия. Рождались, учились, поднимали головы гениальные первооткрыватели. Их мудрость — мудрость Коперника, Галилея — вырастала в стройную систему науки. Пробил час — и прозвучал голос Ньютона, подарившего человеку новое зрение — физику, охватившую весь необозримый мир.

Знание, в отличие от искусства, не бросается в глаза. Оно всегда неприметно, скрыто в скромных словах

или сухих строках формул. Вероятно, поэтому на уроках физики мы редко удивляемся откровениям ньютоновских законов. И напрасно. В учении Ньютона все, с начала до конца, достойно удивленного восхищения.

Земля и небо

Классической механике подвластны разнообразнейшие силы. Тянут железо магниты, отталкиваются от дороги колеса автомобиля, ударяются, расходясь в стороны, бильярдные шары — все это неукоснительно подчиняется законам Ньютона.

Но раз уж мы в этой книжке размышляем о падающих телах, побеседуем поподробнее об одной только силе тяготения.

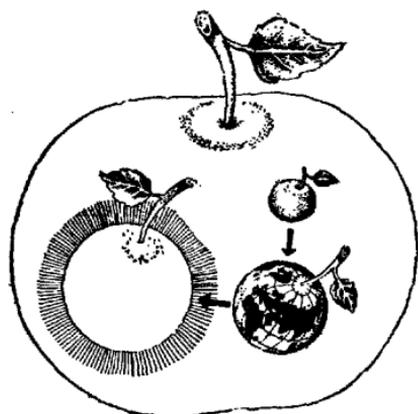
Я уже много говорил о ней, вездесущей и таинственной, вместе с вами доискался ее главной особенности — неизменной пропорциональности тяжелой массе тела, недоумевал по поводу ее странного «действия без прикосновения». Эта поразительная ее особенность остается для нас загадкой, которую на этих страницах еще рано пытаться разгадывать.

Но хоть мы не в состоянии объяснить, почему сила тяжести проникает через пустоту, нам пора задуматься над тем, *как* это происходит.

Сегодня всем известно: вдали от Земли тяжести нет. Это ясно каждому шестикласснику, это вошло в сознание из бесчисленных книжек, газетных статей, радиопередач. Во времена же Ньютона мир выглядел иным. О том, что сила тяжести не везде одинакова, лучшие умы могли только догадываться. Никаких опытов, свидетельствующих о ее уменьшении с высотой, не было. Наоборот, на башне и в подвале тяжелое ядро представлялось одинаково тяжелым.

И все-таки Ньютон, приглядевшись к перемещениям небесных тел, уверенно заявил: с увеличением расстояния от Земли тяготение убывает.

А как убывает? Быть может, на высоте облаков уже нет тяготения? Если верить упорной легенде, Ньютон ответил на это «как», созерцая в своем саду падающее яблоко. На самом деле, если и существовало это историческое яблоко, то, разумеется, не оно одно навело



великого физика на его открытие. Были и другие, куда более существенные подсказки: замечательные идеи и вычисления Галилея, прозорливые слова Кеплера и математические закономерности, подмеченные им в движении планет, нескончаемые размышления самого Ньютона об инерции, массе, падении тел.

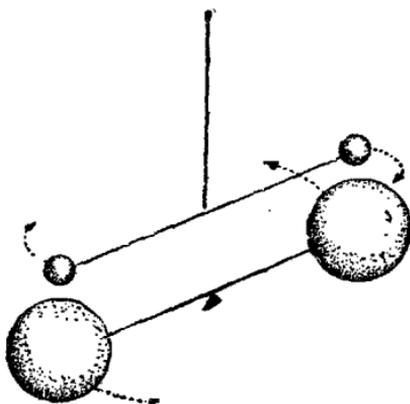
Догадка эта даже сегодня не может представиться легкой и естественной. Если она и проста, то наверняка гениальна. Сила тяготения F пропорциональна массам притягивающихся тел m_1 и m_2 , но она убывает тем сильнее, чем больше становится квадрат расстояния между центрами притягивающихся масс r^2 . Именно квадрат! Не просто расстояние, не куб его, а квадрат. И именно между центрами масс. Дело происходит так, как если бы вся масса каждого тела была сосредоточена в бесконечно малом объеме — в точке, совпадающей с центром тяжести. Понять и обосновать это Ньютону стоило больших трудов.

Такова сущность замечательного ньютоновского открытия, которое вскоре стало знаменитым и получило название закона всемирного тяготения.

Вот формула:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Символ γ означает «постоянную тяготения» — множитель пропорциональности, уравнивающий обе части равенства. Физический его смысл прост — это сила притяжения двух тел массой по грамму, находящихся в сантиметре друг от друга. γ можно узнать из эксперимента: измерить эту силу,



заставив притягиваться два шарика с массой по грамму, подвешенных рядом на тонких нитях в сантиметре друг от друга. В таком грубом опыте, правда, никакого измерения не получится — граммовые шарики притягиваются ничтожно слабо. Успех здесь принесен другим, более тонким опытом, выполненным английским физиком Кавендишем.

Всемирный закон на столе

Кавендиш тонко задумал и исполнил свой эксперимент.

В тщательно откачанном стеклянном баллончике висит на тоненькой нити легкое коромысло со свинцовыми шариками на концах. Перед ними укреплены большие свинцовые шары. Таким образом, коромысло с маленькими шариками обладает незначительной массой (стало быть, и инерцией), а сила притяжения крупных шаров достаточно велика. В результате совместные усилия двух шаров чуть-чуть сдвигают коромысло. Маленькие шарики с еле заметным ускорением «падают» на большие. Нить слегка закручивается. Но на ней подвешено легонькое зеркальце, отражающее световой луч. Где-то далеко, на стене лаборатории, укреплен экран с делениями, по которому скользит световой зайчик от луча, отраженного зеркальцем. И поэтому почти неуловимое закручивание нити заставляет световой зайчик перемещаться по экрану.

Так закон всемирного тяготения был впервые проверен в лаборатории. По смещению светового зайчика Кавендиш рассчитывал силу притяжения шариков. Меняя их массы, ученый доказал справедливость того, что записано в числителе формулы закона тяготения: пропорциональность силы обоим тяготеющим массам. А варьируя расстояние между шарами, он подтвердил обратную пропорциональность силы притяжения именно квадрату расстояния. Но главное, что он узнал, — это значение постоянной γ . Ведь и массы, и силы, и расстояния были измерены — осталось вычислить постоянную тяготения.

Она оказалась равной $6,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{сек}^2}$.

Дальше следует феерический фонтан волшебства ньютоновской механики.

Взвешиваем планету

Что бы такое взвесить поудивительнее? Хотите Землю? Пожалуйста! К вашим услугам формула всемирного тяготения. Вместо Земли можете положить на весы яблоко. Получилось сто граммов. Это масса яблока $m_{\text{я}}$. На весах и гирях всегда проставлены именно единицы массы.

Чтобы получить силу тяготения F , вспоминаем второй закон Ньютона и массу яблока множим на земное ускорение g , то есть $100 \text{ г} \cdot 981 \text{ см/сек}^2$. Это вес. Рискую показаться навязчивым, я напомним, что когда-то мы определяли его как давление тела на опору, потом — как силу тяготения, исходящую от центра масс Земли и приложенную к телу. Разумеется, яблоко, притягиваемое Землей, давит на опору. В свою очередь, опора давит на яблоко — исполняется третий закон. А потому между яблоком и опорой мы вправе поместить пружину. Она сожмется тем сильнее, чем сильнее тяготение. Вот мы и измерили с помощью весов земное притяжение.

Знаете радиус Земли? Напомню — 6300 километров, или $6,3 \cdot 10^8 \text{ см}$ (перед вычислением все величины нужно свести к одной системе единиц).

$$\begin{aligned} \text{Теперь можно вычислить. Масса Земли } m_3 &= \frac{Fr^2}{\gamma m_{\text{я}}} = \\ &= \frac{100 \text{ г} \cdot 981 \text{ см/сек}^2 \cdot (6,3 \cdot 10^8 \text{ см})^2}{6,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2 \cdot 100 \text{ г}} = 6 \cdot 10^{27} \text{ г} = 6 \cdot 10^{21} \text{ тонн.} \end{aligned}$$

Подсчитали? Загляните в энциклопедию — масса Земли именно такова.

Вот и свершилось волшебство — по весу яблока определена гигантская масса планеты.

Это вас не восхищает?

Без весов

Пожалуй, будет лучше, если внимательный читатель вместо восхищения поймает автора за рукав и сделает ему замечание: по формуле закона всемирного тяготения массу Земли можно было определить и без взвешивания яблока. Ведь если вес яблока $F = m_{\text{я}}g$, а r —

земной радиус, то масса Земли $m_3 = \frac{m_{\text{я}}gr^2}{\gamma m_{\text{я}}} = \frac{gr^2}{\gamma}$. Мас-

са яблока в числителе и знаменателе сокращается. Формула открывает удивительную возможность взвешивать Землю вообще без всяких весов — по постоянной тяготения и величине ускорения силы тяжести.

Если вы забыли значение g , покараульте с секундомером в руках возле какой-нибудь яблони, засекайте время, за которое очередное яблоко пролетело с ветки до земной поверхности, потом измерьте высоту ветки, по галилеевской формуле $S = \frac{gt^2}{2}$ (из первой главы этой книжки), подсчитайте g и вставьте в только что выведенную формулу $m_3 = \frac{gr^2}{\gamma}$. Через минуту вычислений вы узнаете, во всей ее огромности, земную массу. Узнаете количество вещества своей планеты! Недаром Кавендиш, который, разумеется, превосходно помнил значение g , назвал свой исторический эксперимент, позволивший впервые вычислить постоянную тяготения γ , «взвешиванием Земли». Он узнал γ и сразу подсчитал, какова масса земного шара.

Этим уже стоит чистосердечно восхититься.

Да, падающее яблоко многое могло подсказать наблюдательному Ньютону.

На вышине

Догадываетесь, в чем секрет замечательного умения, которым вы овладели вслед за Ньютоном и Кавендишем? Секрет в том, что использовано равенство тяжелой и инертной масс: ведь в числителе формулы стояла инертная масса из второго закона Ньютона, а в знаменателе — тяжелая масса из закона всемирного тяготения. Мы их сократили и были вправе сделать это только потому, что они не в состоянии «переспорить» друг друга, или, иначе говоря, только потому, что все тела падают одинаково быстро.

Так из явлений маленьких, ежеминутно происходящих на наших глазах, вырастают закономерности широчайшего охвата. Не в отвлеченном рассуждении, не в расплывчатой фразе, а в конкретном деловом расчете физик совмещает песчинку с планетой.

Предсказания Ньютона широки и многообразны.

Вы хотите узнать, сколько будет весить килограммовая буханка хлеба на вершине Монблана? Пожалуйста, используйте формулу всемирного тяготения. Получится 997 граммов. Пожелали выяснить значение ускорения силы тяжести на высоте орбитального полета Гагарина — та же формула даст вам ответ. Прделайте вычисления, и вы убедитесь, что оно там уменьшится незначительно — всего на одну шестнадцатую часть. На столько же уменьшился бы и вес. Это неожиданно для наивных людей, полагавших, что спутники невесомы из-за удаления от земного шара.

Боюсь, самым любопытным из читателей уже захотелось взвесить Солнце.

А почему бы и не взвесить?

Взвешиваем Солнце

Это весьма просто. Расстояние до Солнца спросим у астрономов. Они скажут: 150 000 000 километров. Кроме того, мы знаем, что Земля падает на Солнце, хоть и не может упасть.

Об этом странном факте нелишне поговорить поподробнее, пользуясь законами Ньютона.

Благодаря своей инерции Земля постоянно стремится улететь от Солнца по прямой (первый закон Ньютона). Вместе с тем Земля испытывает солнечное притяжение (закон всемирного тяготения) и приобретает ускорение, направленное к Солнцу (второй закон Ньютона). Эти два движения складываются — получается вечное обращение Земли вокруг Солнца.

Стоит напомнить, что свободное падение отнюдь не обязано быть отвесным. Пуля, вылетевшая из дула пистолета параллельно земной поверхности, приближается к ней так же быстро, как и пуговка, упавшая со стола. Земля как пуля. Она не отвесно падает на Солнце.

Каково же ускорение падающей Земли?

Длину земной орбиты подсчитать проще простого. Эта орбита — круг радиусом 150 миллионов километров. Помножьте радиус на «два пи» (6,28) — выйдет миллиард километров. Время — 365 суток, год нашей жизни. Отсюда нетрудно подсчитать, что за секунду Земля успевает пролететь 30 километров по своей орбите и одновременно

упасть к Солнцу на три миллиметра. По формуле Галилея $S = \frac{a_c t^2}{2}$ сразу же получаем значение ускорения Земли к Солнцу: $a_c = 0,6 \text{ см/сек}^2$. Маловато, конечно. Но зато мы можем не опасаться катастрофического столкновения со своим жарким светилом.

Масса Солнца теперь выясняется автоматически: $m_c = \frac{a_c r^2}{\gamma} = 2 \cdot 10^{27}$ тонн. Обратите внимание, на этот раз нам не понадобилась масса Земли. Достаточно было знать ускорение ее падения на Солнце. Любое тело, находящееся на земной орбите, будет падать к Солнцу с тем же ускорением — $0,6 \text{ см/сек}^2$. Так в астрономическом масштабе продолжает действовать постоянство ускорения свободного падения для тел каких угодно масс. Явление, которое мы подметили на сосульках, падающих с карниза!

Ангелы-бездельники

От Солнца переходим к планетам.

Было время, когда неглупые люди всерьез полагали, что планеты все время подталкиваются ангелами, потому-де они и движутся. На каждую по ангелу.

Как следует из ньютоновских законов, ангелы эти — бездельники. Планеты великолепно обходятся без них: по инерции летят прямо, а влекомые солнечным тяготением, падают на светило. В результате сложения этих двух движений планеты сворачивают с прямого пути и движутся по эллипсам — так называют в геометрии **фигуры**, похожие на овал.

Сумма расстояний точек эллипса от двух точек, лежащих внутри фигуры и называемых фокусами, постоянна (это геометрическое определение).

В одном из фокусов всегда находится Солнце. Это знал еще Кеплер. Если же фокусы совпадают, получается круг. Многие планеты (в их числе наша Земля) движутся по почти точным кругам.

Ньютон разработал тонкий математический метод для вычисления планетных путей и решил с его помощью массу трудных задач.

Удалось найти зависимость периодов обращения

двух разных планет (длительность «годов») от близости планет к Солнцу. Кубы наибольших расстояний планет, на которых они оказываются в своем движении вокруг Солнца, пропорциональны квадратам их «лет». И эта особенность, гениально угаданная Кеплером, нашла подтверждение в строго обоснованной теории Ньютона, который, однако, внес уточнение — зависимость от масс планет.

В разных местах эллипса движение неодинаковое: с приближением к Солнцу оно ускоряется, с удалением от Солнца — замедляется. Как меняется скорость, заметил тот же Кеплер (радиус, проведенный от планеты к Солнцу, в равные промежутки времени «выметает» одинаковые площади). А Ньютон дал доказательство.

В конце концов удалось составить подробнейшее «небесное расписание» движения планет. И — ни одного ангела! Или, как заметил один физик, должность ангела занимает само Солнце.

Вообще пополушанне

Расписание исполнялось с отменной точностью. Планеты следовали по орбитам с предсказанной скоростью, их уверенно находили в предсказанных местах неба. В назначенные часы, минуты и секунды происходили восходы, заходы, противостояния, затмения Солнца и Луны. Солнечная система голосовала за механику Ньютона, за всемирное тяготение.

Единственное исключение — одна малая особенность в движении Меркурия, не уложившаяся в предсказания ньютоновской небесной механики. Об этом пойдет речь далеко впереди.

А как обстояло дело за пределами Солнечной системы? Послушны ли Ньютону звезды?

Да, послушны. Этот ответ был получен наукой уже после смерти великого физика, когда развилась звездная астрономия.

Особенно красноречивы многолетние наблюдения так называемых двойных звезд, тех, что находятся по соседству и медленно кружатся одна вокруг другой. Есть убедительный документ, свидетельствующий о том, что

этот звездный вальс точно следует ньютоновскому закону — фотографии взаимного расположения звездной пары Сириус *A* — Сириус *B*, сделанные на протяжении одного почти полного оборота этой пары — с 1862 до 1904 года. Чертеж орбиты Сириуса *B* — это типичный эллипс. И звезда путешествует по нему именно так, как назначено ньютоновской небесной механикой: чем дальше от Сириуса *A*, тем медленнее движется Сириус *B*. Возле фокуса он за шесть лет успевает пробежать такое же расстояние, какое вдали от фокуса преодолевает за шестнадцать. Это как раз и требует теория тяготения!

Шагнем дальше в ширь Вселенной. Слушаются ли Ньютона целые звездные города?

В нашей Галактике ученые отыскивали изумительно красивые звездные рои — шаровые скопления. Чем ближе к центру скопления, тем больше звезд. Но даже в глубоких недрах его, где на фотографии получается сплошной белый фон, звезды настолько далеки друг от друга, что сталкиваться не могут. Они всегда действуют друг на друга только тяготением. Поэтому скопления и круглы — центральные области притягивают периферийные. Та же причина сделала шарами нашу Землю, Солнце и все планеты.

Даже в галактиках — необозримых скопищах звезд и звездных систем — астрономы находят явные следы мощного тяготения. Оно действует даже в фантастически гигантских скоплениях галактик, пронизывает всю Вселенную.

На кончике гусиного пера

Самый яркий эпизод торжества идей Ньютона относится к первой половине прошлого века.

Тогдашние астрономы никак не могли втиснуть в рамки ньютоновской теории движение Урана, недавно открытой и самой дальней из известных в ту пору планет. Уран двигался, в общем, так, как требовало «расписание», но в тонкостях нашлись непонятные отклонения. Планета немножко выходила из назначенного курса, слегка искривляла эллипс своей орбиты. Чтобы объяснить эти особенности, астрономы учли в расчетах

не только солнечное притяжение, но и тяготение соседних с Ураном планет-гигантов Юпитера и Сатурна. Тем не менее все странности поведения Урана не удалось объяснить. Значит, Ньютон не прав? Его механика в чем-то грешит?

Положение сложилось драматическое.

И вот двое ученых — англичанин Адамс и француз Леверье — независимо друг от друга сделали предположение, которое витало в воздухе и напрашивалось само собой: а нет ли за Ураном еще одной планеты — очень далекой, слабо светящейся и потому еще не замеченной?

Опять закрипели перья, выписывающие уравнения небесной механики.

Теперь их спрашивали: где искать неведомую планету, вызвавшую возмущения в движении Урана? Уравнения дали свой математический ответ: в такие-то моменты времени загадочная планета должна находиться в таких-то местах неба.

Леверье и Адамс послали расчеты в несколько обсерваторий. И когда астрономы-наблюдатели направили телескопы так, как посоветовали их корреспонденты-теоретики, планета действительно нашлась. Маленькая, едва заметная. Ей дали имя Нептун. И отпраздновали знаменательную победу теории тяготения. Это было в 1846 году.

Спустя 84 года при таких же примерно обстоятельствах американцу Томбо удалось открыть самую далекую из наших планет — Плутон.

На кончике авторучки

Совсем недавно, в 1964 году, произошло еще одно удивительное событие. Уравнения небесной механики помогли американскому астроному Ван де Кампу понять причину ничтожных колебаний *Летающей звезды*



Барнарда — одной из ближайших к нам звезд, названной так за свое быстрое движение.

Казалось бы, раз где-то в космосе летит звезда, так уж пусть она летит по инерции прямо — как велено первым законом Ньютона. А она «болтается». Правда, чуть-чуть — за год на десять угловых секунд, самое большое. Но и этого достаточно, чтобы взяться за вычисления.

Подробная расшифровка колебаний привела к замечательному и долгожданному успеху: впервые с полной достоверностью было доказано существование планеты, вращающейся вокруг далекой звезды. Эта планета, действуя своим тяготением на звезду, заставляет ее мчаться не по прямому, а по слегка волнистому пути.

Ван де Камп выведal немало подробностей о невидимом спутнике звезды Барнарда. Он весьма массивен — в полтора раза тяжелее нашего Юпитера (а Юпитер в 318 раз тяжелее Земли). Путь спутника — довольно вытянутый эллипс. Самое большое расстояние его от звезды Барнарда — 660 миллионов километров. Год — в 24 раза дольше нашего.

Анкета, как видите, получилась довольно полная.

И все это сказано про небесное тело, которое никто никогда не видел и, быть может, не увидит. Такова проницательность науки. Той самой науки, которая началась с опытов Галилея, бросавшего ядра и пули с Пизанской башни. Ведь спутник звезды Барнарда тоже «падает», и по тем же законам!

Впрочем, тут особенно ясно, что и звезда падает — это ее падение ведь и выдало таинственного спутника, показало, что она не одинока. Так и должно быть: звезда тянет спутник, который, в свою очередь, тянет звезду. Действие равно противодействию.

Но видя Луны

Есть анекдот. На экзамене профессор спрашивает студента:

— Вы видели Луну?

— Нет! — поспешно отвечает студент, мечтающий избавиться себя от новых вопросов.

Но даже если бы хитрый студент и в самом деле ни разу в жизни не поднял глаз на Луну, все равно он мог бы немало узнать о ней. По той же самой причине, по которой Ван де Камп открыл и описал невидимый спутник звезды Барнарда.

Важно то, что падает не только Луна, но и Земля. Обе они, влекомые тяготением, стремятся к общему центру масс.

Какие же события вызываются на Земле ее падением на Луну? Очень заметные и существенные. Прежде всего приливы и отливы.

На вопрос: «Почему бывают приливы и отливы?» — часто отвечают: «Очень просто, воду океана притягивает Луна». Считают так: под Луной на океанской поверхности вырастает огромный водяной горб, а так как Земля под Луной вращается, то горб этот перемещается, дабы все время оставаться «подлунным», и набегает в конце концов на берег. Согласны?

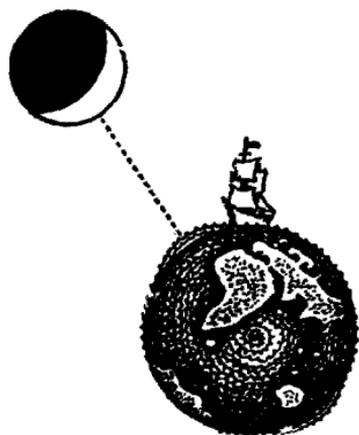
Ответ неверен. Если бы дело происходило так, то приливы и отливы наступали бы всего один раз в сутки. А они бывают дважды в сутки.

На самом деле водяных горбов на поверхности Мирового океана два — первый действительно под Луной, а второй в диаметрально противоположной стороне. И вершина второго направлена от Луны. Оба горба сохраняют свое положение в пространстве, а Земля кружится, вот и выходит, что приливная волна дважды в сутки заливают берега.

Но почему же все-таки горбов два, а не один? И почему второй словно бы отталкивается от Луны?

Никакого отталкивания нет. Причина этого явления в том-то и состоит, что Земля вместе с Мировым океаном непрерывно падает в сторону Луны, хоть и не может «упасть», так же как и Луна не может упасть на Землю. Прямо под Луной лунное притяжение сильнее (потому что там океан ближе к Луне) и, значит, больше ускорение падения. «Подлунный» горб падает быстро. А с обратной стороны Земли океан на двенадцать тысяч километров дальше от Луны, там ее тяготение слабее, и вода отстаёт в падении.

Здесь я задам вам проверочный вопрос (из числа довольно трудных — на нем иногда проваливаются даже студенты-физики).



Кроме лунных, по океану бежит еще пара приливных горбов, рожденных притяжением Солнца. Они гораздо меньше, чем лунные. Почему?

Вертится на языке фраза: потому, что Солнце притягивает воду океанов *слабее*, чем Луна. Так и говорят иные незадачливые студенты на экзаменах, огорчая терпеливых экзаменаторов, ибо ответ этот грубо ошибочен. Солнце влечет к себе Землю (и все, что на ней есть, в том

числе и океаны) неизмеримо *сильнее*, чем Луна. Ведь не вокруг Луны, а именно вокруг Солнца обращается наша планета.

А невелики солнечные приливные волны на Земле потому, что наше светило очень уж далеко — в 150 миллионах километров. В пять с лишним тысяч раз дальше, чем Луна.

Это значит, что земной диаметр по сравнению с расстоянием до Солнца ничтожно мал. Следовательно, весьма незначительна и разница в силе солнечного тяготения по ту и другую сторону нашей планеты. Другими словами, на дневной и ночной сторонах Земли вода океана падает к Солнцу с очень близкими ускорениями. Поэтому и невелики солнечные горбы.

Все дело, как видите, в том, что по сравнению с расстоянием Земля — Луна наша планета довольно велика, а по сравнению с расстоянием Земля — Солнце мала. Для солнечного тяготения Земля — точка, для лунного — отнюдь не точка. Вот и ответ на хитрый экзаменационный вопрос.

Вообще, подробная картина приливов получается довольно сложной и запутанной. Но для понимания ее не требуется ничего, кроме знания ньютоновской механики, теории тяготения и, конечно, карты береговой линии материков.

Есть, кстати сказать, и приливы суши, потому что земная кора не абсолютно тверда.

Глава 5. ЗОРКИЙ МАЯТНИК

Открытие в соборе

Формулы Ньютона отлично действуют «на земле, в небесах и на море». Этого мало. Они сохраняют свою власть и под землей.

Зная теорию тяготения, человек смотрит через планету, в глубь земных недр. И «глаз» для такого необыкновенного зрения самый простой из всех физических приборов — маятник.

Давно пора нам поподробнее поговорить о маятнике. Он сыграл и продолжает играть почетную роль в науке.

Помните, в третьей главе шла речь о маятнике Фуко? Благодаря инерции он сохранял плоскость качаний и доказал тем самым вращение Земли.

А вот другая примечательная особенность маятника. Ее первым подметил все тот же неутомимый Галилей.

Тогда он был еще студентом. Посещал, как положено, богослужения в Пизанском соборе. И во время скучных месс развлекался разглядыванием массивных бронзовых люстр. Они были красивы, эти люстры, ибо сработаны самим Бенвенуто Челлини. Но особенно любопытно было наблюдать их мерные покачивания после того, как служитель, зажигавший свечи, ненароком толкал их своим длинным шестом.

Во время богослужений, молитвенно обратив лицо к своду собора, можно было без помех наблюдать за качаниями люстр. И Галилео подметил: люстра качается, строго соблюдая ритм. Размахи происходят в одинаковое время. Правда, у Галилео, по обыкновению, не было часов, да и неловко было бы в соборе то и дело смотреть на них. Все-таки он умудрился измерять время — по ударам своего пульса. Так Галилей сумел поставить физический опыт в церкви. Нашел и объект эксперимента, и измерительный прибор — собственное сердце.

Еще характерный штрих: открыв странную особенность маятника, он сразу же применил ее на пользу делу — устроил регистратор пульса, хороший инструмент для врачей. Это были, по существу, первые маятниковые часы, которых теперь так много на нашей планете.

Свойство, открытое Галилео, называют изохрон-

ностью. Период колебаний (время каждого полного размаха T) зависит у математического маятника (тяжелого тела, качающегося на легкой нити) только от длины нити, точнее — от квадратного корня длины (\sqrt{l}). Масса же груза может быть любой. Эту закономерность знал уже Галилей. А полную формулу вывел голландский ученый Ганс Христиан Гюйгенс, последователь Галилея и современник Ньютона.

Вот эта формула:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Вы спросите: а при чем тут теория тяготения и подземное царство?

Чуть-чуть терпения.

Соревнуемся с Галилеем

В формуле маятника под знаком квадратного корня в знаменателе красуется g — то самое ускорение свободного падения, о котором мы не раз говорили в этой книжке.

Это и понятно. Ведь маятник, когда качается, падает. Правда, не свободно, но падает. А никакое падение не обходится без g . И здесь оно поэтому налицо. Причем из качаний маятника его очень просто определить, и, что весьма приятно, без всякой спешки. Не надо бросать тел с Пизанской башни или катать отшлифованные шары по желобу. Достаточно сделать маятник (подвесить тяжелую гайку на длинной нити), тщательно измерить расстояние от точки подвеса до центра тяжести, чуть-чуть подтолкнуть его и сосчитать, сколько колебаний он совершит, скажем, за час.

Хорошо бы не прибегать во время опыта к современным секундомерам или хронометрам. Время лучше отмерить по самодельным солнечным часам (как их устроить, рассказано в школьном учебнике астрономии).

Если вы не поленитесь и исполните такой опыт, то перещеголяете самого Галилео Галилея. При помощи пустяковых подручных средств, которыми, конечно, располагал знаменитый основоположник эксперименталь-

ной физики, сумеете сделать то, что так и не смог сделать этот гениальный итальянец, несмотря на все свои старания: измерить значение g . Если будете аккуратны, то получите по крайней мере две первые цифры этой знаменитой физической величины (даже если используете для отсчета времени солнечные часы). А Галилей, катая по желобу свои шары, ошибся, измеряя g , в два раза!

Впрочем, не очень радуйтесь. Галилей ведь не знал, что g стоит под корнем в знаменателе правой части формулы маятника, а вы эту формулу получили прямо из рук Гюйгенса. Будет совсем хорошо, если вам захочется узнать, как она выводится,— для этого требуется немного, всего лишь заглянуть в учебник физики. Сделайте это. И очень советую вам поставить опыт. Лучше с пониманием дела повозиться над маятником и солнечными часами, чем без всякого понимания спать по готовой схеме транзисторный радиоприемник.

А теперь легко понять, как маятником заглядывают в земные недра. Причем заглядывают, не глядя в них!

Как Джо нашел клад

В давние времена кровожадные пираты на некоем необитаемом острове зарыли в землю клад — сто тысяч свинцовых сундуков, набитых награбленным золотом. Как водится, пираты потеряли карту с указанием места клада и от огорчения перерезали друг другу глотки. Знакомый сюжет? Много таких вам, наверное, попадалось, начиная с «Острова сокровищ». Я предлагаю новую идиллическую и научно-просветительную концовку.

Через пятьсот лет поселились на острове престарелый Джо (бравый моряк в отставке) и толстушка Кетти (его верная супруга). Джо построил уютный домик, промышлял рыбной ловлей, Кетти готовила пудинги и т. д. Все было бы хорошо, если бы не постоянные размолвки добрых супругов по поводу времени. У Джо был превосходный морской хронометр, у Кетти — не менее надежные кухонные ходики с маятником и кукушкой. И вот каждый день происходили диалоги:

— Эх, Джо! Твой хронометр опять отстал. Боюсь, пружина ослабла.

— Это твои ходики бегут невесть куда. За сутки на целую минуту!

В конце концов разногласия надоели. Джо отвез хронометр и ходики на материк. Отдал знакомому идеально честному часовщику, который почистил и смазал часы, а исправлять не стал: они оказались точными.

Но на острове вновь начался разнбой. Опять ходики опережали хронометр.

И Джо решил самостоятельно доискаться причины. Он сел за книги, обложился сочинениями Гюйгенса, Ньютона и, начитавшись, стал размышлять. «У хронометра,— думал он,— баланс с пружинкой и период его колебаний не зависит от силы тяжести. А у ходиков — маятник, качания которого зависят от поля тяготения в данном пункте земной поверхности...» Дойдя до этого места своих размышлений, Джо весело воскликнул:

— Ого! Дай-ка, женушка, лопату!

А получив лопату, полез в подвал под кухней, разобрал пол, несколько раз копнул землю — и наткнулся на огромный клад, тот самый штабель сундуков с золотом, что был зарыт пятьсот лет назад неизвестными пиратами. Судьба распорядилась так, чтобы дом счастливого семейства оказался как раз над кладом!

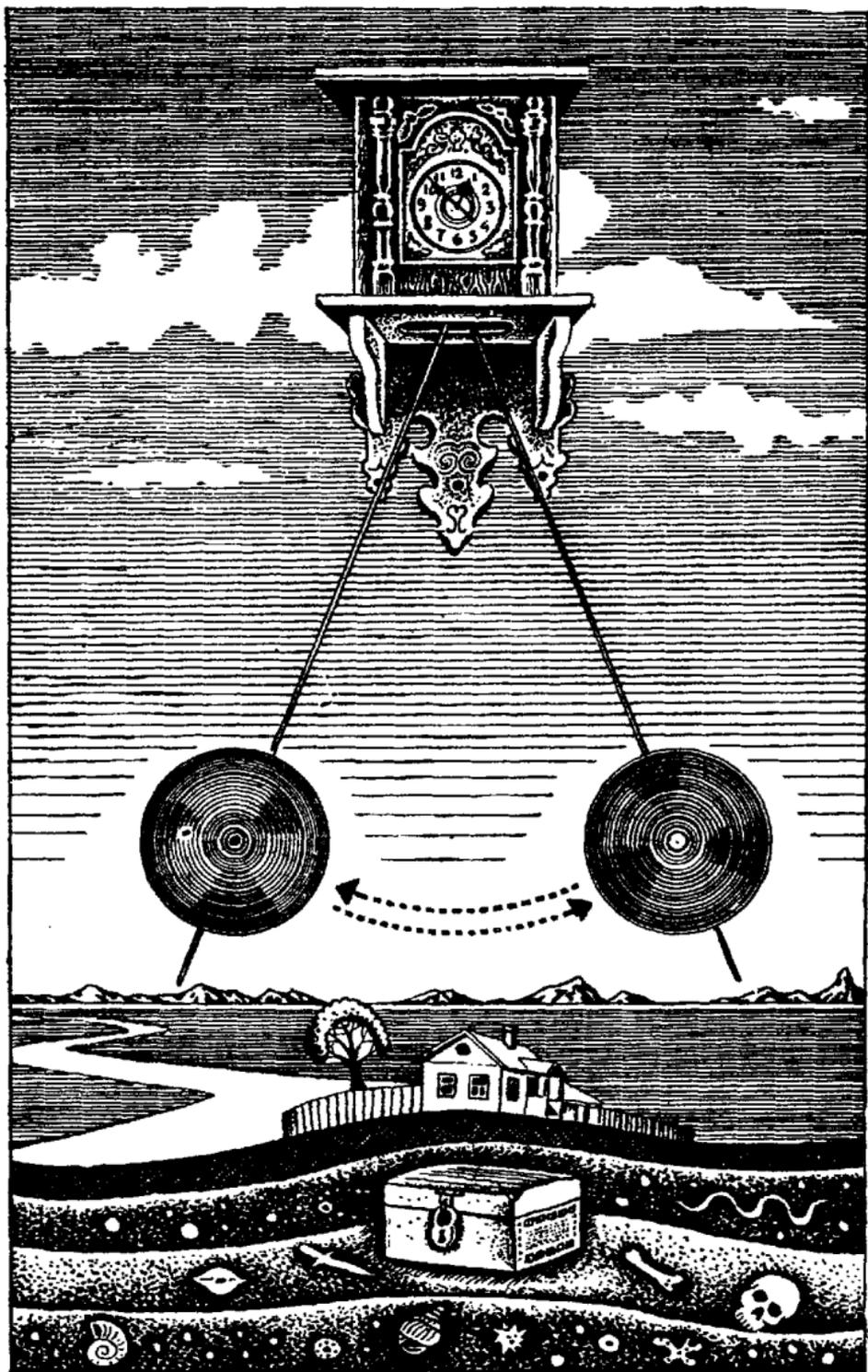
По-моему, конец неплохой. Тем более, что Джо и Кетти взяли себе совсем маленькую толику золота, а остальное пожертвовали в фонд развития науки.

Взгляд в недра

В чем тут дело — ясно. Золото плотное, масса его большая. Оно добавило свое маленькое притяжение к общей силе земного тяготения. И когда маятник ходиков оказался над кладом, то стал раскачиваться чуть-чуть чаще, чем в других местах. Ведь усиление поля тяжести увеличило ускорение падения, g над кладом стало чуть больше, и период качаний уменьшился. Усидчивый Джо это и сообразил.

Он мог бы, если бы захотел, не разрывая клада, узнать, сколько зарыто золота, — маятник помог бы подсчитать вызванную кладом добавку к силе тяжести и, стало быть, узнать его массу.

Самые дотошные читатели могут, сделав некоторые



допущения, выполнить соответствующий подсчет. В предыдущем разделе сообщены все условия задачи. Получится, конечно, что клад фантастически огромен.

Пиратские клады этим способом не ищут — они все-таки маленькие. Зато клады полезных ископаемых — сколько угодно.

Маятник отлично «видит», например, подземные озера нефти. Нефть имеет невысокую плотность, масса ее скопления сравнительно небольшая, поэтому маятник качается над ней чуть реже, чем над плотными породами — гранитом или базальтом.

Профиль планеты

И еще маятником удобно ощупывать фигуру Земли. Над тем местом, где планета «толще», g больше и качания маятника чаще. Наоборот, над «тонкими» местами Земли качания пореже. Так узнали, что под полюсами Земля тоньше, чем под экватором. Значит, она приплюснута.

Качая маятники над горами и долами, над болотами и пустынями, над морями и полями, ученые сумели нарисовать довольно подробно своеобразную фигуру Земли, которая, при ближайшем «рассмотрении» маятниками, оказалась вовсе не шаром. Для геометрической фигуры планеты математики придумали специальное слово (увы, без всякой лингвистической изобретательности) — *геоид*. Это означает просто «земной», «землеподобный».

А в последние годы в помощь неутомимым маятникам поставлены «небесные землемеры» — искусственные спутники. Вы, конечно, помните, что спутник, облетая планету, непрерывно на нее падает. И там, где поле тяжести сильнее (то есть Земля либо «толще», либо имеет крупные массивы плотных пород), спутник, падая быстрее, слегка опускается. А над «тонкими» или менее плотными участками земной поверхности, наоборот, поднимается, потому что падает медленнее. Вместо гладенького плавного эллипса получается орбита со множеством местных «возмущений». Ученые ими, однако, отнюдь не возмущены, а, напротив, довольны. Смотрят астрономы в небо, фиксируют приборами траекторию

космического скитальца и лучше узнают свою Землю. Потому что и земной «профиль», и внутреннее строение планеты как в зеркале отражаются в линии полета спутника.

Хочется вспомнить, что в такой же, по сути дела, «возмущенной траектории» падающего тела были зашифрованы до поры неведомые науке Нептун, Плутон, спутник Летящей звезды Барнарда... И вот теория тяготения выступила в роли рентгена Земли!

Что ждет Антарктиду

Под конец разговоров о маятнике — несколько слов про великолепное пророчество, которое недавно было сделано с помощью этого нехитрого прибора. Речь идет об интереснейшей и жизненно важной задаче, стоящей перед человечеством, — о грядущей судьбе ледника Антарктиды. Вопросы ставятся такие. Что происходит сейчас с этой гигантской ледяной глыбой, нависшей над Южным полюсом земного шара? Тает она или, наоборот, замерзает? И как это сказывается на уровне Мирового океана?

Если масса антарктического ледника увеличивается, океан будет постепенно мелеть, уровень его — понижаться, оставляя за высохшей прибрежной полосой бесчисленные морские порты. Уменьшение же ледника вызовет, наоборот, повышение уровня океана — прибрежным городам и портам станет грозить затопление. Пусть процесс этот долгод, исчисляется столетиями — все равно его надо разгадать, чтобы вовремя предотвратить угрозу.

И вот в Антарктиду явились геофизики. Во многих точках ледового материка провели тончайшие гравиметрические измерения: раскачивали маятники и измеряли ускорение силы тяжести. А спустя некоторое время, обработав и обсудив полученные результаты, пришли к выводу: антарктический лед тает. Медленно-медленно уменьшается масса ледника. Значит, климат Земли едва заметно теплеет и океан мало-помалу поднимается.

Это кажется колдовством: пришел в ледяную пустыню человек, покачал маятник — и предсказал буду-

щее не только этой пустыни, этого материка, но и всей планеты:

А логика рассуждений вот такая.

Колдованая логика

Прежде всего геофизики выяснили, что все материки как бы «плавают» в земной коре. Увеличивается масса материка — и он погружается глубже. Уменьшается масса — он всплывает, поднимается из земных недр. Этой проблеме было посвящено обширное и очень трудное исследование. После горячих споров ученые согласились с выводом, о котором я сказал.

Далее вообразим, что материки не меняют с течением времени своего веса — минуют века и тысячелетия, а их масса остается одинаковой. Тогда они не испытывают никакой «качки». Во всяком случае, вертикальных движений (погружений или всплытий) нет. И для такого нарочно упрощенного гипотетического случая удастся очень точно вычислить теоретическое значение ускорения силы тяжести в любом месте поверхности любого материка. Это и было сделано. Для разных точек «неподвижно плавающей» Антарктиды путем чисто кабинетных расчетов нашли значения g .

Следующий шаг — экспериментальные измерения g . Тут-то и получили слово маятники. Они сказали, каковы действительные значения ускорения силы тяжести на Антарктическом материке.

Затем последовало сравнение теории с опытом. И всюду в Антарктиде действительные значения оказались чуть-чуть больше, чем теоретические. Больше! Что это могло означать?

Раз больше значение g , значит, сильнее, чем «должно быть», поле тяжести. А поле тяжести увеличивается с приближением к центру масс Земли — так велит ньютоновский закон всемирного тяготения. Выходит, Антарктический материк погружен в земную кору глубже, чем если бы он был неподвижен — ведь именно для неподвижного материка были вычислены теоретические значения g . Вывод: Антарктида не неподвижна. Она движется. А как — вверх или вниз, всплывает или тонет?

Всплывает.

Если бы Антарктида погружалась, она стремилась бы к уровню равновесия сверху и пребывала бы выше этого уровня, то есть дальше от центра Земли. Тогда поле тяжести на поверхности материка и, соответственно, значение g оказались бы меньше, чем на уровне равновесия. Но истинное значение g вышло *больше* теоретического, вычисленного для уровня равновесия. Следовательно, Антарктида стремится к этому уровню *снизу*, находясь ниже его (ближе к центру Земли). Это и значит, что она всплывает. Ну, а всплывает то, что становится легче. Лед тает, масса его уменьшается. Так всплывает баржа, с которой разгружают арбузы.

Вот она, логика колдовского пророчества, исполненного с помощью маятника!

Глава 6. ЦАРИЦА МИРА

Слова и понятия

Пора отдать должное царице мира. Так один ученый назвал энергию. Но предварительно маленькое отступление.

В физике полным-полно сугубо научных терминов, в которых новичок слышит не более чем барабанный бой. Какой-нибудь «импеданс» или «лагранжиан» ничего не говорят нашим обывательским сердцам.

С термином «энергия» дело обстоит иначе. Каждый лирик отлично знает, что это такое. Любой филолог со снисходительной улыбкой объяснит вам, что энергия — это работоспособность, активность, подвижность и т. д. Верно, конечно. Смысл этого слова в общечеловеческом понимании широк и емок.

Однако для физика энергия — нечто иное. Нечто более тонкое и абстрактное. Вдумчивый физик (когда речь идет о физике) не станет с легу придумывать синонимы этому слову, потому что их не так-то просто подобрать. Он никогда не поставит знака равенства между энергией и подвижностью или активностью, ибо иной раз неподвижное может в физическом понимании обладать большей энергией, чем движущееся.

Кроме того, тут существенно вот что. Активный человек, когда у него портится настроение, становится

пассивным и вялым. Куда пропадает его «энергия»? Он ее кому-то «отдает»? Нет, его «энергия» просто проходит, исчезает.

В физике же энергия не исчезает. Она неуничтожима. Если уж давать физическое определение энергии, то, пожалуй, именно это свойство надо признать основным.

Так поступил, в частности, современный американский физик-теоретик и блестящий лектор Ричард Фейнман.

В «Фейнмановских лекциях»¹ рассказ об энергии начинается с прямо-таки детского популяризаторского анекдота.

Кубики Монтигомо

Шестилетний Монтигомо — Ястребиный Коготь имеет 28 игрушечных кубиков. И это число имеет свойство сохраняться, что бы ни вытворял с кубиками неутомимый хозяин. Вдруг пропадает один кубик. Но опытная мама (ее роль уподобляется Фейнманом роли физика) по выпуклости ковра находит потерянное под ковром. В другом случае поиски кубиков сложнее. Мама выполняет целое исследование. В конце концов она замечает, что в баке стиральной машины уровень мыльной воды выше обычного. Измерив превышение уровня, мама-физик вычисляет лишний объем воды, который, как выясняется, в целое число раз больше объема кубика. Вывод — в непрозрачной мыльной воде утонуло это самое число кубиков. Их-то и недоставало до полного счета. Был еще случай, когда кубиков объявилось не 28, а 30. Два лишних! Откуда они взялись, мама-физик узнает, восстановив недавнюю историю событий. Оказывается, к Монтигомо приходил в гости приятель Кожаный Чулок со своими кубиками и два позабыл.

После пересказанной притчи Фейнман просит отвлечься от кубиков. Это не вещество, не предметы, не тела. Кубиков не существует. Существует же некая физическая характеристика материи и движения, сохра-

¹ Под таким заголовком у нас издается многотомный курс общей физики, читанный Фейнманом в одном из американских институтов (изд. «Мир», 1965—1967 гг.).

няющаяся при любых явлениях внутри системы, изолированной от окружающей среды. И далее излагается теорема (из области теории теплоты), которая утверждает, что в надежно изолированном процессе неуничтожимым кубикам соответствует вполне определенная физическая величина, остающаяся постоянной при любых пертурбациях. Это и есть энергия.

Гвоздь в стену

К понятию энергии физика шла долго и трудно. Правда, о том, что движение не может пропасть бесследно или родиться из ничего, догадывались давно. Понимали это и Галилей, и еще более четко французский мыслитель Декарт, а за ним наш славный Ломоносов. Но то были слишком общие, чисто качественные, лишённые количественных оценок предположения.

Точность, математический символ, формула родились лишь в XIX столетии. Однако в узких рамках механики сохранение энергии (без употребления этого слова) было известно и Ньютону. Причем в соответствии с сугубо механическими истолкованиями силы (как причины ускорения тел), пути (обязательно в инерциальной системе отсчета), работы (произведения силы на путь). И отправным пунктом послужили-таки мысли о механической работоспособности. Как видите, здесь употреблен тот самый термин, который, как я уже говорил, в обычном, обывательском понимании далеко не всегда отвечает физической сущности энергии.

Сперва несколько простеньких выкладок.

Чтобы повесить у себя над столом портрет Ньютона, я забиваю гвоздь. Бью молотком по шляпке. Гвоздь лезет в стену.

На расстоянии, равном глубине (S) внедрения гвоздя, молоток прикладывает неизменную (это допускается ради простоты) силу F . Тогда при каждом ударе молоток, преодолевая сопротивление стены гвоздю, совершает работу, которая записывается так:

$$A = F \cdot S.$$

Между тем, если верить второму закону Ньютона,

сила измеряется произведением массы молотка на изменение его скорости во время удара. Это тоже легко записать математически. Пусть молоток, вгоняя гвоздь, затормозился от скорости v до полной остановки за время t . Тогда изменение его скорости (здесь не ускорение, а замедление, которое ради упрощения будем считать равномерным) составило: $a = \frac{v}{t}$, а сила $F = \frac{mv}{t}$.

Поэтому на расстоянии $S = \frac{at^2}{2} = \frac{vt}{2}$ была совершена работа

$$A = F \cdot S = \frac{mv}{t} \cdot \frac{vt}{2} = \frac{mv^2}{2}.$$

Эта работа выполнена за счет энергии движущегося молотка, которая, таким образом, равна этой же величине $T = \frac{mv^2}{2}$ и называется кинетической энергией.

Только что добытая формула, выведенная Ньютоном,— целый рог изобилия научных откровений. По ней очень легко предсказывать, какую работу совершит движущееся тело, если его остановить. Пуля убивает волка, вода льется на лопасти турбины, брошенный камень сшибает с ветки яблоко — всюду затрачивается работа. И количество ее дается величиной T . В этом смысле кинетическая энергия — действительно показатель механической работоспособности тела, «обещание» работы.

Напоминая вам эти школьные истины, скажу еще несколько слов о другом виде энергии — потенциальной.

Запас работоспособности

Я живу в пятиэтажном доме на пятом этаже и горжусь этим. Потому что жильцы, обитающие на нижних этажах, по одному существенному признаку мне заметно уступают. Я гораздо богаче их именно потенциальной энергией.

Чем выше тело над земной поверхностью, тем больше затрачено работы на его подъем. Тяжелый чемодан поднять на пятый этаж труднее, чем легкий. А на третий этаж его поднять легче, чем на пятый. Значит, ра-

бота подъема Π тут зависит от веса (обозначим его теперь через p) и от высоты подъема h :

$$\Pi = ph.$$

А так как вес p равен массе m , помноженной на ускорение свободного падения g , то можно написать формулу:

$$\Pi = mgh.$$

Такой величиной измеряется потенциальная энергия, иначе говоря, возможность движения, запасенная в поднятом теле: ведь истраченная работа не пропадает, а остается при чемодане в виде возможности упасть, скатиться, спуститься на веревке. В поднятом теле есть неиспользованная способность к движению, к скорости — значит, и к кинетической энергии. Так же, как в расслабленной руке есть неиспользованная способность совершить удар молотком. Слово «потенциал» в переводе с латыни означает «возможность». Это, как видите, не работа.

Это — запас работоспособности. Потенциальная энергия переходит в кинетическую, а та — в работу. И наоборот. Во всех движениях, где так или иначе совершается работа, происходят эти переливы.

Особенно легко их заметить во всевозможных аттракционах. Качели, гигантские шаги, спиральные спуски, лыжные трамплины — неплохие наглядные пособия для начинающих знатоков механики.

На русских горках

Когда речь заходит об энергии, популяризаторы да и ученые (вплоть до самого Эйнштейна) любят вспоминать аттракцион, который называется русскими горками.

Тележка с седоками скатывается по рельсам с крутого склона, взлетает с разгона на другой, опять скатывается, поднимается на третий и т. д. Сперва потенциальная энергия переходит в кинетическую, потом наоборот: кинетическая в потенциальную и т. д. Причем вот существенная подробность: каждая последующая горка сделана немного ниже предыдущей. Почему?

Потому что полная энергия тележки, то есть сумма

ее потенциальной и кинетической энергий, в пути не может увеличиться. Это строго вытекает из законов падения тел (ведь тележка именно падает, хоть и несвободно: по извилистому пути скатывается с вершины горки вниз). В падении с нулевой начальной скоростью нельзя подняться выше точки старта. На это не хватит энергии.

Конечно, при отсутствии трения и сопротивления воздуха полная энергия E не уменьшилась бы, а сохранилась. Было бы всегда

$$E = T + \Pi = \text{const.}$$

Вот они, механические «кубики Монтигомо»! Сохранение энергии в механической системе тел. Как видите, именно полная энергия остается постоянной. Для тела, движущегося в поле тяжести, формула записывается так:

$$E = \frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const.}$$

Не будь на свете трения и сопротивления воздуха, вершины русской горки можно было бы все расположить на одной высоте и взлетать на них сколько угодно раз. Соедините такие идеальные вершины в кольцо — и на них можно было бы пуститься в вечный безостановочный галоп.

Но в реальных условиях часть кинетической энергии в пути безвозвратно теряется — расходуется на работу против сил трения. Поэтому вершины горки приходится устраивать «мал мала меньше» и в конце концов с огорчением вылезать из остановившейся тележки.

Вечное движение есть

Существует ли вечное движение?

Все кругом движется: атомы, пылинки, люди, планеты, звезды. Движение неуничтожимо. Очень легко себе представить вечное движение (во всяком случае, практически вечное) и в какой-нибудь сравнительно небольшой системе тел. Тот же маятник, если исключить трение в точке

подвеса, качался бы в безвоздушном пространстве сколь угодно долго. В вечном неутихающем движении вращается Земля вокруг Солнца. И электроны вечно несутся вокруг атомного ядра. И еще физики научились устраивать в своих лабораториях вечные электрические токи, которые кружат в кольцах из особых материалов — сверхпроводников.

Словом, вечное движение налицо. Оно и в большом и в малом.

А вот вечного двигателя — какого-нибудь автомобиля, который ехал бы, не тратя бензина, — нет. Пресловутый перпетуум-мобиле построить невозможно. Немецкий ученый Герман Гельмгольц в конце прошлого века во всеуслышание заявил об этом и вызвал ропот недовольства среди бесчисленных самоучек-изобретателей.

Сколько ведь предлагалось проектов перпетуум-мобиле! Десятки тысяч! До сих пор научные институты и редакции журналов получают чертежи и расчеты «новейших конструкций» вечного двигателя, который, по уверениям авторов, обязательно будет работать, дайте только денег и материалов на постройку.

Но, как и предсказал Гельмгольц, на многие тысячи проектов — ни одной действующей машины.

А причина проста до удивления. Вся беда в том, что вечный двигатель, по замыслу изобретателей, должен *работать* — действовать, что-то двигать, а значит, совершать работу.

Вечного двигателя нет

Может быть, на вашем жизненном пути встретится страдалец, одержимый мечтой о вечном двигателе. Допустим даже, что он добился невероятного успеха, сумел-таки построить машину, в которой происходит вечное движение: вроде маятника, полностью освобожденного от трения, или такого же колеса, или сверхпроводящего кольца с постоянным неослабевающим током. И вот на столе у него под стеклянным колпаком что-то крутится или раскачивается. Когда-то давно он привел их в движение. И — о радость! — проходит месяц, год, два года — движение не утихает! Все, что крутилось,

крутится, все, что качалось, качается. Страдалец выглядит счастливым. Он думает, сделано великое дело.

Как вылечить его от навязчивой идеи, как растолковать ему, что он неправ?

На это надежд мало: склонность к изобретению перпетуум-мобиле похожа на помешательство. Все же скажите ему: вечный двигатель, по самой сути своей, должен не только вертеться. Он еще обязан что-то двигать, исполнять работу, то есть прикладывать какую-то силу на каком-то пути. Иначе он не будет двигателем.

Но чтобы работать, хочешь не хочешь, надо тратить энергию. Откуда взять ее? Есть единственная возможность — извлечь ее из добытого с таким трудом вечного движения. А тогда движение перестанет быть вечным — оно отдаст свою энергию и прекратится. Остановится колесо, замрет маятник, исчезнет ток. И никаким чародейством их не возродить. Для восстановления вечного движения придется вложить энергии не меньше, чем было ее взято для исполнения двигателем работы. Выигрыша нет.

Так что наш изобретатель ни при каких условиях не сможет использовать свое вечное движение для устройства вечного двигателя.

И будет он, бедняга, жаловаться на судьбу, проклинать законы Ньютона, пытаться их «исправить», так чтобы невозможное стало возможным. Как ни печально, и сегодня есть подобные маньяки. Правда, не столь удачливые, как вышеописанный гипотетический страдалец, ибо настоящим изобретателям перпетуум-мобиле еще ни разу не удалось получить в своих машинах даже неработающее вечное движение. Эту диковинную штуку устраивают ученые-физики, которые отлично осведомлены о невозможности вечного двигателя.

Фундамент природы

В середине XIX века наука поднялась так высоко, что смогла сформулировать закон сохранения энергии не только для механических, но и для тепловых, химических, биологических природных явлений. Немецкий врач Юлий Роберт Майер посвятил этому свою тяжелую, трагическую жизнь, в которой были и преследова-

ния, и сумасшедший дом, и попытки к самоубийству. Физиолог и физик Герман Гельмгольц утвердил всеобщий принцип сохранения энергии теоретически. Английский пивовар Джоуль дал ему первые экспериментальные доказательства.

Именно невозможность уничтожить бесследно любой вид энергии и сотворить его из ничего останавливает тележку на русских горках, налагает запрет на перпетуум-мобиле и держит в строжайших рамках все движения, превращения и перемены состояния. Все, а не одни лишь механические, как было у Ньютона.

Кроме двигающихся камней, водяных струй, машинных колес в нашем мире трудятся и тепло пара в котле, и огонь костров, и удары молнии, и грохот грома. Совершаются разные формы работы, возникают разные формы энергии: световая, тепловая, звуковая, химическая, электрическая, магнитная. Создав лампы и паровые машины, изобретя порох и электромотор, люди научились превращать энергии друг в друга: тепло горящего угля в движение паровоза, химическую реакцию батарейки в электрический ток и т. д.

Чтобы запастись топливом в дорогу, рассчитывать работоспособность электростанций, мощность батарей — для тысяч целей потребовалось знать, как энергия преобразуется из одного вида в другой. И это стало возможно благодаря установлению всеобщего закона сохранения энергии при переходах ее из одного вида в другой.

Физики занялись делом, сходным с исследованиями сообразительной мамы Монтигомо — Ястребиного Когтя из притчи Фейнмана, когда эта мама, разыскивая пропавшие кубики, измеряла повышение уровня воды в баке стиральной машины.

Надо было измерить и вычислить, сколько тепловой энергии нужно переделать в механическую, чтобы поднять килограммовую гирию на метровую высоту, сколько электрической энергии превратить в тепло, чтобы нагреть литр воды на один градус, и т. д. Все эти данные, извлеченные из бесчисленных экспериментов, занесены в справочники и энциклопедии. Без них не может обойтись ни наука, ни индустрия.

В наши дни закон сохранения энергии подтвержден для любых процессов. Двадцатый век присоединил к чи-

слу его подданных мощнейшую атомную энергию. Нет ни одного явления, где он нарушался бы, хоть и были случаи, когда некоторых ученых брало сомнение в его универсальности. Ныне сомнения отброшены.

Закон сохранения энергии — наиболее широкий из всех физических законов, он связывает самые разобщенные, казалось бы, события. Если бы он нарушился (что, конечно, невозможно), разразилась бы катастрофа, мир перевернулся бы, взорвался, сошел бы с ума!

Если исчезнет удивительность

Сейчас мы устроим такую катастрофу минимальными средствами, правда жульническую — с участием потусторонней нечистой силы.

Сперва оглянемся назад.

В этой книжке мы бежим от удивления падению. Хотим понять, почему с равной быстротой падают песчинка и жернов. Причина отыскана в конце второй главы: равенство тяжелой и инертной масс. Это была заметная веха в нашем бегстве. Однако объяснение показалось слишком формальным. Мы побежали дальше. По дороге заглянули в астрономию — взвесили Землю и Солнце, завернули в геофизику — раскопали клад золота, сделали солидный крюк в учение об энергии, где занялись забиванием гвоздя и разговорами о вечных движениях. Зачем это нам понадобилось?

Затем, чтобы набраться эрудиции, а главное, чтобы понять, как тесно связано свойство падения со всем миром, со всеми его законами. Это-то сейчас зримо раскроется в катастрофе, которую, по нашей воле, намеревается совершить сам дьявол.

Слушайте, какое он делает предисловие:

— Все эти удивления, смею вас уверить, сплошная чепуха. Зачем удивляться? Зачем мучить себя бегством от удивлений? Надо уметь жить без тревог. Неужели вам не надоела возня с песчинками, жерновами и вечными двигателями? Куда приятнее не думать о них, а сыграть с приятелями в подкидного дурака...

— Но мир-то, — говорю я, — он удивителен!

— Пустяки, — отвечает мой собеседник, почесывая рог. — Я так забочусь о вашем покое, что за одну ми-

нугу переделаю мир в совсем не странный, в привычный и обыкновенный. Чтобы не было никаких удивлений.

— Стойте, стойте! — кричу я, чувствуя, что он может натворить недоброе. — Не надо! Пусть мир останется по-прежнему удивительным!

— Нет, надо! — отвечает он, и злобный огонь светится в его глазках. — Надо! — И он хлопает в ладоши, топает копытом и нехорошим, замогильным голосом орет: — Да сгинет удивительность падения! Приказываю тяжелым телам падать быстрее легких! Пусть падающие жернова обгоняют песчинки, а большие сосульки оставляют позади маленькие, когда падают. Да будет так, как человеку кажется естественным. Ну, а остальное пускай пока остается по-прежнему. Пока!..

В этот момент раздается шум. Я вижу в окно: разламываются дома, рушатся деревья, а облака, крутятся и распадаясь, смешиваются с землей. Звенят стекла, подо мной проваливается пол..

— Охо-хо! — грохочет сатанинский голос. — Теперь вы не будете удивляться!..

Катастрофа в парке

Незадолго перед этим две подружки, храбрая Аня и робкая Таня, гуляли в Измайловском парке. Они беседовали о том о сем, а потом решили покататься на русских горках.

— Здрóрово! — восклицала Аня, когда тележка катилась вниз.

— Только немножко страшно! — говорила Таня и *прижималась* к подруге.

— Не трусъ! — подбадривала Аня.

И когда тележка поднималась, осмелевшая Таня *отстранялась*, чтобы, однако, вновь *прильнуть* к Ане на очередном спуске.

Обратите внимание на подчеркнутые слова. В них — суть.

Вдруг все вокруг неуловимо переменялось (это был тот самый момент, когда мой рогатый собеседник лишил мир удивительности и приказал тяжелым телам падать быстрее легких). Тележка полетела вниз гораздо стремительнее, чем раньше. Таня испугалась пуше

прежнего, *теснее прижалась* к Ане. Из-за этого тележка помчалась еще скорее, потому что Аня и Таня, соединенные вместе, стали тяжелее, чем каждая по отдельности. Ведь обнявшись, они падали бы с бóльшим ускорением, чем порознь. Так невесть откуда появилась у тележки дополнительная кинетическая энергия. Нарушился закон сохранения энергии! Несколько взлетов — и тележка вознеслась в небо, порвала оковы земного тяготения, устремилась куда-то в сторону Луны. Печальна судьба Ани и Тани!

Быть может, убедительнее цирковой пример.

Двое акробатов прыгают на батуте. С некоторой высоты они падают *в обнимку*, а, оттолкнувшись от упругой сетки, летят вверх *порознь*. После дьявольского приказа ускорение падения циркачей будет больше, чем замедление подъема — в первом случае тяжелая масса акробатов увеличена за счет инертной, во втором, наоборот, инертная увеличена за счет тяжелой. Каждое падение быстрее, чем подъем. При каждом падении акробаты получают прибавку конечной скорости, следовательно, и кинетической энергии. Значит, каждый подъем выше, чем предыдущий. Попрыгав таким образом, циркачи пробивают купол и улетают к звездам.

Похожие невероятные события в мире, «лишенном удивительности», произошли повсюду. Везде нарушился закон сохранения энергии, воцарился хаос. Природа буйствовала. Планеты сошли со своих путей, звезды разбрызгали свое вещество. Вселенная взорвалась, погибла!

Все это я смог вам описать только потому, что на самом деле ничего подобного не было. Да и не могло быть, несмотря на колдовское могущество сатаны¹. Ибо никаким чудодейством нельзя лишить природу ее неисчерпаемой удивительности.

¹ Честно говоря, изложенный преступный «мысленный эксперимент» довольно искусствен: кроме непропорциональности тяжелой и инертной масс, он требует сохранения их суммы. В силу привнесения этого дополнительного предположения, нельзя утверждать, что пропорциональность тяжелой и инертной масс есть следствие одного лишь закона сохранения энергии. В рамках классики эта пропорциональность — непонятная случайность.

УДИВЛЕНИЕ БЫСТРОТЕ

Глава 7. САМЫЙ БОЛЬШОЙ АКВАРИУМ

Сцена широздания

Продолжая тему, начатую в третьей главе, я разговариваю с одним девятиклассником о движении и системах отсчета. Задаю ему вопросы:

— В чем падают камни и пушинки?

— В воздухе.

— А если убрать воздух?

— В пустоте.

— А что такое пустота?

— Пустота — это то, что остается, если убрать воздух.

— Откуда убрать?

Мой собеседник запинается, морщит лоб, потом говорит:

— Ну, из какого-нибудь места. Отовсюду-то не убрать...

— Отлично! — говорю я. — Очень хорошо, что ты сказал «место». Объясни-ка мне теперь, что такое место.

Девятиклассник молчит. Он не знает, что такое место. А вы знаете?

Место — это часть пространства. Все, что происходит, происходит где-то, в каком-то месте, в какой-то части пространства. Ну вот, теперь надо объяснять, что такое пространство.

Пока скажем очень неопределенно: пространство — вроде сцены, на которой разворачиваются все события,

процессы, явления нашего мира. Вне сцены нет спектакля. Вне пространства вообще ничего нет.

Теперь — серьезнее.

Философы-материалисты говорят: пространство есть форма движения материи. Соглашаясь с этим положением, физики прилагают его к своей науке. Для физика важно физическое и, в частности, механическое движение. А его изучение, его отсчет возможны только потому, что в нашем мире существует то, что мы называем расстояниями. Расстояния — это основа физического пространства. И чтобы измерять их, отсчитывать с их помощью механическое движение, строятся пространственные системы отсчета.

Когда шел разговор о падении камней, размахах маятника, обращении планет, то всегда явно или неявно учитывалась система пространственного отсчета этих событий. Они обязательно происходили где-то, на каких-то расстояниях от чего-то вполне конкретного: скажем, от пола, от Солнца, от Луны. Отсчеты расстояний вошли во все формулы механики и теории тяготения. Они-то и наполнили широкое философское представление пространства четким числовым содержанием, необходимым физику.

Пространство трехмерно. В системе отсчета оно выражается тремя взаимно перпендикулярными измерениями — длиной, шириной и высотой. Это определило форму всех уравнений механики.

Однако фактом трехмерности не исчерпываются сведения о пространстве, которыми хочет располагать физик. «Устройство» пространства надо знать глубже.

Разгадывая «сценарий» космического действия, в котором актерами выступают атомы и звезды, Ньютон точно разметил места для событий всемирного спектакля. Никакой режиссер не будет объяснять актерам, куда идти и где стоять, если он не знает устройства сцены. Ведь в разных театрах сцены разные — прямые и изогнутые, с жесткими и гнущимися половицами, с вращающимся и неподвижным полом и т. д. Поэтому и Ньютон, этот режиссер мироздания, должен был что-то знать или хотя бы предполагать о «сцене» Вселенной — безграничном мировом трехмерном пространстве. Скажем, везде ли оно одинаково, изменяется ли с течением времени, движется ли как-нибудь?

Видимо, если пространство вращается (подобно вращающейся театральной сцене) или как-то ускоряется, сжимается, расширяется, все тела в нем подвержены силам инерции — летящие свободно копы сворачивают с прямого пути, ускоряются. Подобное пространство можно было бы «привязать» к *неинерциальной* системе отсчета.

Но в реальном мировом пространстве Ньютона свободно брошенные тела, не подверженные действию сил, не ускоряются и не сворачивают с прямого пути.

Резонно допустить, что реальное пространство «привязано» к *инерциальной* системе отсчета. Той, что либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно.

В чем зреет яблоко

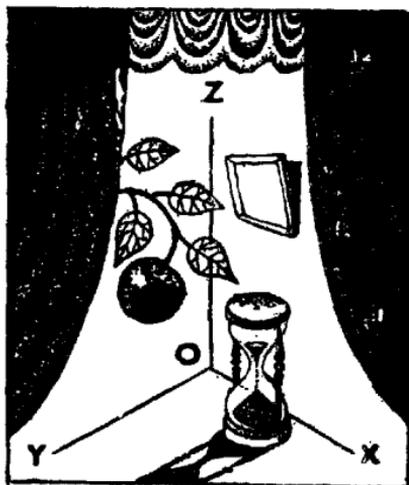
Я рассказываю своему собеседнику что-то вроде сказки.

— В саду, — говорю я, — стоит яблоня. На яблоне висит яблоко. Погода хорошая — ни ветерка. Спрашивается: в чем это яблоко движется?

— Ни в чем оно не движется, — отвечает мой сообразительный девятиклассник. — Оно неподвижно.

— Ты не прав, — терпеливо говорю я. — Допустим, оно неподвижно в пространстве. Но оно зреет, наливаются соком, в нем происходят перемены. Это значит, что оно движется во времени. Текут минуты, часы — и яблоко краснеет, становится слаще и ароматнее. Согласен?

Он согласен, потому что с этим трудно спорить. Конечно же, неподвижное яблоко с течением времени меняется. Все вокруг существует не только в пространстве, но и во времени. И если на висящем яблоке это было заметно не сразу, то как



только оно сорвалось с ветки и стало падать, как только началось движение — роль времени предстала ярко и выпукло. Ведь расстояние, деленное на время, есть скорость, а расстояние, дважды деленное на время, — ускорение.

Пространство дает расположение событий в мире, время же — их последовательность, их развитие. Время — это тоже форма движения материи, как и пространство. И физик наполняет понятие времени своим, присущим физике, содержанием.

В отличие от пространства, время отсчитывается одним измерением — длительностью. Оно одномерно. Но опять-таки признание только этого факта для физика недостаточно. Нужно еще знать, везде ли время течет одинаково быстро, остается ли его темп неизменным, зависит ли он от каких-либо физических причин.

В частности, объявить систему отсчета инерциальной мы вправе лишь тогда, когда уверены, что она покоится либо движется равномерно в *равномерно* текущем времени. А есть у нас такая уверенность?

Заданы серьезные вопросы. Искать ответы будем постепенно. И, обещаю, придем к новым удивлениям, новым поразительным выводам о физике нашего мира.

Рыбья жизнь

В аквариуме плавает рыбка. Где бы она ни находилась, ее положение я могу определить тремя отсчетами (координатами) — расстоянием до дна и двух смежных стенок. Я повесил на аквариум свои часы — и отсчеты пространства дополнились отсчетами времени. Теперь я сумею описать четыремя числами любое событие из рыбьей жизни. Три числа отметят точку пространства, а четвертое — момент события. Вместе они дадут полную классическую пространственно-временную систему отсчета.

Вот, к примеру, пространственно-временной протокол двух секунд рыбьего поведения.

Отсчет № 1. Ровно в пять часов утра рыбка позавтракала — проглотила циклопа. Это произошло в 18 сантиметрах от дна, в 20 сантиметрах от левой боковой и в 8 сантиметрах от задней стенок аквариума.

Отсчет № 2. В пять часов одну секунду рыбка вильнула хвостом в 16 сантиметрах от дна, 5 и 15 сантиметрах от тех же стенок.

Отсчет № 3. В пять часов две секунды рыбка пустила пузырь в 21 сантиметре от дна и т. д.

Этим протоколом описано движение рыбки в пространстве и времени.

Но в каком пространстве и в каком времени? То ли это пространство, в котором кружит Луна или плывет по своей далекой орбите Юпитер?

К аквариуму «привязана» собственная маленькая система отсчета. Она, как правило, неинерциальна. Путь рыбки в своем протоколе отнесен только к аквариуму, к его стенкам и дну. Такое пространство Ньютон назвал бы местным.

То же самое — со временем. Время в протоколе зафиксировано не какое-то всеобщее, а «мое», отсчитываемое моими часами.

Как «в действительности» движется рыбка, из протокола заключить невозможно. Ибо аквариум сам движется: он стоит на Земле, а Земля вращается вокруг своей оси, да еще обегает вокруг Солнца, да еще вместе с Солнцем летит в направлении к созвездию Гончих Псов (это установили астрономы). К тому же наш аквариум может находиться в вагоне идущего поезда, или на плывущем корабле, или в летящем самолете. Сколько тут складывается движений, совмещается сил инерции! Попробуй-ка учти их все вместе!

Словом, запротоколированные нами движения — явления сугубо местные, частные. Ньютон называл их обыденными.

Приложить их ко всему мирозданию практически невозможно.

Разумеется, такое положение дел не устраивало великого физика. Он хотел найти «настоящие» движения, безотносительные к какому-то заведомо неподвижному предмету.

Такие «подлинные» движения ученый назвал абсолютными. И пространство, относительно которого они происходят, тоже получило имя «абсолютного пространства».

Это и есть ньютоновская «сцена» Вселенной.

Всемирный аквариум

Еще раз. В домашнем аквариуме его местное пространство прыгает, летает, кружит в бесчисленных движениях и поэтому совсем не годится для небесной механики. Как же превратить его в абсолютное пространство?

Испробуем такой способ: увеличим аквариум до бесконечно огромной величины, поставим его на «неподвижные» звезды и вместо рыб впустим в него Землю, Луну, Солнце со всеми остальными планетами, а также астероиды, кометы, метеориты и прочие движущиеся небесные тела.

Вообразим еще, что этот бесконечно большой аквариум бесконечно прочен, неизменен и неподвижен. И крепко-накрепко «привяжем» к нему систему отсчета расстояний (от дна и двух смежных стенок, помните?). Вот и готова основа самой главной инерциальной системы отсчета — ньютоновское абсолютное пространство. Согласно определению Ньютона, оно «по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным».

Абсолютное пространство — костяк ньютоновского мира. Сверхжесткий вселенский остов, который не ведает никаких перемен, никаких потрясений. Пусть в нем хоть звезды взрываются — он этого не чувствует. Абсолютное пространство никогда не шелохнется, не даст ни складочки, ни трещинки. Оно такое идеальное, что в нем, по существу, нет ничего физического — сплошная математика, голая геометрия, причем наиболее простая — геометрия прямых линий, плоскостей и объемов, та самая, что от Евклида и Пифагора перекочевала в современные школьные программы.

В этом «всемирном аквариуме» пути движений будут запротоколированы уже не сугубо местные, а «истинные» — абсолютные. Луна в нем станет двигаться не относительно Земли или Солнца, а относительно абсолютного ньютоновского пространства. В нем, «настоящем», незыблемом, полетит и падающий камень, и тележка с русской горки. И именно в нем будут безоговорочно справедливы формулы небесной механики: все три динамических закона Ньютона, закон тяготения и их бесчисленные следствия. Там, в абсолютном пространстве,

механика будет действовать в чистом виде, без всяких досадных, до конца практически не исполнимых поправок на местные движения, на силы инерции.

Очень хорошо. Некоторое сомнение вносится, правда, тем, что столь важное понятие, как абсолютное пространство, у нас введено каким-то шутовским трюком — с помощью фантастически огромного всемирного аквариума.

Нельзя ли привязать это пространство к чему-нибудь более реальному, действительно существующему?

Подождите. Ради обоснования мира Ньютона надо придумать еще что-то небывалое, потому что и в полной мировой системе отсчета пространственные измерения должны сочетаться с измерениями времени.

Часы Вселенной

Вешая свои часы на комнатный аквариум (чтобы составить протокол поведения золотой рыбки), я нисколько не заботился обо всех остальных часах Вселенной. Мне было решительно все равно, годятся или не годятся мои скромные потерянные часики, скажем, для составления расписания восходов и заходов спутников Марса.

Но вот аквариум увеличен до сверхкосмических размеров. Он стал почтенной фигурой — остовом абсолютного ньютоновского пространства. А как же часы, которые на нем висели, когда он был маленький? Неужели они не изменились?

Изменились.

Раньше они показывали наше московское или, иначе говоря, местное, обыденное время; оно было воспроизведено колебанием маятников или пружинок, текло в ритме вращения Земли, поставлено по московскому поясу. Оно отсчитывало земные годы, сутки, минуты, секунды, не имевшие, вообще говоря, никакого отношения к суткам Сатурна и годам Нептуна.

Теперь же часы, висящие на «всемирном аквариуме», показывают, как того требует ньютоновское определение, «абсолютное, истинное, математическое время», которое «само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно».

В загробный мир и обратно

Как видите, все сказанное Ньютоном об абсолютном пространстве относится и к абсолютному времени. Оно объявлено «математическим» и обязано течь «само по себе». Это значит, оно никак не зависит от моих или ваших часов, от колебания маятников, пружин и от прочих физических явлений. Колебания маятников, или пружинок, или даже самих атомов для всемирных часов — события «внешние», не затрагивающие их безукоризненно равномерного хода.

Понятно, почему Ньютон выставил столь жесткое требование: если бы на всемирное время влияли физические процессы, то оно не было бы всюду одинаковым, повсеместно равномерным, и его не удалось бы так просто вставлять в уравнения механики. Где-то усилилась тяжесть (хотя бы над кладом золота) — маятник колеблется чаще, маятниковые часы спешат. Это, понятно, можно учесть, можно поправить ход или использовать пружинные часы, на которые тяжесть не действует. Но и пружинные часы не без греха. Чуть ослабла пружина — меняют ход. Не спасают положения и тщательно оберегаемые эталоны времени — скажем, маятники строго выверенной длины, раскачивающиеся под стеклянным колпаком над определенным местом, или даже колебания молекул и атомов: никто не может поручиться, что всюду в мире они останутся неизменными. Для проверки ведь надо сверять показания часов сигналами, а сигналы — тоже явление физическое, подверженное бесчисленным физическим же влияниям.

От всех этих осложнений Ньютон освободился единым махом, объявив всемирное абсолютное время не физическим, а математическим.

Но только я вот не знаю, какую бы метаморфозу совершить со своими часиками, чтобы они стали независимы от физики. Их надо сделать бестелесными, нематериальными. Единственный выход — послать их в загробный мир, а оттуда вернуть и повесить на всемирный аквариум. Тогда будет все в порядке: несуществующий идеально незыблемый остов мира украсится извлеченными из небытия нематериальными часами, показывающими очищенное от физики абсолютное математическое время.

Пользуясь понятиями абсолютного пространства и идеального математического времени, можно наконец целиком сформулировать требования к «чистой» мировой инерциальной системе отсчета. Она должна быть либо тем самым «аквариумом», стоящим на «неподвижных» звездах и украшенным «загробными» часами, либо (в силу закона инерции) каким угодно другим подобным «аквариумом» и часами, разъезжающими относительно первого в любую сторону прямолинейно и равномерно. Причем равномерность движения должна гарантироваться отсчетами всех часов таких систем. Все часы обязаны идти совершенно одинаково.

Для Ньютона пространство и время, благодаря связанной им абсолютности, были чем-то *надфизическим*, нематериальным.

Очень характерная подробность. Гениальный Ньютон, верный сын своей эпохи, был искренне религиозным человеком, даже богословом. И поэтому он считал, что абсолютное пространство и время есть сам господь бог. Ни больше ни меньше!

Короче говоря, сегодня основа ньютоновского мира выглядит очень уж искусственной, даже нелепой.

Но иначе быть не могло.

Идеи и эпохи

Науке противопоказаны преждевременные замыслы, не опирающиеся на добытое знание и технику. У подлинных ученых они если и возникают, то случайно, и заметной роли не играют.

По этой причине Галилей не задумывался над такой премудростью, как сущность пространства и времени. Ему вполне хватало хлопот со счетом «мокрых секунд» и катанием шаров по желобу, измеренному в локтях. Знаменитый итальянец не имел даже приличных лабораторных часов. Телескоп же, показавший людям дали мирового пространства, был только-только изобретен (кстати, при участии Галилея).

Ньютон, его ближайшие предшественники и современники получили от техники неплохие часы и довольно точные угломерные астрономические инструменты. Измерениям стали доступны интервалы в доли секунды и

громады космических расстояний. Вот тогда-то у ученых и возник вопрос: «А что же, distinguished коллеги, мы все-таки измеряем? Какова сущность того, что именуется пространством и временем?»

Из уст Ньютона прозвучал ответ — самый простой, самый удобный для работы. Для физики не имело никакого значения, что гениальный физик вложил в понятия абсолютных времени и пространства мистический смысл. Наука использовала их только в качестве мысленной инерциальной системы отсчета — единственно возможной в ту пору. И не оставляла попыток отыскать им реальную, физическую опору.

Прошло несколько десятилетий — и нашлись факты, которые обещали исполнение этого закономерного желания ученых.

Надежду открыло развитие науки о свете — оптики.

Однако, как вы скоро увидите, в конце концов оно опрокинуло эту надежду и поставило ученых в весьма затруднительное положение.

Глава 8. С В Е Т И Э Ф И Р

Сам себя гасит

Что такое свет? Как объяснить его странную способность пронизывать просторы мира и останавливаться перед тоненькой черной бумажкой? Почему он отражается от зеркал и преломляется в воде? Чем вызваны замечательные преобразования световых лучей в линзах очков и телескопов?

Разыскивая ответы на эти и другие вопросы, оптика, как и любая настоящая наука, прежде всего обратилась к экспериментам. Их было поставлено великое множество.

Ученые вооружились зеркалами и призмами, выпуклыми и вогнутыми стеклами. Солнечные лучи пропускали через прозрачные кристаллы, густые решетки, тончайшие дырочки. Это был первый прорыв в немеханическую физику. Прорыв радостный, бурный, увенчавшийся целым фейерверком великолепных открытий и неожиданных удивлений. Выяснились, к примеру, поразительные свойства света гасить самого себя и, наоборот, усили-

вать — скажем, давать светлое пятно в середине круглой тени и т. д.

После обсуждения всевозможных гипотез, после многолетних споров и дискуссий (в ранней оптике их было, пожалуй, больше, чем в любой другой области физического знания) удалось добиться более или менее общего мнения. В середине XIX столетия физики согласились: свет имеет волновую природу. Потому-то он и может сам себя гасить или усиливать (волны, складываясь, либо уменьшают размахи, либо увеличивают — смотря по взаимному расположению «горбов» и «впадин»). Выяснилась длина световых волн. Она разная у лучей разного цвета — от 4 до 8 микрон.

В период становления оптики физики сумели измерить и скорость света. Она получилась фантастически огромной — 300 000 километров в секунду.

Зная длину волны и скорость света, нетрудно было подсчитать, сколько световых волн ежесекундно проходит через какую-нибудь точку. Получилось очень большое число. Частота света составляет, как выяснилось, миллиарды колебаний в секунду.

Анварииум наполняется

Волновая природа света не выглядела странной. Волны в нашем мире отнюдь не редкость, они гуляют по воде, в воздухе разносят звуки. И всем была известна несомненная, как тогда казалось, истина: существовать волны могут только в какой-либо среде. Водяные — в воде, звуковые — в воздухе или в любом другом упругом веществе. Переносятся волны колебаниями частичек среды. Раскачиваясь, частички толкают или увлекают своих соседей — вот и бежит волна, бежит обязательно по чему-то способному вибрировать или качаться — по струне, по воде, по воздуху.

Вне среды, в абсолютной пустоте, где нечему колебаться, никаких волн быть не может — так считали все.

Рассуждая в этом духе, оптики решили: раз свет — волны, значит, есть и среда, в которой они распространяются. Среда эта пронизывает пространство, она — во всей Вселенной (потому что иначе до нас не дошло бы сияние звезд). Она остается нетронутой даже в полной

пустоте (иначе бутылки, из которых выкачан воздух, стали бы непрозрачными). Короче говоря, если уж наш мир — аквариум, то он не может быть пуст. Он заполнен тончайшей светоносной материей, которой физики дали романтическое имя — эфир. И думали, что, словно рыбы в воде, плавают во всемирном океане эфира планеты и звезды, дома и деревья, и люди, и физические приборы.

Леса и здание

Пусть так. В наш мир, который все еще представляется безграничным «аквариумом», вместо воды налит невидимый и неосязаемый эфир.

В домашнем аквариуме вода не движется относительно стенок и дна. Эфир во всемирном аквариуме должен тоже покоиться — иначе световые лучи, приходящие к нам от звезд, не были бы столь прямолинейны и постоянны. Они «болтались» бы и гнулись, как на ветру. Изображения планет в телескопе плясали бы, смещались и не соответствовали бы их действительным местам. Небесная механика не сумела бы делать предсказаний.

Но небесная механика действовала превосходно, ее предсказания сбывались одно за другим. И физики сделали вывод, что светоносный эфир незыблем во Вселенной. Вот где могла отыскаться полная, ненарушаемая неподвижность!

Собственно говоря, введение эфира избавило нас от вульгаризации со всемирным «аквариумом». Я выдумал его, чтобы пояснить неизменяемую и вечно неподвижную систему отсчета расстояний ньютоновского мира (помните — «до дна», «до смежных стенок»). Но как только в «аквариум» налит эфир, сам «аквариум» можно убрать — абсолютная неподвижность останется воплощенной в эфире. Словом, «аквариум» был у нас вроде лесов, и, построив здание-эфир, мы вправе со спокойной совестью устранить леса.

Неподвижную систему отсчета можно мысленно «привязать» прямо к эфиру. И относительно эфира отсчитывать абсолютное движение. Так сделать надежнее всего, потому что звезды, на которые раньше я «ставил» всемирный «аквариум», — опора шаткая. Они движутся, и иные — весьма быстро.

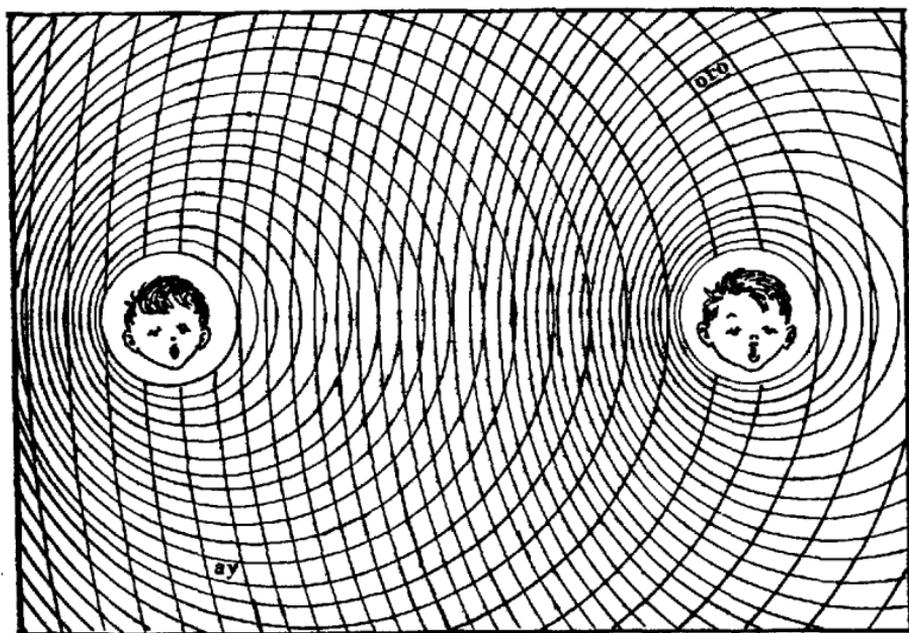
Физики XIX века ликовали. Светоносный эфир представлялся превосходной находкой. Он был желанен и оптику и механику.

По и пртив

Как же обнаружить эфир?

Это все равно что обнаружить с движущегося поезда наружный воздух. Я высовываюсь в окно — и чувствую ветер. Значит, воздух есть, все в порядке.

Земля как поезд, она ведь движется по орбите вокруг Солнца. А эфир как воздух. С Земли даже не надо



«высовываться». Если эфир ее пронизывает, то эфирный ветер должен ощущаться на планете всюду. Для жителей Земли эфирного безветрия тогда быть не может, как не может быть воздушного безветрия для быстро едущего мотоциклиста.

Однако легко поверить, что люди слишком «толстокожи», чтобы ощущать эфирный ветер. Осознание тут отказывает. Как же быть?

Существование воздушного ветра можно установить на слух — измеряя скорость звука в воздухе. Я стою в поле и кричу «ау» своему приятелю, стоящему в поле за километр от меня. Он отвечает: «Ого». Пока мое «ау» долетело до приятеля, прошло, допустим, три секунды. А его «ого» летело до меня четыре секунды. Значит, ветер есть. И дует он против крика моего приятеля, относя звуковые волны назад и поэтому уменьшая их скорость относительно Земли.

Разумеется, крикунам не обязательно стоять в поле и определять скорость ветра. С тем же успехом они могут кричать свои «ау» и «ого», находясь в безветренную погоду в разных концах длинного поезда, состоящего из порожних платформ. Мчась в неподвижном воздухе, они будут чувствовать ветер. И, определив с помощью звуковых сигналов скорость ветра, они тем самым узнают скорость поезда.

Может быть, заменить звук светом и испробовать, не сносятся ли световые сигналы эфирным ветром, измерив скорость света вдоль и против движения Земли по орбите? Разные выйдут скорости — значит, есть эфир и эфирный ветер. Такой рисуется программа эксперимента. Легко ли ее исполнить?

Очень это не просто. Трудность — в огромной величине скорости света: 300 000 километров в секунду. Земля движется по орбите в десять тысяч раз медленнее. А для проверки теории пришлось бы сравнивать квадраты скорости Земли v и света c . Ввиду некоторых теоретических тонкостей (мы их опустим) эффект мог обнаружиться лишь в величине порядка $\frac{v^2}{c^2}$. Ее-то, неувловимо крошечную, и надо было измерить.

В XIX веке такого не умели. Задача казалась безнадежной. Знаменитый английский ученый Джеймс Клерк Максвелл, творец теории электромагнетизма, убежденно заявил, что решить ее вообще не удастся. Никогда, ни при каких ухищрениях.

Это характерно: наука часто недооценивает свои возможности.

Задача была решена в 1881 году.

Автором опыта был обессмертивший свое имя американский физик-экспериментатор Альберт Абрахам Майкельсон.

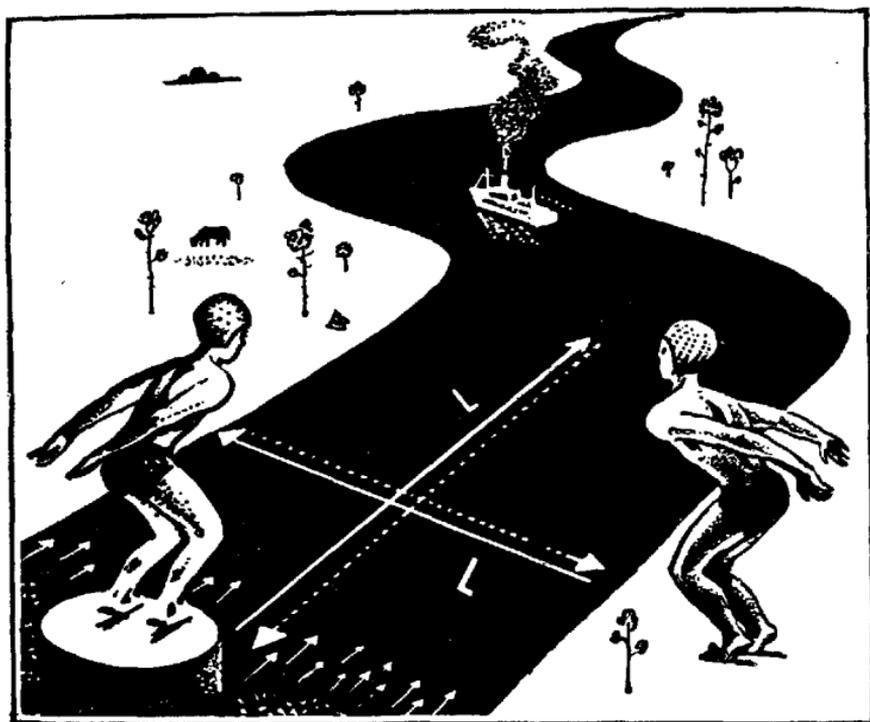
Вдоль и поперек

На башне вертится флюгер. Сразу видно, откуда ветер дует.

Майкельсон ухитрился устроить оригинальный оптический «флюгер», который мог бы показать, откуда дует эфирный ветер.

Прибор Майкельсона можно еще сравнить с «золотым петушком»: тот, кружась на своей спице, сигналил, откуда «лезет рать» (эфирный ветер). Чем-то похож этот прибор и на радиолокатор кругового обзора или на направленную антенну — ее вращают, чтобы найти, откуда, с какой стороны «дуют» радиоволны. Остроумие Майкельсона в том, что он не стал измерять скорость света вдоль и против движения Земли «в абсолютном пространстве». Он придумал другой, гораздо более удобный способ обнаружения эфирного ветра.

Ради пояснения я, по старой традиции популяризаторов, опять обращаюсь к аналогии со спортом. На этот раз отправимся на речку и займемся плаванием.



Даю вам два задания. Первое: переплыть реку на тот берег и обратно. Второе: спуститься вплавь вниз по течению на расстояние, равное ширине реки, а потом вернуться. Какое задание легче? Опытный пловец ответит сразу: первое. Он скажет: даже при быстром течении я обязательно достигну противоположного берега. Пусть меня снесет, но рано или поздно реку я переплыву в обе стороны. Второе же задание может оказаться вообще невыполнимым — если скорость течения реки больше скорости пловца в неподвижной воде, то, стараясь плыть вверх, он все равно будет двигаться вниз по течению. Если же скорость течения меньше скорости пловца, то на исполнение второго задания, при прочих равных условиях, уйдет больше времени, чем первого.

Отсюда — простой способ обнаружить в реке течение.

Двое пловцов стартуют одновременно и в одном месте. Первый переплывает реку и возвращается. Второй плывет вдоль берега на расстояние ширины реки и тоже возвращается. Идеально одинаковые пловцы в спокойной воде финишируют одновременно, а в реке с заметным течением второй обязательно опоздает. И тем больше, чем быстрее течение.

Это ясно? Очень хорошо.

После плавательных упражнений понять опыт Майкельсона будет не очень трудно.

Волны как пловцы

Давайте сделаем замены.

Вместо реки — эфирный океан.

Вместо речного течения — предполагаемый эфирный ветер. Вместо пловцов — световые волны.

Вот как устроен прибор. Массивная каменная плита плавает в ртути: плиту можно плавно двигать, вращая вокруг вертикальной оси, словно карусель. Сверху на плите — система зеркал, источник монохроматического (одноцветного) света и зрительная трубка.

Взгляните на рисунок и внимательно разберитесь, что происходит в приборе.

Пучок света под углом 45 градусов падает на полупрозрачное зеркало — стеклянную пластинку с тончайшей пленкой серебра. Здесь как бы старт «пловцов».

Пучок тут делится на два. В первом световая волна уходит сквозь зеркало дальше (вообразите, что пловцы плывут вдоль реки), второй отражается под прямым углом (пловцы плывут на тот берег.) Пройдя равные расстояния, волны обоих пучков отражаются обычными непрозрачными зеркалами и возвращаются к полупрозрачному (пловцы финишируют).

На месте финиша стоит зрительная трубка, куда попадает часть света из обоих пучков. Тут-то и происходит регистрация опозданий лучей-«пловцов», сносимых эфирным ветром. Регистрация автоматизирована: действует явление интерференции — сложение световых волн.

Зебра в зрительной трубке

Майкельсон смотрит в трубку и, слегка поворачивая одно из зеркал, настраивает прибор. Поле зрения становится полосатым, как бок зебры. Что это за полосы?

Это картина интерференции. Свидетельство того, что светом можно гасить свет.

Там, где видна темная полоска, находятся сразу волновые горбы от одного пучка и впадины от другого. Горбы сложились со впадинами, впадины с горбами — и волна исчезла. Свет пропал. Там же, где полосы свет-

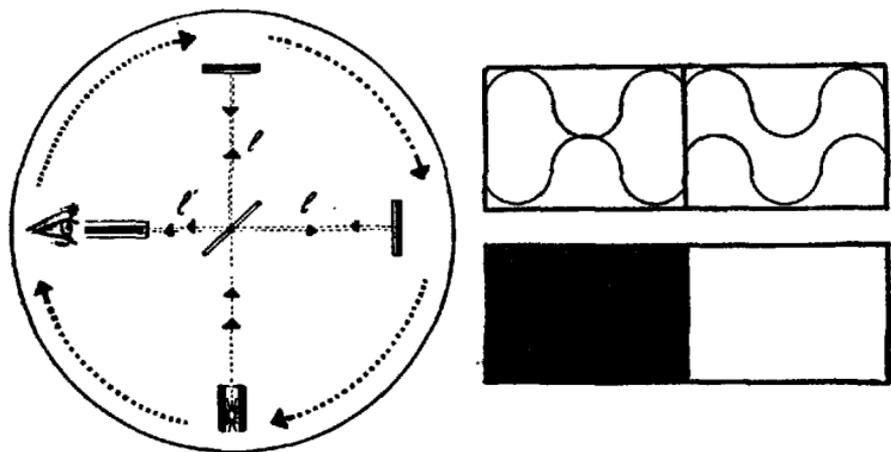


Схема прибора Майкельсона. Справа показано, как сложение световых волн приводит к усилению или ослаблению света.

лые, наоборот, горбы волн обеих лучей совпали, впадины тоже, размахи световых колебаний увеличились (физик сказал бы — возросла амплитуда), свет усилился. Темная полоска переходит в светлую, светлая в темную и т. д. Вот и вышел в окуляре прибора «бок зебры» — картина интерференции.

Пока плита прибора неподвижна, лучи-«пловцы» отстают друг от друга все время на одинаковую дистанцию. Картина интерференции не меняется. Полосы неподвижны, «зебра» в зрительной трубе стоит на месте.

А что произойдет, когда Майкельсон начнет вращать плиту? Эфирный ветер, если он существует, будет по-разному задерживать световые волны в перпендикулярных пучках. В одном их движение обязательно ускорится, в другом замедлится. Горбы и впадины, приходящие в трубку, сместятся. А значит, сместится и весь ряд темных и светлых полос. «Зебра тронется в путь».

Там, где один из лучей совпадет по направлению с эфирным ветром, запаздывание воли-пловцов станет максимальным. Наоборот, запаздывание волн в перпендикулярном луче будет в это время минимальным. И полосы в зрительной трубе сдвинутся на наибольшее расстояние. Словом, если есть эфирный ветер, при повороте плиты полосы обязаны перемещаться.

Вот она, цель эксперимента: увидеть и измерить смещение интерференционных полос при вращении плиты. Обнаружить это смещение — значит, обнаружить эфирный ветер! Поймать неуловимый эфир!

Неожиданный итог

Я не зря так долго разжевывал опыт Майкельсона. Этот опыт — один из главных физических экспериментов XIX века. И замысел его, и техника, и результат уникальны. Его красота — в соединении, казалось бы, несоединимого. Колоссальную скорость световых волн экспериментатор сочетал с их огромной частотой. Действуя вместе, как бы компенсируя друг друга, эти громады дали явление простое и зримое.

Правда, чтобы вызвать его, потребовалась тщательнейшая подготовка. Прежде всего идеальный покой, полное отсутствие толчков, тряски. В подвале Берлинского

университета, где Майкельсон впервые испытал свое изобретение, опытам помешали кареты, разъезжавшие по окрестным улицам.

Ученый разобрал прибор, перевез его в пригород Берлина — Потсдам. Там, в обсерватории, на кирпичном фундаменте телескопа, танец интерференционных полос утих, хоть и не вполне. Шаги человека, идущего за несколько кварталов от обсерватории, сбивали настройку.

Все-таки ночью, когда прохожие ложились спать, удавалось успокаивать «зэбру» и вести наблюдения.

В первых же пробах итоги эксперимента получились неожиданными и непонятными. Когда плиту двигали, полосы не желали смещаться.

Майкельсон искал неисправности, проверял теорию прибора, снова и снова с сугубой осторожностью двигал тяжелую плиту, всматриваясь в полосатую интерференционную картину. Полосы упрямо не желали смещаться.

Когда наши пловцы-близнецы приплывают без опозданий, в реке нет течения. Это легко понять. Но как может быть эфир неподвижен относительно Земли? Земля-то движется! И, конечно же, через эфир — в этом Майкельсон был убежден. Почему же нет эфирного ветра?

Спустя семь лет, уже у себя на родине, Майкельсон вместе с профессором Эдвардом Морли усовершенствовал свой прибор и с повышенной точностью повторил эксперимент.

Опять полосы не смещались. Эфирного течения не было.

В работу включились другие физики. Опыт Майкельсона был проверен с невиданной скрупулезностью. Шли годы, и его повторяли во множестве вариантов, со все возрастающей точностью. Ради страховки от непредвиденных влияний меняли материал плиты — вместо камня ставили дерево, цемент. Поднимали прибор высоко в горы, в небо на воздушном шаре — думали, что внизу эфир может увлекаться движущейся Землей. Результаты не изменялись. Уловить эфир пытаются даже в наше время. Точность опытов теперь такая, что даже если бы Земля плелась по орбите в тысячи раз медленнее, чем на самом деле, все равно обнаружился бы эфирный ветер.

Нет, не нашлось во Вселенной эфира.

Без эфира

Физики XIX века не сразу поняли значение опыта Майкельсона. Первое время он казался чем-то вроде частной неудачи, от которой вскоре можно будет избавиться. Так полагал и сам Майкельсон (и до конца жизни остался при своем мнении). Сразу сделать вывод об отсутствии эфира никто не осмелился, ибо это было бы больше, чем удивление. Это было бы потрясение. Подавляющее большинство физиков XIX века увидели бы в факте отсутствия эфира нечто дикое и неправдоподобное. Еще бы: без эфира погибла бы не только оптика. Потеряла бы свои первоосновы механика, лишилась бы смысла астрономия.

Мир без эфира представлялся темным и холодным. В нем не было солнечного света и тепла, не было сияния звезд, не было даже огонька спички. Ибо световые волны в опыте Майкельсона сами же погубили среду своего распространения. Им не по чему стало бежать!

Почему днем светло? Без ссылки на эфир не находилось возможности ответить на этот детский вопрос.

Можно понять ученых, не пожелавших признать результаты опыта Майкельсона, объявивших этот опыт лишь временной, исправимой неудачей (такое мнение высказывал, в частности, крупнейший физик, первооткрыватель электрона Дж. Томсон).

Можно понять экспериментаторов, взявшихся за бесчисленные повторения опыта.

Но после строжайших проверочных исследований всем пришлось согласиться с фактом: Майкельсон исполнил свой эксперимент точно. Парадоксальный вывод из него верен. А потому наука действительно увидела перед собой тупик. Свет из чего-то более или менее понятного стал чудом!

Для нас с вами особенно существенно более тонкое следствие из доказанного опытом Майкельсона факта отсутствия эфира: падение аргументов, изложенных выше, в разделе «Леса и здание». С исчезновением эфира пропала надежда избавиться от нелепого «всемирного аквариума» — мысленной жесткой системы отсчета, покоящейся на «неподвижных» звездах. Отпала заманчивая возможность «привязать» к чему-то реальному ньютоновское абсолютное пространство. Потеряли опору

(пусть даже гипотетическую) мировые инерциальные системы отсчета. А потому стало загадочным и само движение — от космических обращений планет до падения жерновов и пушинок.

Это длилось несколько десятилетий. Физика, конечно, не остановилась. Она продолжала развиваться. Но в глубине зияла пустота. Механика и оптика словно повисли над пропастью, хоть мало кто из ученых об этом догадывался.

А между тем уже жил человек, которому, как он потом говорил, «все было интуитивно ясно с самого начала».

Это был Альберт Эйнштейн, творец теории относительности — самой поразительной из всех научных теорий.

Глава 9. ПОСТУЛАТЫ ЭЙНШТЕЙНА

Дети и взрослые

Вот слова Эйнштейна, исполненные скромности и немножко шуточные: «Иногда я себя спрашиваю: как же получилось, что именно я создал теорию относительности? По-моему, причина этого кроется в следующем. Нормальный взрослый человек едва ли станет размышлять о проблемах пространства — времени. Он полагает, что разобрался в этом еще в детстве. Я же, напротив, развивался интеллектуально так медленно, что, только став взрослым, начал раздумывать о пространстве и времени. Понятно, что я вникал в эти проблемы глубже, чем люди, нормально развивавшиеся в детстве».

Детство читателей этой книжки, надеюсь, еще не кончилось, они еще не разобрались как следует в сущности пространства и времени, а потому им надлежит хоть в общих чертах усвоить идеи Эйнштейна. В зрелом возрасте это будет сложнее — придется преодолевать стену застарелых привычек.

«Нормальные взрослые люди», в том числе даже физики-теоретики, коллеги Эйнштейна, с величайшим трудом постигали его мысли. Первую его статью (она увидела свет в 1905 году) оценили единицы. Биографы великого ученого буквально по пальцам перечисляют

понявших. Когда молодой Эйнштейн дал свою работу маститому профессору Грунеру, намереваясь устроиться в Бернский университет, тот вернул оттиск с надписью: «Я вообще не понимаю, что вы тут написали».

Правда, через некоторое время этот профессор все понял, а спустя пятнадцать лет даже выпустил книгу о теории относительности. И множество других физиков, поначалу ничего не понявших, не желавших понять, с течением времени прозревали, становились горячими приверженцами Эйнштейна.

Появились талантливые популяризаторы, объяснившие основы эйнштейновских воззрений миллионам.

Я думаю, близко время, когда знание теории относительности станет достоянием каждого культурного человека — и физика и лирика.

А может быть, и школьника.

Почему это трудно

Что трудно в эйнштейновской физике мира?

Пожалуй, все.

Трудно постичь удивительную особенность света, который, как признал Эйнштейн, распространяется в пустоте с равной скоростью по отношению к любым телам, как угодно движущимся друг относительно друга.

Трудно вообразить отсутствие безоговорочной одновременности удаленных событий.

Трудно согласиться с запретом на сверхсветовые скорости движения тел.

Трудно понять сущность относительности пространства — то, что размеры предмета не неизменны, а зависят от того, как движется система отсчета этих размеров.

Трудно признать относительность времени — то, что темп хода часов неодинаков для наблюдателей, по-разному движущихся относительно этих часов.

Почему это трудно? Очень просто — потому, что все перечисленное кардинально противоречит нашим обычным привычкам.

Попробуйте перевернуть смысл приведенных утверждений — и они превратятся в банальности, в «общепонятное» и «бесспорное». Ракету мы тогда сумеем разогнать, если захотим, до сколь угодно большой скорости,

лишь бы хватило топлива. Доброкачественные, точно выверенные часы у всех пойдут в равном темпе. Ваш рост для любых движущихся наблюдателей будет одинаков. А как же иначе?

А вот как. Пока взаимные движения не очень быстры по сравнению со светом, все сущее отвечает нашим привычкам и нашему жизненному опыту. Но если мы начнем «бегать наперегонки» с самим светом, это нам не удастся. В мире сверхбыстрого о привычках придется забыть. Придется столкнуться с новыми «правилами игры».

То, что они удивительны, для нас не ново. Природа вся удивительна — надо только приглядеться. Пожалуй, самое удивительное в том, что человеческий гений сумел постичь эти странные законы, не побывав в мире сверхвысоких скоростей. Наоборот, особенности сверхбыстрого человек отгадал, обдумывая причины неподвижности. Парадоксальной неподвижности интерференционных полос в опыте Майкельсона.

Слово свету

После того как природа, взглянув на людей через зрительную трубку прибора Майкельсона, задала им очередную загадку, не имело смысла воскрешать почивший эфир. Ведь с самого начала эфир был всего лишь гипотезой, его выдумали ради удобства физического истолкования света. А свет, судя по всему, не очень заботился о собственной понятности для людей.

Но если эфир погиб, свет-то остался. Мир не погас, не погрузился во тьму. Мало того, загубив эфир, свет предъявил свое неведомое прежде «отрицательное» качество.

Его сиятельство свет сказал тогда:

— Уважаемые физики! Поскольку я великолепно обхожусь без эфира и меня не сносит никакой эфирный ветер, я не могу, к сожалению, ничем помочь тем из вас, кто захочет воспользоваться моими услугами, чтобы обнаружить движение Земли по орбите. Извините, но не могу! Так уж я устроен. И так устроен мир.

Это ведь и доказал опыт Майкельсона.

В самом деле, выкиньте из обсуждения знаменитого

эксперимента разговоры об эфире. Что тогда останется? Останется вывод: оптическим опытом не удалось обнаружить движение Земли. Только и всего.

Каково движение Земли? Во время эксперимента Майкельсона планета двигалась прямолинейно и равномерно — крошечное искривление ее орбиты (помните, 3 миллиметра на 30 километров!) не могло заметно повлиять на картину интерференции.

Отсюда заключаем: оптическим экспериментом невозможно обнаружить *равномерное* и *прямолинейное* движение — причем, разумеется, не только Земли, но и любого другого тела, на котором исполняется эксперимент. Этот вывод и сделал Эйнштейн. И этот вывод стал основой для еще более широкого обобщения, послужившего первым исходным пунктом — первым постулатом теории относительности. Вот он, в чуть упрощенной форме, первый постулат Эйнштейна: *никаким физическим экспериментом невозможно обнаружить равномерное и прямолинейное движение. Другими словами, движение инерциальной системы отсчета неотличимо от покоя. Оба состояния равноправны. Важнейшее положение! Оно касается самой сути движения.*

Обратите внимание на усиление формулировки. Вместо слов «оптическим экспериментом» употреблены слова «никаким физическим экспериментом». Не слишком ли смело? Кто дал право сделать замену?

Наш старый знакомый — Галилео Галилей.

„Галилеев новчег“

Когда Галилей, вооруженный своей прозорливой дипломатической мудростью, осторожно и тонко воевал за «еретические» идеи Коперника и доказывал, что Земля обращается вокруг Солнца, а не наоборот, он услышал, в числе множества возражений, и такое (очень, кстати, неплохое для XVI века):

— Если бы Земля двигалась, то птицы, летающие в воздухе, не могли бы поспеть за мчющимися вместе с Землей башнями и деревьями! Так-то, дерзкий сеньор!

В ответ Галилео прибег к сравнению. Ему поневоле приходилось быть не только ученым, но и популяризатором — иначе коллеги-богословы ничего бы не поняли.

Короче говоря, Галилео посоветовал спорщикам отправиться в трюм какого-нибудь корабля, запастись мухами, бабочками, аквариумом с рыбками, а также кусочком ладана и кувшинами с водой. Пока корабль неподвижен, спорщикам предлагалось поэкспериментировать — попрыгать, покидать всевозможные предметы, внимательно понаблюдать за поведением летающих мух, плавающих рыбок, водяных капель, отвесно падающих вниз, дыма от ладана, поднимающегося прямо вверх.

Далее Галилео заявил:

— Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения.

Прыжки и броски не станут труднее или легче, мухи и бабочки будут по-прежнему летать во все стороны, капли будут все так же отвесно падать, а дым отвесно же подниматься. Галилео заключил:

— Ни по одному из этих явлений вы не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно.

Другими словами и чуть шире: никаким механическим опытом невозможно обнаружить собственное прямолинейное и равномерное движение.

Это утверждение — *принцип относительности Галилея*. Быть может, логичнее было бы сообщить его читателю пораньше — хотя бы там, где речь шла о падении тел и о ньютоновском законе инерции. Я приберег его до сих пор по единственной причине: уж очень похож принцип относительности Галилея на первый постулат Эйнштейна, о котором вы прочитали на предыдущей странице.

Галилей объявил, что равномерное движение невозможно установить с помощью механики. И, если говорить строго, именно на это утверждение опирался разбивавшийся во второй главе закон инерции.

Эйнштейн добавил совсем немного: даже если бы обитатели «Галилеева ковчега» обзавелись оптическим прибором Майкельсона, они все равно не обнаружили бы собственное равномерное и прямолинейное движение.

Механикой — нельзя, оптикой — нельзя. Конечно, тут

не поможет и физика тепла. Учение же об электромагнетизме во времена Эйнштейна срослось с оптикой — после блестящих теоретических исследований Максвелла выявилась электромагнитная природа света (свет оказался электромагнитными волнами).

Вот Эйнштейн и получил право заявить свой первый постулат. Повторяю его в чуть измененной форме: природа устроена так, что никаким физическим экспериментом нельзя отличить покой от равномерного прямолинейного движения. Таков принцип относительности Эйнштейна.

Наблюдение ведет к изумлению

В этом месте я задремал над сочинением этой книжки. И очутился в космической ракете. Невесомость, тишина, никакой тряски — все как полагается в современном «Галилеевом ковчеге». Мне хочется узнать, лечу ли я, и если лечу, то куда, и успею ли при жизни долететь до Земли. Но увы, я понимаю, что никакие опыты и измерения ответа не дадут: действует запрет, наложенный эйнштейновским принципом относительности. Тогда я начинаю размышлять о причинах своего плачевного положения.

Кто виноват в нем? Свет. На предыдущей странице он сам в этом признался. Так как же устроен свет, если он ведет себя столь невежливо?

Предположим на минутку, что свет — это не волны. Тогда, кажется, все встанет на место.

Пусть где-то в пустоте летит снаряд. Он взрывается. Осколки мчатся в разные стороны. Но скорость осколков складывается со скоростью снаряда. Если стать



привидением (чтобы самому не взорваться) и до взрыва сесть верхом на снаряд, то после взрыва, продолжая по инерции двигаться так, как двигался исчезнувший снаряд, будешь сохранять его скорость и находиться в центре разлета осколков. Поэтому, измеряя скорость осколков, никогда не узнаешь, с какой скоростью летишь ты сам, то есть с какой скоростью летел снаряд.

Движущийся фонарь — как снаряд. Световая вспышка — как расширяющийся шар летящих «осколков» от какого-то взрыва. Взрыв этот можно отразить зеркалом в любую сторону, собрать линзой в тонкий луч. Но никаким опытом не удастся по измерениям скорости осколков (скорости света) узнать скорость фонаря.

Объяснен как будто главный итог опыта Майкельсона! Правда, остается еще как-то вывернуться — истолковать волновые причуды света, хоть то же явление интерференции. Но это, быть может, мелочи...

Изложенную теорию света сочинил в 1908 году один уважаемый физик, по фамилии Ритц. Называлась она баллистической (по аналогии со взорвавшимся снарядом). И оказалась катастрофически неверной.

Дело вот в чем. Если скорость осколков складывается со скоростью снаряда, а, согласно баллистической теории, роль снаряда играет движущийся фонарь, то скорость света должна складываться со скоростью фонаря. Именно при таком условии не удастся установить оптическим опытом собственное равномерное прямолинейное движение.

Но это утверждение можно проверить опытом или наблюдением, что и было сделано через несколько лет после провозглашения теории Ритца. К тому времени астрономы основательно изучили вращающиеся системы двойных звезд и научились сравнивать скорости света, испускаемого каждой из звезд такой «вальсирующей» пары. Как выяснилось, оба звездных «партнера» — и тот, что, «вальсируя», движется на нас, и тот, что, наоборот, удаляется, — испускают свет, распространяющийся с совершенно одинаковой скоростью. Значит, в противоречии с теорией Ритца, скорость света не зависит от скорости светового источника. Другими словами, световой сигнал нельзя ускорить «броском» фонаря — сигнал будет распространяться все с той же скоростью — 300 000 километров в секунду.

Вкратце повторю сказанное.

Казалось бы, признав первый постулат Эйнштейна, мы обязаны объявить, что скорость света должна складываться со скоростью фонаря. Так же, как скорость «Галилеева ковчега» складывается со скоростью пассажира, идущего по палубе. Или скорость пистолета со скоростью пули. А выходит, что такого сложения скоростей для света в действительности нет. Скорость света не зависит от скорости фонаря!

Тут свет опять повел себя так, будто есть все-таки эфир и световые волны в эфире подобны звуковым волнам в воздухе. Ведь скорость звуковых волн тоже не зависит от движения источника (никто не станет кричать «с разбегу», чтобы ускорить распространение звука).

Но эфира нет. И поэтому распространение света не похоже на распространение звука. Как доказал Майкельсон, световыми волнами невозможно определить собственную «абсолютную» скорость в эфире, в то время как звуковыми волнами можно установить собственную скорость движения в неподвижном воздухе. (Вспомните «ого» и «ау», которыми мы с приятелем перекликались на поезде из порожних платформ.) Вот вам: свет не похож ни на звук, ни на взрыв.

Ни на что он не похож. И поведение его ни на что не похоже. Теперь оно выглядит еще более диким и противоестественным, чем прежде. Свет вроде той дамы, которая «рано утром вечерком поздно на рассвете ехала верхом в расписной карете».

Да и не только свет ведет себя столь странно. Не следует думать, что для людей, лишенных зрения или зажмуривших глаза, физика меняется. Сказанное о свете относится и к радиоволнам, рентгеновым, гамма- и инфракрасным лучам, и к потокам частиц нейтрино, и к тяготению — словом, к любым полям, распространяющимся в пустоте со скоростью света. А только такие поля и существуют в природе.

Два опорных камня

Гениальность Эйнштейна — не в том, что он не шархнулся в испуге от движущейся нелепости. Гениальность Эйнштейна выше и загадочнее: великий физик

предсказал эту удивительную «нелепость». Он объявил о ее существовании задолго до того, как она обнаружилась в утонченном наблюдении света. Как он сумел предугадать подобное — никто не знает. Это — интуиция гения. Когда ученому задавали такой вопрос, он улыбался и вспоминал, как еще шестнадцатилетним подростком воображал себя несущимся верхом на световом луче. И «чувствовал», что даже относительно самого светового луча скорость этого же луча будет постоянна и равна 300 000 километрам в секунду. Он чувствовал естественность того, что всем «здравомыслящим» коллегам представлялось абсурдом!

И вот за три года до появления теории Ритца, за восемь лет до ее падения Эйнштейн, словно глядя в будущее, поставил рядом два опорных камня своей теории.

Первый — принцип относительности равномерных прямолинейных движений. Второй — независимость скорости света от скорости светового источника.

Таковы постулаты Эйнштейна. Взятые по отдельности, они ничуть не удивительны. Первый был знаком еще Галилею. Эйнштейн его только обобщил. Второй был принят в физике с тех пор, как восторжествовала волновая природа света (теория Ритца оказалась шагом назад). И не по отдельности, а только вместе они выглядели абсурдом. Ибо кажется, признайте первый постулат — станет невозможным второй. И наоборот, из второго будто бы вытекает «нелепость» первого. Согласиться с ними обоими — значит, казалось бы, то же самое, что поехать в Ленинград, не покидая Москвы. Тем не менее в теории Эйнштейна они стоят рядом и не спорят.

И из их парадоксального соседства следуют не менее парадоксальные заключения об устройстве природы.

Главный вывод служит ключом ко всем остальным, и потому назвать его стоит сразу. Эйнштейн постиг его внезапно. Как сказано в биографии ученого, «однажды утром, хорошо выспавшись, он сел в кровати и вдруг понял, что *два события, которые для одного наблюдателя происходят одновременно, могут быть неодновременными для другого*».

Как это понять? О чем вообще идет речь?

Не обладая интуицией Эйнштейна, попробуем усвоить это постепенно.

Бандит Клио

Побеседуем о важном и широком законе, в равной мере физическом и философском,— о законе причинности.

В весьма удачном, на мой взгляд, очерке о теории относительности, принадлежащем перу ленинградского математика О. А. Вольберга¹, есть красноречивый эпизод из жизни мира, где причинность вывернута наизнанку.

Дело было так. По лесу, кишевшему разбойниками, ехали в повозке автор, кучер и некий мистер Барней, который, как повествует автор, «сидел на облучке, повернувшись ко мне, и что-то рассказывал. Вдруг он схватился за грудь и опрокинулся назад.

— Что с ним? -- воскликнул я.

— Убит. Пуля попала в сердце,— ответил кучер.

— Кто же стрелял?

— Вероятно, это негодяй Клио собирается выстрелить.

— Вы говорите «собирается»; но ведь мистер Барней уже убит!

— Да, убит. Я и говорю, что убийцей *будет* Клио. Поглядите, вон он скачет за нами.

Я оглянулся. Вдали по дороге, нагоняя нас, быстро неся всадник. На всем скаку он поднял ружье и начал прицеливаться. Я невольно пригнулся, намереваясь соскользнуть на дно повозки.

— Не бойтесь, он целится в Барнея,— сказал кучер, ткнув кнутом в сторону трупа, лежащего у моих ног.

— В таком случае надо его укрыть,— воскликнул я, хватаясь за труп и стараясь стащить его вниз.

— Чего же его прятать, когда он мертв? — возразил кучер.

¹ Этот очерк, называющийся «Занимательная прогулка в страну Эйнштейна», печатался в довоенных изданиях «Занимательной механики» Я. И. Перельмана. В послевоенных изданиях этой книги очерка, по непонятным причинам, нет. Не издан он у нас и отдельной брошюрой (хоть издан за границей), а потому стал, к сожалению, библиографической редкостью.

Мне стало конфузно за глупости, которые я говорил. Вдруг блестящая мысль осенила меня.

— Погодите же! — закричал я. — Я сейчас подстрелю этого негодяя.

Сказано — сделано! Бац! Клио свалился мертвый.

— Он не успел выстрелить, — радостно воскликнул я. — Выстрел, который должен был убить мистера Барнея, никогда не будет произведен.

— Разумеется, — согласился кучер. — После смерти не выстрелишь.

— Значит, мистер Барней спасен!

— Где там спасен, когда у него в сердце пуля сидит. Нет, его не воскресишь. Он уже похолодел.

— Какая пуля? Ведь Клио не выстрелил и никогда не выстрелит. Не может же пуля, которая никогда не вылетит из ружья, находиться в сердце мистера Барнея.

— Ну уж... не могу вам объяснить... — ответил кучер. В голосе его была растерянность...»

Вот какие невозможные вещи творятся в мире, где отсутствует закон причинности. Закон этот таков: всюду, в любых явлениях, во всех системах отсчета причины событий во времени обязательно предшествуют следствиям. Пусть на ничтожное мгновение, но причина должна быть раньше следствия. В любых явлениях.

От закона причинности легко перейти к понятию одновременности, с обсуждения которого начинается теория относительности и которое далеко не так очевидно, как кажется непосвященным.

Пахом и Федот

Сперва я объясню вам смысл того, от чего дальше предстоит отказаться. Слушайте очередную сказку.

Пахом и Федот пошли на охоту. Увидели зайца, прицелились, выстрелили. Заяц упал. И охотники поспорили — кто в зайца попал.

— Мой заяц! — кричит Федот. — Он ведь упал одновременно с моим выстрелом!

— Одновременно?

— Да-да! — уверяет Федот. — Одновременно!

— Значит, его убил не ты, а я, — объявляет Пахом. — Закон природы!



Кто прав? Пахом. Если выстрел — причина, а смерть зайца — следствие, то оба эти события произошли заведомо не одновременно. Пусть даже пуля Федота летела сколь угодно быстро, она не могла быть сразу «тут и там» — в ружейном дуле и заячьем боку. Причина обязательно предшествует следствию. То, что происходит одновременно, не связано причинной связью.

Но одновременность «привязана» к самой быстрой причинной связи.

Вообразите, что Пахом и Федот забрались в фантастический роман и стреляют на сверхгигантские расстояния — с Земли попадают в

зайцев-марсиан. Опять убит заяц, опять идет спор. Заявление Федота об одновременности его выстрела с падением марсианского зайца на этот раз выглядит диковато (как, впрочем, и весь пример). Однако Пахом относится к Федотовым словам доверчиво, но тем не менее снова вспоминает закон причинности и заключает, что зайца убил не Федот. Другое дело — выстрел Пахома. Он прогремел на мгновение раньше смерти зайца и стал причиной охотничьей удачи.

В этих весьма несерьезных мысленных экспериментах мы занимаемся очень серьезным делом — вводим классическое понятие одновременности. И, обратите внимание, не можем обойтись без сколь угодно быстрых сигналов. Раз уж Пахом выстрелил на неуловимо малое мгновение раньше Федота, то Пахомова пуля за это самое мгновение перелетела с Земли на Марс. И не только на Марс. С тем же успехом мы можем послать эту пулю на Солнце, на Сириус, в другую галактику — куда хотите. Для узаконения всеобщей одновременности сигналы должны мгновенно проскакивать любые сверхгигантские расстояния.

В классической физике такое предположение неизбежно. Там всемирная вездесущая одновременность обязательно привязана к бесконечно быстрому сигналу. Не будь этого — одновременность размажется, станет неопределенной и неизмеримой.

В огороде бузина...

А как быть с разобщенными, причинно не связанными событиями?

Пусть кто-нибудь утверждает: в то же самое мгновение, как в Киеве чихнул дядька, в огороде сломался куст бузины. Проверить одновременность и здесь удастся только бесконечно быстрым сигналом. Надо будет «стрельнуть» им с огорода в Киев. Если этот *мгновенный* сигнал о поломке бузины придет в Киев в момент дядькиного чихания, значит, одновременность налицо. И наоборот.

Зачем все это сказано?

А затем, что без соблюдения всеобщего закона причинности нельзя говорить и об одновременности, и об абсолютном математическом времени. Абсолютная одновременность, сращенная с законом причинности, служит как бы «печкой», от которой «танцует» всемирное абсолютное время Ньютона. Только таким, крайне натянутым, искусственным способом можно обосновать единство хода «главных» часов, которым, если верить Ньютону, подчиняется Вселенная.

И именно эта всеобщая, всюду одинаковая одновременность, требующая существования неправдоподобно сверхбыстрых сигналов, отсутствует в теории относительности.

Устав судейства

У Эйнштейна одновременность относительная.

В популярных книжках приводится множество разъяснений по этому поводу. Но, мне кажется, самое ясное и строгое до сих пор принадлежит самому Эйнштейну.

С некоторой развлекательной вульгаризацией оно излагается ниже.

Юные пионеры Женя и Володя забавляются стрельбой из пугачей и играют в игру «Кто первый?». Выстрелишь раньше соперника — выиграешь и получишь в награду леденец. А одновременные выстрелы — это ничья. Леденец не присуждается никому.

Если бы игроки стояли рядом, определить исход игры было бы просто: последовательность или одновременность событий, происходящих в одной точке, определяется без передачи каких-либо сигналов.

Но наши игроки удалены друг от друга: Женя — на носу, а Володя — на корме длиннущего парохода. Тут уж при судеюстве сигнализация неизбежна.

Однако благодаря удивительным свойствам света, открывшимся в опыте Майкельсона, мы сумеем обойтись без сверхбыстрых сигналов, неизбежных в классической физике при определении одновременности удаленных событий.

Эйнштейновский «устав судеюства» таков. Надо, чтобы световые вспышки, посланные от событий в моменты их свершения, пришли в середину расстояния между событиями. Вместе пришли световые сигналы — налицо одновременность событий, порознь — события неодновременны. Ранний сигнал — от раннего события, поздний — от позднего.

Это и есть эйнштейновское определение одновременности.

Казалось бы, просто. Но обратите внимание: используются не звуки, не пуля, а именно световые сигналы, совершенно равнодушные к скоростям их источников. С пулями пришлось бы учитывать скорости пистолетов, со звуками — скорость воздуха, а световые сигналы не требуют никаких дополнительных условий и оговорок.

Правило это легко выполнимо, резонно, не вызывает недоумений. Если отказаться от неосуществимой сверхбыстрой сигнализации, то другого определения одновременности не придумаешь. Но в сочетании с постулатами Эйнштейна оно, как вы сейчас увидите, ведет к неожиданному и поучительному результату.

Напомню еще раз постулаты. Первый: полное физическое равноправие равномерных прямолинейных движений и покоя. Второй: независимость скорости света от скорости светового источника.

И — начинаем играть.

Кто первый?

Пароход неправдоподобно быстро мчится по реке — его скорость сравнима со скоростью света. Ради объективности назначаются двое судей: капитан парохода, стоящий на палубе точно посередине между игроками, и бакенщик, который стоит на берегу реки (в какой точке берега, пока неизвестно).

Игроки и судьи начеку... Дается команда... И вспыхивают выстрелы!..

Пусть к капитану обе вспышки с разных сторон доходят вместе. Он объявляет:

— Выстрелы одновременны! Ничья!

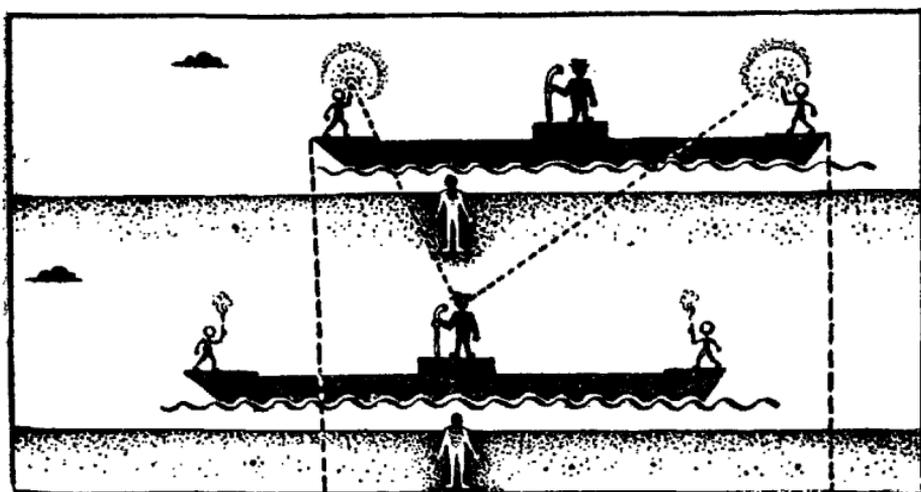
Но бакенщик с ним не согласен. Он кричит:

— Одновременности нет! Первым был выстрел на корме! Леденец Володе!

Почему возникло несогласие в судейской коллегии?

Проще всего это понять вот как. Внимание.

Вообразите, что капитан в тот самый миг, когда к нему вместе пришли световые вспышки выстрелов Володи и Жени, проехал точно мимо бакенщика. Тогда и к бакенщику эти вспышки пришли вместе и он видел то же, что и капитан. Но, в отличие от капитана, бакенщик не мог заявить об одновременности выстрелов, потому что находился не посередине своего, берегового расстояния между выстрелами. Ведь пока свет вспышек шел от игроков к судьям, пароход успел продвинуться



Пока свет выстрелов шел к судьям, пароход сместился влево.

вперед. И если капитан, находившийся посередине парохода, лишь после выстрелов подъехал к бакенщику, значит, раньше, до сближения судей, место пребывания бакенщика было ближе к носу парохода, то есть к Жениному выстрелу.

Передохнув, читайте дальше.

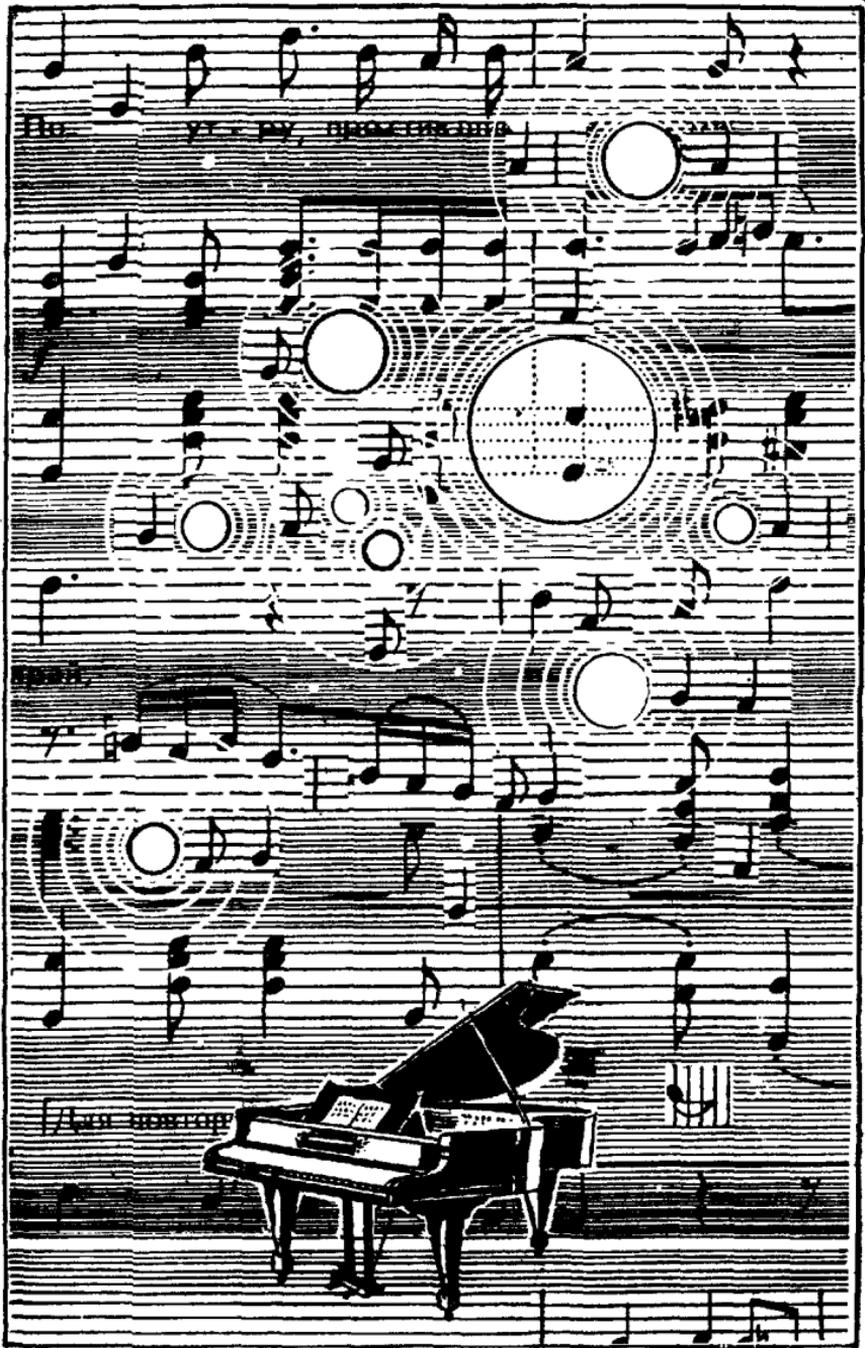
Поскольку к бакенщику вспышка ближайшего — Жениного — выстрела пришла вместе с Володиной, значит, Володина вспышка путешествовала дольше и отправилась в путь раньше (ибо скорость света не зависит от скорости светового источника — второй постулат). В середину берегового расстояния между выстрелами Володина вспышка добралась наверняка раньше Жениной. Будь там наблюдатель, он и увидел бы Володину вспышку до Жениной. Вот вам и основание для заявления бакенщика о победе Володи.

Все. Можете удивляться. Двое судей, находясь в одном месте, по-разному оценили одни и те же события. Первый объявил их одновременными, второй — разновременными. Одновременность оказалась не абсолютной, а относительной. Она зависит от движения наблюдателей!

Допускаю, что новичка-читателя все-таки одолевает сомнение: нет ли в нашем рассуждении ошибки. Не потому ли вышло несогласие, что пароход движется, а бакенщик стоит на месте?

В ответ я еще раз прошу вас вспомнить первый постулат. Вы вправе считать, что движется бакенщик (с ним и берег, и Земля вместе со всем миром), а пароход неподвижен. Можете самостоятельно оценить последовательность выстрелов по отсчетам капитана и бакенщика в этом варианте. Благодаря безоговорочной относительности скоростей и независимости скорости света от скорости светового источника, результат выйдет прежний. От изменения точки зрения на системы отсчета события, регистрируемые в них, конечно, не изменятся. Одновременность останется относительной.

Для дополнительного упражнения прибавьте, если хотите, третьего судью — летчика длинного сверхбыстрого самолета, который во время игры обгоняет пароход на бреющем полете. При прежних оценках капитана и бакенщика летчик отдаст первенство Жене (и в этом попробуйте убедиться самостоятельно).



По ут-ру, просыпаясь

228

Вот

Дан текст

Итак, стало трое судей — и три разных мнения. И каждый прав. Каждый честно следовал эйнштейновскому «уставу судейства» — определению одновременности. И повторяю, нельзя подозревать, что кто-то из судей ошибся, а на самом деле была, скажем, ничья. В том-то и заключается наше новое удивление, что для наблюдателей, движущихся по-разному, события действительно следовали друг за другом в разном порядке.

Как видите, игра «Кто первый?» не удалась. Леденец остался неприсужденным. Зато читатель, надеюсь, в выигрыше — узнал такую интересную вещь, как относительность одновременности. Понял то, что сам Эйнштейн открыл «однажды утром, хорошо выспавшись».

Ну, если кто и не совсем понял, то надо лечь спать, а завтра на свежую голову станет вполне ясно. Как у Эйнштейна!

Хор, который невозможен

Последние две-три страницы следует прочитать несколько раз. Относительность одновременности мало просто уяснить, постичь в мимолетном озарении. К ней надо привыкнуть, с нею надо сжиться. Ибо тут-то и спрятан ключ к пониманию теории Эйнштейна.

Простая аналогия. Я поднимаю глаза от рукописи. Вижу лампу и чернильницу. Ставлю чернильницу перед лампой так, чтобы она не загоразивала. Оба предмета расположены прямо по лучу зрения. Сдвигаю голову влево — чернильница оказывается справа, сдвигаю голову вправо — чернильница оказывается слева. Обхожу стол так, чтобы впереди была лампа, и, сдвинув голову вправо, опять вижу чернильницу справа и т. д. Я танцую вокруг стола и, ясное дело, не могу ответить на дурацкие вопросы о том, в какой же стороне чернильница «на самом деле» — справа или слева, спереди или сзади лампы? Вопросы эти бессмысленны, пока не фиксировано расположение наблюдателя. Понятия «впереди», «сзади», «справа», «слева» — относительны.

Примерно так же обстоит дело и с одновременностью.

Вот маленькое совершенно фантастическое пояснение.

Я сижу в кресле и слушаю «хоры стройные светил» (пусть буквально так!) — звезды-хористы расппевают хорал. Но поют они, как я слышу, отнюдь не стройно, а вразнобой. Сириус явно запаздывает со своей мелодией, а Вега, наоборот, спешит. Космонавт, летящий в ракете, тоже не находит в музыке ни складу ни ладу. Но для него Сириус вступает раньше, чем надо. Почему так? Именно потому, что не существует всемирной всеобъемлющей одновременности. Звезды далеки друг от друга, движутся друг относительно друга, да еще слушатели движутся — вот и выходит, что просто невозможно для всех соблюсти главное условие любого хора — одновременность ведения мелодии разными голосами.

Как для разных точек зрения чернильница то справа, то слева от лампы, так для неодинаково движущихся систем отсчета то Сириус запаздывает, то Вега.

Словом, бессмысленно говорить об одновременности удаленных событий, если не сказано, как движется относительно них система отсчета. «Тому, кто сумел уяснить себе это, трудно понять, почему выяснение столь простого факта потребовало много лет точных исследований», — писал Макс Борн, видный ученый и убежденный последователь Эйнштейна.

Уговорил я вас? Если да, то можно перейти к следующему удивлению.

Онегин и Леноний

Игра «Кто первый?», когда игроки далеко друг от друга, не имеет абсолютного смысла. Разные судьи оценивают ее итоги по-разному. Пусть так.

Ну, а если это не игра, а дуэль?

Если наши Женя и Володя — это Евгений Онегин и Владимир Ленский, поднимающие друг на друга не пугачи, а настоящие пистолеты? Тут уж не до споров. Опоздавший гибнет!

Итак, не игра, а дуэль. Происходящие события — выстрел Онегина и падение Ленского, точно по Пушкину. Судьи становятся секундантами. Все они, конечно, регистрируют один и тот же печальный исход поединка — гибель Ленского (ибо смерть — явление, увы, не относительное, а абсолютное, не может быть, чтобы



с одной точки зрения умирал Ленский, а с другой — Онегин).

Однако теперь в суждениях судей-секундантов обнаруживаются непримиримые разногласия.

Первый секундант (летчик самолета, обгоняющего пароход) заявляет, что выстрел Онегина произошел до падения Ленского. Тут возражений пока нет.

Второй секундант (капитан парохода) уверяет, что выстрел Онегина и падение Ленского состоялись одновременно (и уже это не согласуется с очевидной причинной связью обоих событий).

Наконец, третий секундант (бакенщик) объявляет совсем невероятное: Ленский упал до того, как выстрелил Онегин. Налицо явное противоречие, грубейшее нарушение принципа причинности.

Такого, конечно, быть не может. Причины обязаны предшествовать следствиям. Почему же получилась нелепость? Попробуем разобраться.

Сразу бросается в глаза: в оценке дуэли нет равноправия мнений разных секундантов. Капитан и бакенщик сделали явно негодные заключения. Для капитана пуля была сразу в дуле пистолета Онегина и в сердце Ленского. А для бакенщика она летела в прошлое.

Назад во времени! Вроде невозможного эпизода с бандитом Клио, который убил мистера Барнея пулей, еще не вылетевшей из ружья, но потом сам был убит, когда еще не успел выстрелить... Уф...

Правда, на первый взгляд приемлемым выглядит мнение летчика. У него хоть принцип причинности не нарушен: сперва выстрелил Онегин и лишь потом упал Ленский. Но вот что важно: промежуток времени между этими событиями был столь мал, что пуля, по отсчету летчика, от Онегина до Ленского долетела раньше, чем световой сигнал. То есть она двигалась относительно летчика быстрее света. А это-то, оказывается, и недопустимо, ибо именно это породило абсурдные ситуации у капитана и бакенщика. Попробуем доказать сказанное, рассуждая «от противного».

В самом деле. Пусть онегинская пуля относительно летчика летит медленнее света. Тогда и для других секундантов она движется медленнее, чем свет (ведь только летчик мчится навстречу стреляющему Онегину, а скорость света у всех секундантов одинакова — второй постулат). Тут уже мимо всех секундантов пуля пролетит после того, как они увидят выстрел. И достигнет Ленского она после зарегистрированного выстрела Онегина. После — для всех секундантов. В том числе и для бакенщика.

Иными словами, в любых системах отсчета причина будет предшествовать следствию. Что и требуется.

Без сверхбыстрого

Теперь легко догадаться, как согласовать постулаты Эйнштейна с принципом причинности. Самый надежный способ — запретить нарушения этого закона, то есть отказать от чрезмерной быстроты полета пули Онегина. Пусть самая большая из возможных для нас скоростей — скорость света. Тогда все станет на место. Нарушения закона причинности отпадут автоматически.

Итак, ограничение, спасающее мир Эйнштейна от хаоса и беззакония, касается скоростей любых процессов, которыми переносятся сигналы и действия, то есть все, способное послужить связью между причинами и следствиями. Эта скорость не должна превышать све-

товую. Вот мы и пришли к строгому правилу движения в мире Эйнштейна: электроны, пули, ракеты, звезды, галактики не могут в нем двигаться относительно друг друга быстрее света. Любое превышение предельной скорости немедленно приведет к невозможной катастрофе — распаду причинного хода событий. Тогда уж не выщите: обязательно найдутся системы отсчета, в которых неродившиеся дети явятся в гости к своим юным, еще не познакомившимся родителям, поезда до отправления из Москвы станут прибывать в Ленинград и т. д.

Словом, Эйнштейн выступил в роли регулировщика. Всюду во Вселенной он развесил знаки, запрещающие, во имя порядка и законности бытия материи, движение сигналов и действий со скоростями, большими световой.

Раньше или позже?

Уместно повторить, откуда добыто только что изложенное правило. Исходным шагом был принцип причинности (невозможность нелепого убийства мистера Барнея пулей, которая еще не вылетела из ружья бандита Клио). Затем последовало эйнштейновское определение одновременности событий. Доказательство относительности одновременности (через игру «Кто первый?»). И дальше после эпизода с дуэлью стал необходим запрет сверхсветовых скоростей для сигналов и действий.

Читатель, благополучно добравшийся до этого места, может облегченно вздохнуть. В его руках пропуск в специальную теорию относительности. Скоро мы отправимся в эту чудесную страну сверхбыстрых движений.

Но предварительно — еще два маленьких замечания, относящихся к тонкостям.

Первое — расширенное резюме о понятиях «раньше» и «позже» в мире Эйнштейна. Когда речь идет о событиях причинно связанных, все ясно: в любых системах отсчета причина предшествует следствию. Для них понятия «раньше» и «позже» справедливы абсолютно. Ради этого и наложен запрет на сверхсветовые сигналы.

Для событий же, причинно не связанных, «раньше» и «позже» в разных системах отсчета могут меняться

местами и сливаться воедино — именно здесь разыгрывается удивительная эйнштейновская относительность одновременности. Вы видели это на примере игры «Кто первый?». Причем условие, при котором игра может привести к чехарде мнений в судейской коллегии, такое: со всех точек зрения промежутки времени между выстрелами Жени и Володи должен быть меньше длительности движения света между ними. В противном случае события, хоть и не связанные причинно, могут обрести причинную связь: скажем, Володя увидит, что Женя выстрелил, и поэтому сделает то же самое. Тогда игра превратится в некое подобие дуэли — и причина будет абсолютно раньше следствия.

Разумеется, никакая реальная игра не подходит под это условие. Если от Жени до Володи 3 километра, то свет пролетает это расстояние за сотысячную долю секунды. Значит, опоздания выстрелов при игре должны измеряться миллионными долями секунды — только тогда судьи вступят в спор.

Но вот один из игроков заброшен на Луну. Свет оттуда к нам идет более секунды. Второй же игрок, оставшийся на Земле, посылает партнеру радиосигнал (распространяющийся точно так же, как и свет), а полсекунды спустя, допустим, поднимает руку. Обитатель же спутника поднимает руку за полсекунды до того, как получит радиосигнал. Теперь наше условие соблюдено, и, следовательно, последовательность подъема рук для неодинаково движущихся судей разная. Космонавт, достаточно быстро летящий с Земли к Луне, зафиксирует первенство лунного игрока, а космонавт, летящий с Луны, — земного.

Безраздельно царствует относительность одновременности в мире событий, удаленных на звездные расстояния. Там, если события причинно не связаны, понятия «раньше» и «позже» совершенно неопределенны, причем неопределенность исчисляется месяцами, а то и более долгими промежутками времени. Не верьте писателям-фантастам, сочиняющим что-нибудь похожее на фразы: «Космолет врезался в атмосферу спутника Арктюра, а на Земле в это время встречали новый, 1999 год». Для разных наблюдателей с посадкой космолета может быть одновременна встреча разных годов на Земле!

Такова суть вещей. Ибо нет в природе сверхбыстрых сигналов, способных нести несуществующую абсолютную одновременность.

Проверная тень

Тут же, впрочем, я не откажу себе в удовольствии задать вам очередной каверзный вопрос: что быстрее — свет или тень? Ответ неожиданный: тень. Это как будто противоречит сказанному выше. Но — судите сами.

На Земле стоит вещь, вполне доступная нынешней технике, — прожектор, освещающий Луну. Узкий световой поток расширяется и создает на Луне пятно, покрывающее от края до края весь лунный диск (его диаметр 3476 километров). У прожектора есть затвор, вроде фотографического. Его шторка за тысячную долю секунды перекрывает световой поток. Ясно, что тень шторки будет двигаться по Луне со скоростью, превышающей скорость света.

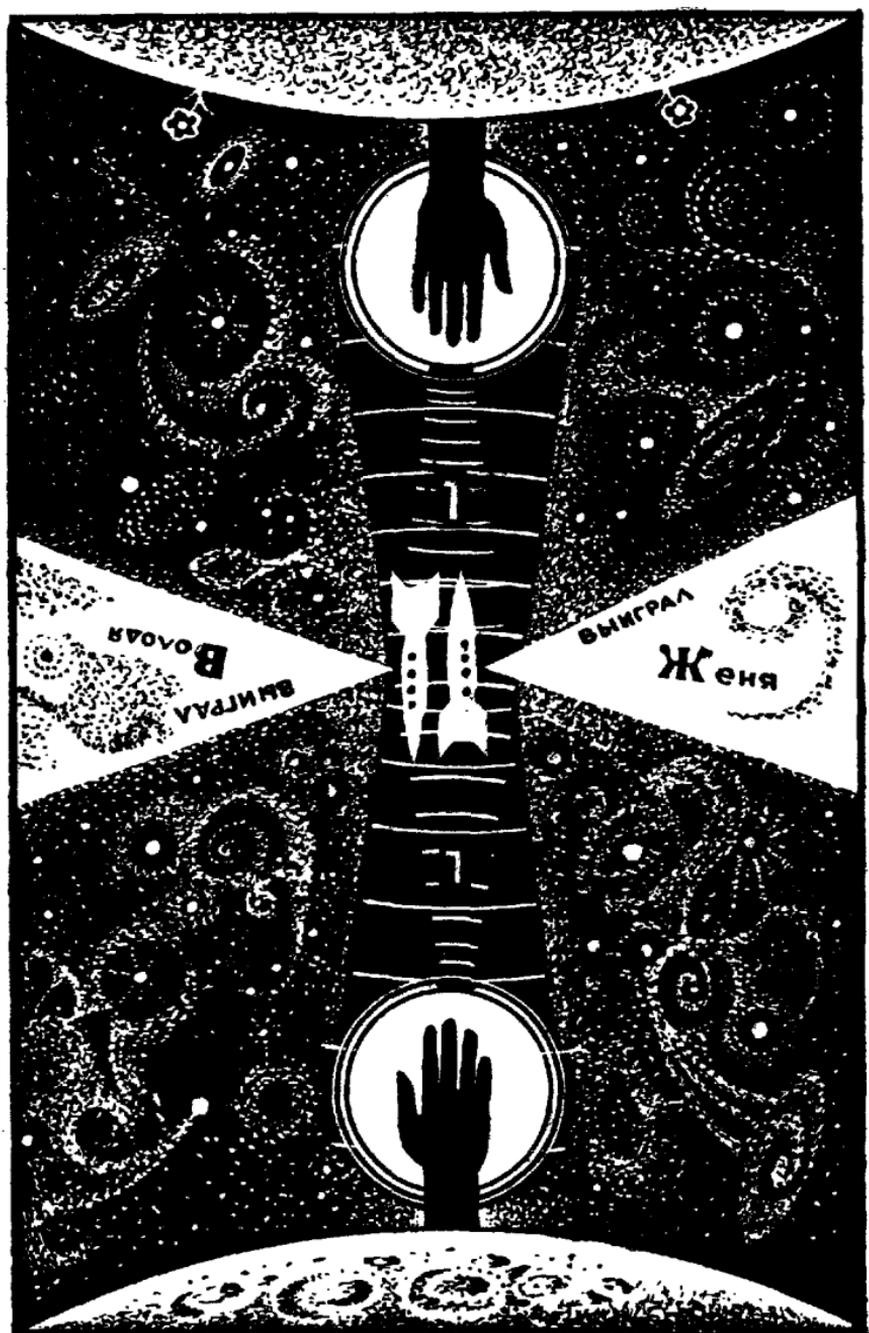
Как же быть с запретом Эйнштейна?

А никакого запрета нет.

Вспомните как запрет касается движения тел, переноса энергии, сигналов — того, что служит мостиками между причинами и следствиями. Ведь предельность скорости нужна лишь для соблюдения причинности. Тень же — не тело, тень не имеет энергии, без тени не способен служить сигналом.

Пусть некие обитатели Луны вздумали с помощью тени известить о чем-то своих коллег на противоположной стороне лунного шара. Чтобы исполнить замысел, они вынуждены послать просьбу на Землю: закройте, пожалуйста, затвор прожектора. Просьба полетит не быстрее света. Землянин-прожекторист закроет затвор, и «обрубленные» лучи, несущие на своих концах тень, полетят к Луне со скоростью света. Словом, вынгрыша нет. Было бы выгоднее не прибегать к услугам тени, а то получается вроде путешествия с Арбата на Таганку через Невский проспект.

Вообще говоря, обогнать свет нетрудно. Всякого рода тени и проекции в мире Эйнштейна не возбраняется двигаться как угодно быстро. Иногда кажется, что какое-нибудь из этих явлений можно использовать



для сверхбыстрой сигнализации. Молодежь, впервые знакомящаяся с теорией Эйнштейна (особенно студенты), вступает порой в бурные дебаты на эту тему. Но при тонком анализе всегда торжествует эйнштейновская точка зрения — сверхсветовой сигнализации нет и быть не может.

Ну что ж, кажется, правила движения в мире Эйнштейна изложены. Свету там разрешается лететь всегда с одной и той же скоростью; равномерные и прямолинейные движения все равноправны и неотличимы от покоя, который, в свою очередь, неотличим от прямолинейного равномерного движения. Понятия «раньше», «позже», «одновременно» приобрели свойство быть в определенных пределах относительными; сигналам и действиям запрещено двигаться быстрее света.

Глава 11. СВЕРХБЫСТРЫЕ ПРИКЛЮЧЕНИЯ

Диверсия в космосе

Помните бандита Клио? ¹ Он воскрес. Теперь он космический бандит, отъявленный негодяй, мерзавец, каких мало. Он наделен молниеносной реакцией, бессмысленной жадностью и хладнокровной жестокостью. Возможно, это злой робот. У него есть ракета — старенькая «Медуза». Он увел ее с космодрома неизвестной планеты и перекрасил в черный цвет. Вместе с этой разбойничьей ракетой он забрал в эту книжку со страниц какого-то фантастического комикса. Привязал «Медузу» к крошечному астероиду подле трассы «Сириус — Солнце» и высматривает, чем бы поживиться — на кого бы напасть и кого бы ограбить.

Ого! Кажется, мерзавцу повезло! Со стороны Сириуса мчит межзвездный корабль, белоснежный и лучезарный. Корабль приближается, разбойник видит название: «Заря». Судя по шегольскому виду обшивки, за ней наверняка полно всякого добра. Вот «Заря» пронесится

¹ Да простит мне читатель, что именем античной музы назван бандит и пират. Уж очень звучное имя. К тому же первым это сделал не я, а О. А. Вольберг, что до некоторой степени очищает мою совесть.

мимо. Пират немного удивлен — вместо длинного сигарообразного тела он видит быстро деформирующуюся грушу. Но злобный Клио не теряет — успевает мгновенно прилепнуть к стальному носу «Зари» атомную мину замедленного действия, часовой механизм которой поставлен на тридцать минут.

Бандит потирает руки. Мина прилепнута удачно. Вопреки законам физики, она не разрушилась при ударе о корпус. И Клио строит радужные планы.

«Сейчас полночь, — думает он. — В половине первого часовой механизм сработает, «Заря» разлетится на кусочки, я это увижу и полечу за добычей».

Программа заманчивая, но...

Разбойник смотрит вдаль, вслед улетевшей «Заре», поглядывает на свой хронометр. Проходит час, два, три часа — не видно никакого взрыва. Пиратский план явно срывается. Почему же? Неужели в mine испортились часы? Не может этого быть — механизм абсолютно надежен. Клио сам проверял его — он не боится сильнейших ударов, переносит любую тряску, какой угодно нагрев. Что же случилось?..

Почему не было взрыва

Через несколько месяцев с пустыми руками, голодный и унылый, пират возвратился из своего тайного полета на Землю. Укрыл «Медузу» в густом кустарнике, выбрался в ближайший городок. Было пасмурно и сыро. Клио зашел в кафе, взял газету «Звездный вестник» и сразу же наткнулся на заметку под заголовком: «Невестивенный пират».

В заметке точно описывался кровавый замысел Клио. В конце же сообщалось, что мину нашли работники космодрома, куда «Заря» прилетела через... двадцать минут после встречи с пиратом. Мину обезвредили за десять минут до назначенного взрыва! Дальше было напечатано: «Поиски преступника ведутся. Его приметы: очень быстрая реакция и незнание релятивистских эффектов».

Разбойнику стало не по себе. Тревожила опасность ареста и возмездия. Но главное — не укладывалось в голове то, о чем было рассказано в заметке. Ведь от места,

где он налепил на «Зарю» мину, до земного космодрома — по меньшей мере миллион миллиардов километров. Даже свет — самое быстрое в мире — мог пройти этот путь за год. А «Заря», выходит, проскочила его за двадцать минут!

«Вопиющая нелепость! — негодовал Клио. — Ничто телесное не может лететь быстрее света, это нарушило бы закон причинности!»

Горячий кофе с доброй порцией старого коньяка улучшил настроение преступника. «Вероятно, — думал он, — в газете речь идет не обо мне. Я ведь находился слишком далеко от Земли. Наверное, моя мина разнесла другую ракету, а я не заметил вспышки взрыва, потому что он, может быть, был загорожен от меня каким-нибудь непрозрачным облаком космической пыли».

Клио повеселел. «Ха-ха, — злорадствовал он, — пока они тут ведут свои розыски, я еще поищу остатки разрушенного корабля. Каррамба!..»

Пират доел бутерброд с сыром и уже намеревался уйти, чтобы продолжить свое черное дело, как за столиком сел незнакомец. Пронизывающий взгляд серых, с бесстрашной смешинкой глаз пригвоздил бандита к месту.

— К-кто вы? Ч-что вам нужно? — пролепетал побледневший пират.

— Моя фамилия Прошкин. Майор Прошкин из Уголовного розыска Солнечной системы, — прозвучал спокойный ответ. — И у меня к вам есть вопрос. Скажите, пожалуйста, что такое, по Эйнштейну, собственное время?

Пират молчал.

— А релятивистское время?

Клио не знал, что ответить. Его осведомленность в теории относительности оказалась явно недостаточной (впрочем, точно такой же, как и у моих читателей, дочитавших книжку только до этого места).

— Все ясно, — строго сказал пронизательный майор.

На запястьях бандита щелкнули наручники. Прозвучала команда:

— Пройдемте!

И пойманный пират под дулом пистолета понурившись зашагал в ближайшее отделение милиции.

Сейчас вы поймете, в чем дело.

Щелчки пальцами

Вспомним вкратце логику нашего разбора теории относительности.

Вначале было рассказано об опыте Майкельсона. Из опыта Майкельсона и провала баллистической теории света извлечены два постулата Эйнштейна.

Из кажущейся противоречивости этих постулатов последовала трудно представимая и непривычная относительность одновременности.

Сопоставление относительности одновременности с принципом причинности выдвинуло запрет скоростей, превышающих световую, для любых сигналов.

Теперь предстоит понять знаменитую эйнштейновскую относительность времени. То есть согласиться, что ход часов зависит от движения наблюдателя.

Легче всего извлечь относительность времени из относительности одновременности.

Если я одновременно (для себя) щелкаю пальцами на раздвинутых руках, то для меня промежуток времени между щелчками равен нулю (предполагается, что я это проверил способом Эйнштейна — встречные световые сигналы вместе пришли в середину расстояния между парами щелкающих пальцев). Но тогда для любого наблюдателя, движущегося «бокком» относительно меня, щелчки будут не одновременны. А значит, по его отсчету мое мгновение станет некоей длительностью.

Наоборот, если он щелкает пальцами на раздвинутых руках и с его точки зрения щелчки одновременны, то для меня они окажутся неодновременными. Поэтому его мгновение я воспринимаю как длительность.

Подобно этому, мое «почти мгновение» — очень короткая длительность — для движущегося наблюдателя растягивается. А его «почти мгновение» растягивается для меня. Словом, мое время для него замедляется, его же время замедляется для меня.

Правда, в этих примерах не сразу видно, что во всех системах отсчета сохраняется направление времени — обязательно от прошлого к будущему. Но это легко доказать, вспомнив о запрете сверхсветовых скоростей, что делает невозможным движение во времени вспять.

Очень наглядно относительность времени видна в следующем эпизоде.

Алла смотрит на Эллу

Элла и Алла — космонавтки. Они летят на разных ракетах в противоположные стороны и проносятся мимо друг друга. Элла — хорошенькая и любит смотреться в зеркало. Алла — тоже. Кроме того, обе девушки наделены сверхчеловеческой способностью видеть и обдумывать неуловимо быстрые явления.

Итак, Элла сидит в ракете за штурвалом и поглядывает в зеркальце, висящее на боковой стене кабины. Разглядывает собственное отражение и размышляет о неумолимом беге времени. Там, в зеркале, она видит себя в прошлом. Ведь свет от ее лица сначала дошел до зеркала, потом отразился от него и вернулся обратно. На это путешествие света ушло время. Значит, Элла видит себя не той, какая она есть *теперь*, а чуть-чуть более молодой. Примерно на трехсотмиллионную долю секунды — так как скорость света равна 300 000 километров в секунду, а путь от лица Эллы до зеркала и обратно — примерно метру. «Да, — думает Элла, — время неумолимо. Даже увидеть себя можно только в прошлом!..»

Алла, летящая на встречной ракете, поравнявшись с Эллой, приветствует ее и любопытствует, чем занята подруга. О, она смотрится в зеркало! Хочет убедиться, что она молода! И Алла, заглянув в зеркало Эллы, тоже успевает подумать о быстротекущем времени. Однако приходит к несколько иным заключениям. По оценке Эллы, Элла стареет медленнее, чем по оценке самой Эллы!

В самом деле, пока свет от лица Эллы добрался до зеркала, зеркало относительно Аллы сместилось — ведь ракета движется. На обратном пути света Алла отметила дальнейшее смещение ракеты. Значит, для Аллы свет шел туда и обратно не по одной прямой линии, а по двум разным, несовпадающим. На пути «Элла — зеркало — Элла» свет шел углом, описал нечто похожее на букву «Λ». Поэтому с точки зрения Аллы он прошел больший путь, чем с точки зрения Эллы. И тем больший, чем больше относительная скорость ракет.

Алла — не только космонавт, но и физик. Она твердо знает: по Эйнштейну, скорость света всегда постоянна, в любых системах отсчета одинакова, ибо не зависит от движения светового источника. Следовательно, и для

Аллы и для Эллы скорость света составляет 300 000 километров в секунду. Но если с одной и той же скоростью свет умеет проходить в разных системах отсчета разные пути, вывод отсюда единственный: время в разных системах отсчета течет по-разному. С точки зрения Аллы, свет у Эллы прошел больший путь. Значит, на это и времени ушло больше, иначе скорость света не сохранилась бы неизменной. По измерениям Аллы, время у Эллы течет медленнее, чем по измерениям самой Эллы.

Парадокс близнецов

Снова обратимся за помощью к девушкам-космонавткам. Но на этот раз переменим задания — попросим поглядеться в зеркало Аллу, а Элле дадим роль наблюдательницы.

Опускаем рассуждения, полностью повторяющие сказанное несколькими строками выше. И делаем заключение: с точки зрения Эллы, у Аллы время течет медленнее.

Вам не кажется это странным?

Для Аллы отстают часы Эллы.

Для Эллы отстают часы Аллы.

Для Аллы Алла стареет медленнее.

Для Эллы Алла стареет медленнее.

Ужасно хочется спросить: чьи же часы отстают «на самом деле»?

Пока речь идет только о прямолинейных равномерных движениях, пока разлетевшиеся в разные стороны наблюдатели не возвращаются, чтобы сверить часы, календари и разглядеть друг друга, вопрос этот незаконен. Так же, как незаконен вопрос: кто «на самом деле» движется, Алла или Элла? Ведь никаких преимуществ друг перед другом у них нет (снова вспомните первый постулат). Поэтому строго действует удивительное заключение об относительности их старения.

Другое дело, если Алла вернется к Элле. Вернуть Аллу — значит ее замедлить, остановить, ускорить в обратном направлении. И тем самым нарушить равномерность ее движения. Тут уж к Алле нельзя отнести первый постулат. Ее движение не является неотличимым от покоя (есть ускорение!). Равноправие Аллы и Эллы

пропало: потеряла право голоса Алла. Единственно законным будет отсчет Эллы, которая не испытывала никаких ускорений. И так как для Эллы медленнее стареет Алла, то именно это соответствует истине.

Медленнее стареет тот, кто возвращается.

Фантасты очень любят этот «парадокс близнецов». Масса рассказов посвящена тому, как вернувшийся из дальних странствий еще молодой звездоплавателю застает своего брата-близнеца (домоседа) глубоким старцем.

Недавно этот эффект подтвержден сверхточным экспериментом с микрочастицами (в своем месте о нем будет рассказано). А самое относительность времени физики уже много лет наблюдают в явлении распада частиц, называемых мезонами: чем быстрее движется мезон, тем дольше он остается нераспавшимся. Его время для нас замедлено.

Еще и еще раз обдумайте прочитанное. Перед вами — во всей красе! — чудесное своеобразие физики Эйнштейна. Физики, в которой нет абсолютного математического времени, а есть бесчисленные для всех движений свои, *собственные* времена (измеренные наблюдателем, неподвижным относительно часов) и бесчисленные *релятивистские времена* (измеренные наблюдателем, который движется относительно часов прямолинейно и равномерно).

Стройная, логичная, тем не менее эта физика потрясает всех, кто впервые постигнет ее. Ибо она (извините за повторение) кардинально не соответствует тому старому, вошедшему в плоть и кровь представлению о мире, к которому мы с вами привыкли с самого раннего детства.

И все-таки этой новой поразительной физике можно научиться, можно ее постичь, привыкнуть к ней. И — перестать ей удивляться. Убежать от удивления!

Космическая торговля

Наш театральный злодей Клио был недоучкой и понятия не имел о собственном и релятивистском временах, потому-то он и попал впросак. Как только адская машина оказалась на мчащейся ракете, ее часовой ме-

ханизм перестал идти в собственном времени пирата и подчинился собственному времени ракеты, которое стало для пирата релятивистским временем. А оно для Клио текло медленнее собственного его разбойничьего времени. По той же причине, по какой для Аллы Элла старела медленнее, чем сама Алла.

Остается, однако, еще одно недоумение.

Как могла лучезарная «Заря» проскочить миллиарды километров пути за двадцать минут? Неужели, вопреки строжайшему запрету Эйнштейна, она летела-таки быстрее света?

К счастью, такой беды не случилось. Ракета мчалась достаточно быстро, но медленнее света. И (внимание!) покрыла вовсе не миллиарды километров пути, а гораздо меньше. Абсолютно никаких законов не нарушив, она после встречи с Клио прибыла на место спустя двадцать минут по собственному ракетному времени.

— Стоп, стоп, — задержит меня зоркий читатель. — Почему это «вовсе не миллиарды»? По какой причине «гораздо меньше»? Что еще за новости?

Отвечаю.

В теории относительности, кроме замедления релятивистского времени, существует еще один столь же чудесный эффект, касающийся пространственных отсчетов. Там, говоря словами песни, «сокращаются большие расстоянья».

Вот как это происходит.

Для разнообразия Алла и Элла переименовываются в Валию и Галию. Кроме того, в интересах научной популяризации они наделяются добавочной профессией. Валя и Галя — не только brave космонавтки, но и продавщицы космических магазинов. Магазинов два. Оба на сверхбыстрых ракетах. На обоих длинные прилавки, расположенные параллельно линии движения.

Один магазин — часовой. Прилавок украшен всевозможными часами самого высокого качества. Продавщицей работает Валя. Она очень аккуратна, и поэтому все часы на прилавке заведены, сверены и идут совершенно одинаково (разумеется, для Вали и других наблюдателей, неподвижных относительно прилавка).

Другой магазин — универсальный. Продавщица — Галя. Есть что угодно для души — ботинки, кружева, а также ленты для вплетания в косы (дело происходит в

том прекрасном будущем, когда косы снова войдут в моду).

Для рекламы Галя положила на своем прилавке кусок самой красивой ленты. Длина куска, по Галиным измерениям, десять метров.

События разворачиваются так. Магазины-ракеты сближаются. Они несутся друг относительно друга со скоростью, близкой к тремстам тысячам километров в секунду. Вот-вот они поравняются, чтобы тут же разойтись в противоположные стороны. И, едва заметив приближение космического универсама, Валя ощущает непреодолимое желание купить ленту, которая лежит на прилавке. Она мгновенно сообщает об этом Гале. Галя мгновенно сигнализирует.

— Пожалуйста, берите. В куске десять метров.

Валя мгновенно оценивает на глаз длину куска и отвечает:

— Не может быть! Я вижу, что кусок короче!

Галя мгновенно обижается, поджимает губки и сообщает:

— Надо же! Если хотите, измеряйте сами! Но с прилавка не снимайте.

Валя мгновенно соображает, как проверить длину куска, несущегося мимо: надо одновременно засечь его оба конца на своем прилавке. Строго одновременно! Иначе будет ошибка, вызванная движением ленты. Что ж, у Вали есть длинный ряд одинаково (для Вали!) идущих часов, которые (допустим!) отсчитывают время с точностью в миллиардные доли секунды.

Нам остается вообразить, что Валя успела исполнить задуманное — отметила на прилавке двое часов, мимо которых концы ленты проскочили в один и тот же момент времени. Растянула рулетку и измерила расстояние между часами. Вышло два метра. А не десять.

Получив этот результат, Валя поступила поспешно и необдуманно. Во-первых, она рассердилась и отказалась от покупки. Во-вторых, радировала улетевшей Гале довольно резкие слова возмущения. В-третьих, тут же сообщила в управление космической торговли, что продавщица ракетного универсама бесовестно обмеривает летящих навстречу покупателей.

В управлении в срочном порядке образовали авторитетную комиссию для проверки жалобы.

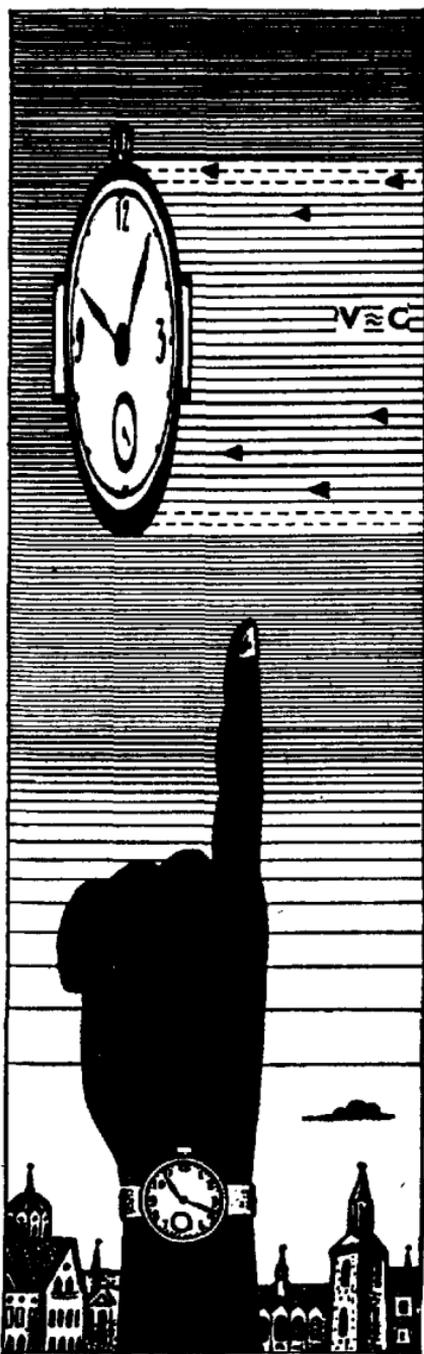
Что сказала комиссия

Комиссия приступила к делу незамедлительно. И полностью оправдала Гаю. Вале же было предписано в обязательном служебном порядке усвоить нижеследующее.

Действительно, для проверки длины движущейся ленты можно было одновременно засечь точки ее концов. Но не следовало забывать относительность одновременности.

Когда Галя измеряла длину ленты, она обошлась без часов—просто приложила ленту к линейке, укрепленной вдоль прилавка. Так поступают все продавцы, строители, закройщики и прочие обитатели Земли. Они не ошибаются, потому что с течением их времени линейка и лента не смещаются друг относительно друга, а если и смещаются, то медленно. Вполне законно считать, что концы ленты зафиксированы на линейке одновременно (относительно Гали).

Вале же пришлось проверять длину ленты, движущейся со скоростью, близкой к скорости света. Одновременность засекания концов тут стала обязательным техническим условием правильного измерения. Валя пунктуально исполнила



его — соблюла одновременность засечек по своим часам (благо имела длинный ряд одинаково идущих часов на своем прилавке).

Вот тут-то и получилась р. ца. Одновременное для Вали оказалось неодновременным для Гали. По отсчету Гали Валя сперва засекала начало ленты (пусть оно ближе к носу Галиной ракеты), а потом — конец. Именно такой порядок событий «расщепившейся» одновременности получится, если разобрать наш пример подробно — так, как это сделано на страницах 109 и 110 при анализе игры «Кто первый?» (предоставляю читателю удовольствие заняться этим самостоятельно).

Другими словами, с точки зрения «неподвижной» Гали, «движущаяся» Валя опоздала с засечкой конца ленты. За время опоздания он успел переместиться вперед, и длина ленты получилась меньше.

Не зная теории относительности, Галя могла бы сказать, что Валя сделала ошибку в измерении. Однако в действительности никакой ошибки не было. Ведь с точки зрения Вали, считающей «неподвижной» себя, не было опоздания засечки конца ленты. Длину движущейся ленты Валя измерила совершенно верно!

Вывод снова удивителен: длина ленты в действительности меньше для Вали, чем для Гали! Длина относительна! Величина расстояний зависит от относительной скорости тех, кто измеряет эти расстояния, кто их проходит.

Сокращаются большие расстояния

Вместо Вали покупательницей может оказаться Галя. Если она вздумает на ходу приобрести в космическом часовом магазине ремешок для часов, то длина ремешка, уложенного вдоль Валиного прилавка, окажется для Гали меньше, чем для Вали. Ход рассуждений, доказывающих это, полностью совпадает с объяснением казуса при покупке ленты, только Валя и Галя поменяются местами.

Положение дел таково: движущийся предмет для «неподвижного» наблюдателя обязательно сокращает свои размеры по линии движения. Это касается всего — и лент, и ремешков, и полноты человеческих фигур, и продольного (по движению) размера ракет. Круг,

быстро пролетая мимо наблюдателя, с его точки зрения имеет форму овала, сплюснутого по линии полета¹.

Надо, я думаю, ещё раз подчеркнуть: круг этот не кажется, не выглядит, а именно является овалом. Он — на самом деле овал для такого наблюдателя.

Во время обеденного перерыва Валя и Галя прилегли отдохнуть на диванах, параллельных направлению движения ракет. И тогда для Вали Галя стала меньше ростом, а для Гали — Валя. Противоречие?

Нисколько.

Может же Элла стареть медленнее Аллы, а Алла — медленнее Эллы. Это — новые, неведомые нам прежде, законы физики, извлеченные из парадоксального соседства двух постулатов Эйнштейна. Старайтесь привыкать.

Разгуливая по городу, вы не удивляетесь, что приятель, появившийся в конце улицы, кажется вам меньше вас, в то время как вы ему кажетесь меньше его. Из этой фразы надо выкинуть слово «кажется» — и выйдет эффект сокращения релятивистской длины.

Приятель выглядел маленьким потому, что вы его разглядывали под малым углом зрения. Угол зрения не абсолютен. Он зависит от роста приятеля и расстояния до него. Нельзя сказать: фабричная труба имела небольшой угол зрения. Требуется обязательно уточнить — с такого-то места труба наблюдалась под таким-то углом зрения. А сама по себе труба не имеет угла зрения.

То же самое — с понятием длины. Длина любого предмета не абсолютна. Сам по себе предмет не имеет длины. Она, словно угол зрения, существует только для наблюдателя и зависит от скорости наблюдателя. Это не значит, правда, что предмет вообще не имеет признака, независимого от движения наблюдателя. Есть такой признак. Ни длительность, ни длина на эту роль не годятся. А что годится — вы узнаете в тринадцатой главе.

¹ Для дотошных: точно представить себе форму такого овала довольно сложно — надо учитывать, что даже при фантастически быстрой зрительной или осязательной реакции будут восприняты «неодновременные» участки летящего тела (а в действительности измененной формы увидеть, конечно, не удастся).

Почему провалилась диверсия

Особенно примечательно и важно, что относительность расстояний в полной мере касается путей, по которым движутся сверхбыстрые ракеты. Сжимаются ведь сами масштабы единиц измерения длины.

Вообразите невозможное: между Землей и Сириусом натянута лента. Длина ленты — разная для разных наблюдателей. Обитатель Земли неподвижен относительно ленты. Измерив ее длину, он получит десять световых лет¹. Таково расстояние между Землей и Сириусом, по справедливому мнению земных астрономов.

Но вот вдоль ленты помчалась ракета. Для космонавтов лента стала короче, а значит, для них сократилось расстояние между Сириусом и Землей! Чем быстрее летит ракета, тем короче для нее назначенный путь! Управляя своей скоростью, мы способны приблизить или удалить далекую цель полета!

Остается убрать ленту и вообразить, что придуманная сейчас ракета — та самая лучезарная «Заря», которая получила зловещий подарок от межзвездного пирата Клио. Где-то в двух световых месяцах от Земли (по земному счету) к ней была прилеплена атомная мина замедленного действия с часовым механизмом, поставленным на тридцать минут. Развитие событий вам известно: через двадцать минут ракета была на Земле, и мину обезвредили на космодроме. Подлая диверсия позорно провалилась. Пират, не знавший теории относительности, потерпел крах.

Я надеюсь, мои читатели уже понимают, почему это произошло.

Во-первых, по часам землян (или Клио, который был неподвижен относительно Земли) от встречи с пиратом до финиша прошло почти два месяца, а для космонавтов (значит, и для летящей с ними адской машины) этот путь занял всего двадцать минут (так как «Заря» двигалась почти со скоростью света).

Во-вторых, по оценке Клио, расстояние до Земли равнялось, как было сказано, двум световым месяцам ($7,7 \cdot 10^{10}$ километров), а для космонавтов, летевших почти со скоростью света, это расстояние составило

¹ 10 годовых путей света.

меньше двадцати световых минут (что-то около $2,5 \cdot 10^7$ километров).

В результате — счастливый конец. И никаких нарушений. Как для землян (или для Клио), так и для космонавтов «Заря» летела медленнее света. Земляне и Клио наблюдали «Зарю» в своем пространстве и своем времени. Космонавты же жили в своем времени и своем пространстве. Для землян собственное пространство и собственное время космонавтов были релятивистскими (время — замедлившимся, пространство — укоротившимся).

Вот вам кинематика быстрых равномерных движений. Как видите, мало похоже на то, к чему мы привыкли в нашем «медленном» мире. А потому и нелегко для усвоения.

Глава 12. НА ЯЗЫКЕ ГРАФИКОВ

Вклад Гершана Минковского

Любознательный человек не может остаться равнодушным, постигая относительность расстояний и времени. Хочется еще и еще раз убедиться в этой неожиданной истине, представить ее в примере, в событии, в чертеже.

Сразу после провозглашения принципа относительности люди науки начали азартно осваивать новый взгляд на движение.

Тут было над чем подумать не только физику, но и математику и философу. Как из рога изобилия, сыпались возражения. Объявились ярые враги «нелепостей» странной теории. Даже в кругу сторонников Эйнштейна не умолкали споры. Ученики перемешались с учителями, каждый стремился найти новую черту, новую подробность, новое истолкование теории относительности. И находили. Решали только что придуманные парадоксальные задачи, доказывали поразительные теоремы.

Одна из работ того времени стала особенно заметной вехой в развитии релятивистской физики. Речь идет о геометрической интерпретации идей теории Эйнштейна, о представлении ее в графиках и диаграммах. Автором этого оригинального подхода, ставшего затем неизмен-

но принадлежностью и монографий, и учебников, и популярных брошюр, был немецкий математик Герман Минковский, один из старейших коллег Эйнштейна, его университетский учитель.

Стоит заметить, что Минковский не питал никакого интереса к личности Эйнштейна. Более того, старый профессор однажды объявил, что ни за что не поручил бы Эйнштейну разработку геометрической интерпретации его же теории по той причине, что Эйнштейн, как полагал Минковский, был человеком необязательным, ибо «вечно пропускал университетские лекции».

Это не помешало Минковскому быть энтузиастом эйнштейновских воззрений и великолепным их истолкователем.

В 1908 году, незадолго до смерти, Минковский прочитал в немецком научном обществе лекцию о мире, пространстве, времени, в которой произнес знаменитую фразу: «Отныне и навсегда пространство и время превращаются лишь в тени, и только некий род единства того и другого сохраняет независимое существование».

Очень коротко и упрощенно мы попробуем разобраться в интерпретации Минковского. Причем перед самыми ленивыми из читателей я вынужден извиниться: на ближайших страницах совершенно неизбежны не очень длинные (и, мне кажется, вовсе не трудные) рассуждения в духе школьных геометрических теорем¹.

Москва — Ленинград

Сперва несколько слов о совсем-совсем простом.

Что случилось на Октябрьской железной дороге такого-то числа с полуночи до шести часов утра?

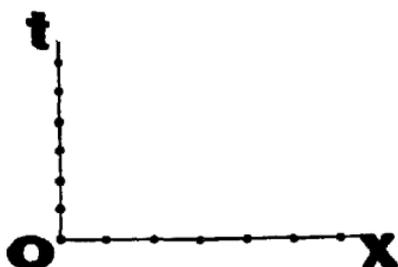
Было довольно много всевозможных событий. Поезда отправлялись, встречались друг с другом, делали короткие и длинные остановки, прибывали в пункт назначения и т. д. Все это можно подробно выяснить в железнодорожном расписании — весьма сложной таблице со множеством граф, клеточек, слов, цифр. Но гораздо проще поступить иначе: взглянуть на графическую диаграмму движения.

¹ Те, кому совсем нелегко чертить и рассматривать графики, могут пока пропустить эту и следующую главы.

График — очень удобная вещь. Вместо того, чтобы писать уйму слов и цифр, проводится линия на листе миллиметровки — и все, что нужно объяснить, объяснено.

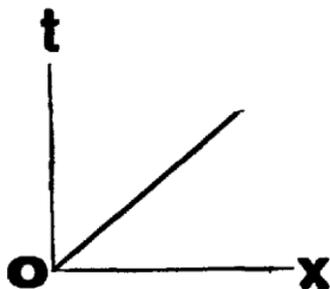
Вот, например, фраза: «Точно в полночь от перрона в Москве отошел экспресс, который двигался затем без остановок равномерно со скоростью сто километров в час и ровно в шесть часов утра прибыл в Ленинград». На графике это громоздкое изречение заменяется прямой линией.

В самом деле, диаграмма такова:



Ось x — условное изображение расстояния, которое проходит поезд. Ось t — геометрический образ времени движения. Обе оси поделены на единицы длины и времени в уменьшенном масштабе.

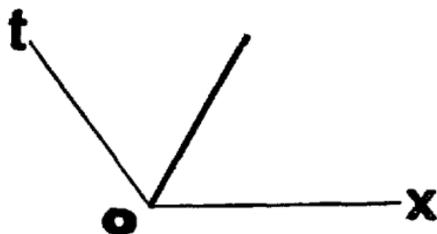
Сначала диаграмма пуста. Но вот пробил полночь, и из Москвы вышел экспресс. Через час он уже в ста километрах от Москвы, через два — в двухстах, и т. д.



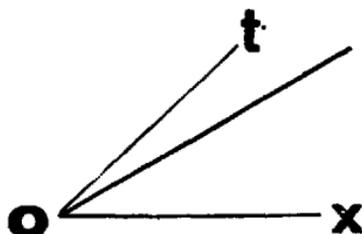
Чтобы построить график, из точек оси x , соответствующих началам каждой новой сотни километров, проводим вспомогательные линии, параллельные оси t , а из точек начала каждого нового часа оси t — параллельные оси x .

Там, где соответствующие друг другу вспомогательные линии пересекутся, получатся точки графика. Поезд в них характеризуется двумя признаками: «там» и «тогда».

Пока все ясно, никаких трудностей. Легко согласиться, конечно, и с тем, что угол между осями не обязательно прямой. Если он тупой, график пойдет так:



Если острый, то, скажем, так:



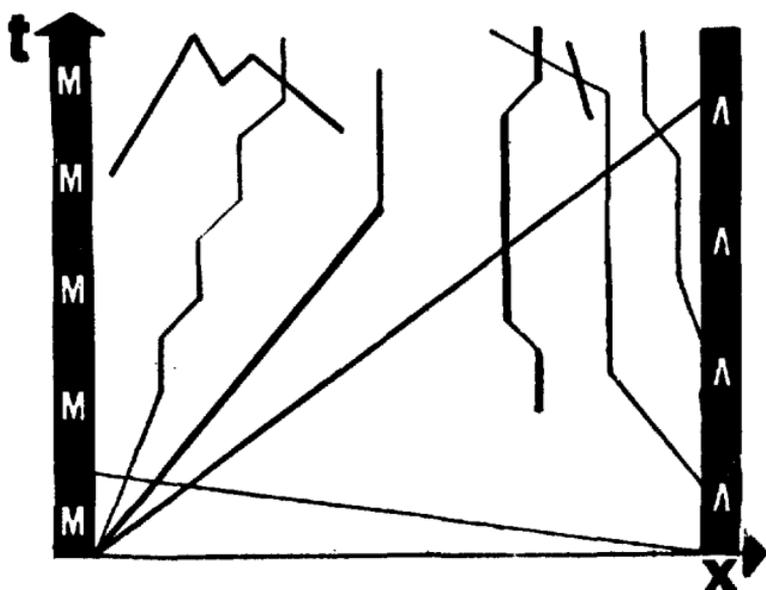
Теперь храбро (хоть и чуть преждевременно, но это ради понятности) применим терминологию Минковского.

Точки графика — это *мировые точки*. Сам график — *мировая линия*. И, наконец, *мир* — нарисованная нами диаграмма.

Как видите, в старое слово «мир» Минковский вложил оригинальный физический смысл: графическое изображение на диаграмме событий сразу в пространстве и времени. Здесь это объединение пространства и времени чисто формальное, продиктованное требованием удобства и лаконизма. Но зато как велики эти удобства!

Мир железной дороги

Предлагаю вам внимательно разглядеть следующую картинку:



Все события, происшедшие за четверть суток на Октябрьской дороге, нашли здесь точное отображение. Сэкономлена масса бумаги и типографской краски. Каждую мировую линию вы при желании расшифруете словами и цифрами, составив, таким образом, длинные перечни событий.

Есть тут поезда скорые, идущие быстро и почти без остановок; есть почтовый поезд, еле плетущийся, останавливающийся «у каждого куста»; есть товарняки, которые больше стоят, чем едут. Кроме того, есть нечто весьма быстрое — добравшееся из Ленинграда в Москву за час (я думаю, это самолет, летевший вдоль дороги).

На диаграмме хорошо заметен тот факт, что все в мире движется не только в пространстве, но и во времени. Движению *только* во времени дается выразительная интерпретация: мировая линия становится параллельна оси t . Вон, в середине, какой-то товарняк застрял в Бологом, но мировая линия его тянется вверх. Не сдвигаясь с места, он путешествует в будущее.

Такие же параллельные оси времени мировые линии можно было бы нарисовать и для рельсов, и для шпал, и для каждой станции. Я ограничился тем, что попросил нарисовать их только для Москвы и Ленинграда. Вышли не линии, а столбики — потому что оба города отнюдь не точки, а имеют внушительные размеры. Продвигаясь во времени, длины городов как бы размазываются в полоски.

Попробуйте сами

Есть на последней диаграмме график с подвохом — специально, чтобы вы над ним подумали. Вон он в левом верхнем углу, что-то вроде буквы «М». Если нашли, задержите чтение и попытайтесь сообразить, какими словами, какой последовательностью событий можно его расшифровать. Стоп! Дальше пока не читать!

Думайте...

Кто сам догадался — молодец.

Этот график — не одна мировая линия, а четыре. Каждый прямой отрезок — особый поезд. Но идут они в разных направлениях. Первый слева — к Ленинграду, второй — к Москве, третий — тоже к Ленинграду, четвертый — к Москве. Первый встречается со вторым, второй выходит из одного пункта с третьим одновременно, но в разные стороны, а в конце своего пути встречается с четвертым. Почему такое раздробление? Во исполнение закона причинности. Если бы второй и четвертый поезда шли к Ленинграду, они двигались бы в обратном времени, путешествовали бы в прошлом. И прибыли бы в пункт назначения до ухода из пункта отбытия, что невозможно, ибо принцип причинности нерушим.

Двигаться в мире разрешено только так, чтобы время текло в одну сторону — вперед. По оси расстояний можно кататься туда и обратно — вправо и влево, а по оси времени лишь в будущее, то есть, на нашей диаграмме, вверх. Поэтому каждый прямой отрезок буквы «М» должен проходить снизу вверх.

Подвохи еще не кончились. Вот вопрос: что произошло в точках встреч мировых линий, в вершинах «М»?

Там случились, надо полагать, страшные крушения, или, в лучшем случае, в этих точках поезда были очень

быстро расформированы. Так или иначе, но они наверняка исчезли.

Ведь если бы первый поезд просто остановился, встретившись со вторым, то его мировая линия не пропала бы, а потянулась в будущее по прямой, параллельной оси времени. Но линии нет. Значит, сошедшиеся поезда тоже исчезли. Что и требовалось доказать.

Честно говоря, сейчас была предложена довольно трудная для новичка логическая задача. Кто не решил ее, пусть не печалится. Хорошо, если он хоть разобрался в объяснении.

Простенькая фигурка на диаграмме рассказала нам, как видите, весьма поучительную логическую историю. Из нее полезно извлечь мораль: рисуя мировые линии, помните, что у них есть направления — разрешенное и запрещенное законом причинности.

Идущий поезд „неподвижен“

Бездельничая в купе, пассажиры говорят:

— До Бологого пять километров.

— Остался час до Ленинграда.

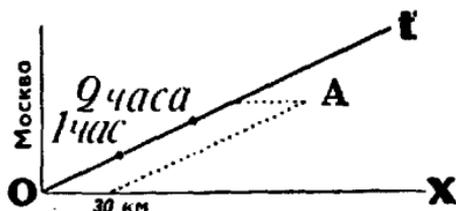
В таких сентенциях отсчет времени и расстояний всегда ведется от поезда. Это понятно. Пусть где-то на пути неожиданно лопнул рельс. Машинисту и пассажирам жизненно важно знать, далеко ли и с какой стороны это произошло именно от поезда. Расстояние же лопнувшего рельса от Москвы или Ленинграда для обитателей поезда несущественны.

Поэтому пассажиры и машинист, пользуясь отсчетом «от поезда», склонны неосознанно применять принцип относительности и чувствовать себя неподвижными, а движущейся считать дорогу вместе со всеми станциями, Москвой и Ленинградом. Это им удобно. С этой точки зрения они могут нарисовать диаграмму движения. Как же изменится ее вид?

Да никак не изменится. Только система отсчета из прямоугольной делается косоугольной. Старая ось времени превратится в мировую линию Москвы. Мировая линия поезда станет новой осью времени t , на которой увеличится масштаб, то есть длина отрезков, изображающих часы или минуты. Ось расстояний останется без

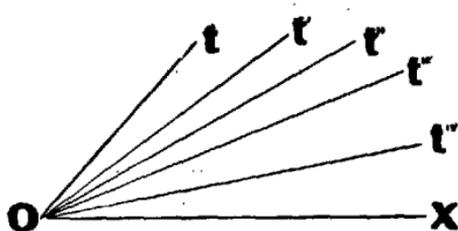
перемен. А положение относительно поезда событий (мировых точек) определится по прежним правилам: в пересечении вспомогательных линий, параллельных осям расстояний и времени.

Взгляните:



Здесь мировая точка A — удар молнии в рельс. Как видно из построения, он произошел в 2 часа 35 минут в тридцати километрах перед поездом.

Диаграмма дает возможность пойти навстречу не только обитателям экспресса Москва — Ленинград. Каждый поезд вправе объявить себя неподвижным, и это вполне поддается геометрическому изображению: надо только его мировую линию переименовать в ось времени. Для поездов, выходящих из Москвы (а заодно и для самой Москвы), пусть получится такая картина:

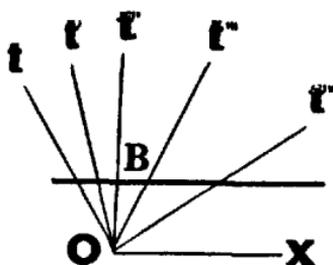


Все оси времени (Ot, Ot', Ot'', Ot''' и т. д.) тут равноправны, а ось расстояний у них общая.

Различие систем чисто условное — в масштабах времени. Как же находить эти масштабы?

Отметив на одной из осей времени отрезок OB , соответствующий часу, проводим через точку B линию, параллельную оси расстояний. На всех остальных осях времени она отметит одновременные события, а значит, отсекает отрезки, равные часу.

Эта линия, указывающая масштабы систем отсчета, называется *калибровочной*.



Вот, пожалуй, и готов пространственно-временной мир Октябрьской железной дороги. Полную его картину (для обоих направлений) вы при желании легко нарисуете сами. В этом мире царит ньютоновское абсолютное пространство (ось расстояний единственная на все поезда), присутствует абсолютное время (любая линия, параллельная оси расстояний, проходит через события, абсолютно одновременные во всех системах отсчета), узаконен галилеевский принцип относительности.

Так выглядит диаграмма равномерных прямых движений, которые медленны по сравнению со светом. Мир доэйнштейновский.

Четыре шага

Ну, а какова диаграмма эйнштейновского мира?

Ее построим постепенно, в несколько шагов.

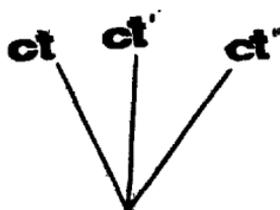
Шаг первый. Рисую оси Москвы. Ускоряю поезда в миллионы раз. Они мчат со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Из Москвы в Ленинград попадают за малые доли секунды. Их мировые линии сжались в плотный пучок.



Графики идут так густо, что разобрать ничего не возможно. Как быть?

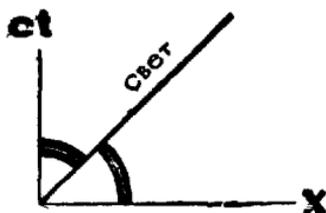
Шаг второй. Надо растянуть оси времени. Тогда нижняя часть диаграммы вытянется вверх, и можно будет сообразить, как она устроена. Для этого придется помножить время на какую-нибудь очень большую величину, обязательно постоянную для всех систем отсчета. Такова скорость света: и велика, и одинакова для любых наблюдателей. Ее удобно взять множителем.

Поэтому вместо осей t рисуем оси ct :

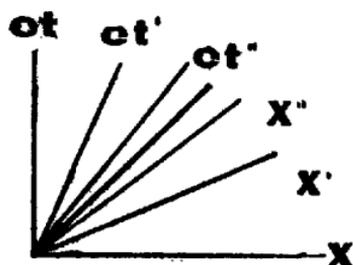


Низ диаграммы пока неясен.

Шаг третий. Из Москвы в Ленинград посылаем телеграмму. Сигнал летит по проводам со скоростью света (будем считать так, хоть это и не совсем точно). Благодаря множителю c на оси времени мировая линия света (сигнала телеграммы) ляжет точно по биссектрисе угла между осью времени и осью расстояний Москвы: ведь за секунду, которая на оси времени имеет длину c , свет пробежит ту же длину c по оси расстояний. Так мы вносим первый штрих в нижнюю часть диаграммы — для оси ct чертим ось x :



Шаг четвертый. Рассуждения третьего шага годятся для любых систем отсчета. У каждой мировая линия света (говорят также — световая линия) должна делить пополам угол между осями времени и расстояний. Так и рисуем:



Ось расстояний, как видите, расщепилась. У всякой системы отсчета — собственная длина пути. Ничего неожиданного: в теории относительности так оно и есть.

Еще два шага

Внимание! Предстоит нелегкое место. Сосредоточьтесь. Речь пойдет о калибровочных линиях сверхбыстрого мира — тех, что отсекают масштабы на осях.

В диаграмме медленных движений требовалась только калибровочная линия времени, потому что ось расстояний (а значит, и единица длины) там была одна на все поезда. И тянулась калибровочная линия времени параллельно единственной оси расстояний. Это было привычно и понятно, ибо означало: в мире существует абсолютная одновременность и единое всеобщее время.

Теперь одной калибровочной не хватит. Ось расстояний расщепилась — значит, пропала абсолютная одновременность, а с нею ушли абсолютное время и абсолютная длина. Нам придется построить две калибровочные линии, чтобы одна отсекала масштабы времени на осях времени разных систем отсчета, а другая — масштабы длины на осях расстояний.

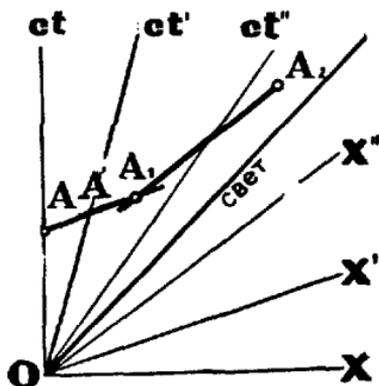
Шаг пятый. Поищем калибровочную линию времени. Рецепт прежний: она должна отсекаать на осях времени концы секунд, начавшихся вместе в мировой точке O . Но если раньше моменты окончания одновременно начинавшихся секунд были абсолютно одновременны, то теперь этого нет. Зато появилась относительная одновременность, чем мы и воспользуемся.

Помните, как определяется относительная одновременность? Это было при игре «Кто первый?» и дуэли

Онегина и Ленского в десятой главе. Надо, чтобы в середине прямого отрезка совпали световые сигналы от событий, произошедших на разных его концах. Сигналы совпали — значит, события одновременны.

Заметим на оси ct точку A , отсекающую ровно секунду от начала счета времени (точка O). Допустим далее, что в точке A' , лежащей на оси ct' , совпали сигналы, пришедшие из A и из A_1 , причем A_1 — некое событие, происходящее в системе x', ct' на том же расстоянии от A' , как и A , но с противоположной стороны. При этом условии и линия AA_1 должна быть параллельна оси x' и в точке A' делиться пополам. Налицо признак относительной одновременности — события A и A_1 одновременны в системе x', ct' .

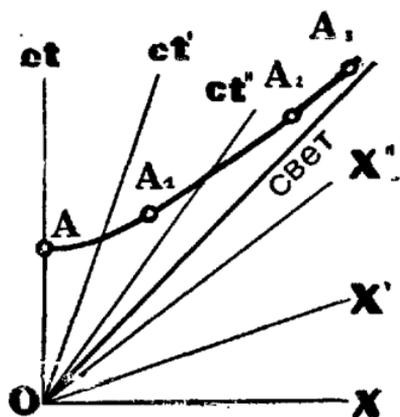
Представим затем, что аналогичным образом определена одновременность событий A_1 и A_2 в системе x'', ct'' , событий A_2 и A_3 в системе x''', ct''' и т. д.



Догадываетесь, что достигнуто этим хитроумным построением?

Отыскано графическое правило нахождения относительной длительности секунды в разных системах отсчета на диаграмме. Геометрический рецепт, по которому узнают масштаб хода часов, движущихся относительно друг друга равномерно по одной прямой.

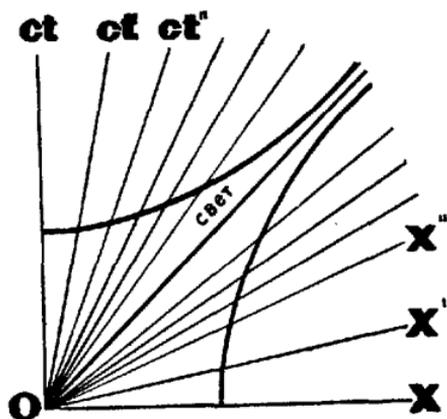
Соединим плавной линией точки A , A_1 , A_2 , A_3 и т. д. — и выйдет калибровочная линия времени. Это не прямая, как в «медленной» диаграмме, а кривая, называемая гиперболой:



С ростом скорости системы отсчета (сверхбыстрого поезда или ракеты) калибровочная линия времени уходит в бесконечность. Наглядно видно, как долго тянутся секунды «быстрых» систем с точки зрения «медленных». А свет живет в бесконечно длинных, остановившихся секундах. Для света движение мгновенно!

Шаг шестой. Я щажу утомленного геометрией читателя и великодушно освобождаю его от новой порции умственного напряжения. Поверьте на слово, что точно так же, как калибровочная линия времени, строится калибровочная линия расстояний в нижней части диаграммы.

Почти окончательно мир сверхбыстрых движений (происходящих на прямой дороге в одну сторону) предстает перед нами в виде такого чертежа:



Значительно хитрее, чем в старой доброй классике.

Глава 13. ГОВОРЯТ ДИАГРАММЫ

Снова Алла, Элла, Валя и Галя

Диаграмма Минковского хоть и трудновата для новичка, но очень наглядна. Разобравшись, понимаешь, как много мудрого зашифровано в этом красивом букете линий. Вся теория относительности!

Вот первый постулат Эйнштейна — равноправие систем отсчета, движущихся прямолинейно и равномерно. И в диаграмме системы равноправны: каждая имеет свою ось времени, другими словами — ось относительной неподвижности.

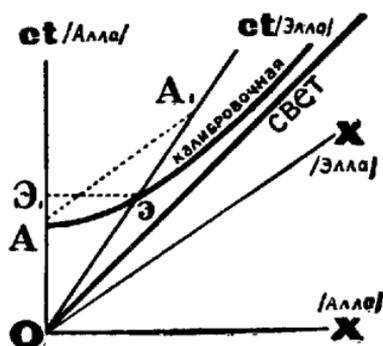
Нашел отражение и второй постулат — оси систем расположились симметрично около световой линии. Для всех скорость света одинакова.

Предельность световой скорости тоже документирована. Оси времени лежат над световой линией — значит, нет скоростей более высоких, чем световая, нет тел и систем, движущихся быстрее света.

Вникнув в дело, приятно решать на диаграмме всевозможные задачи.

Посмотрим, ради примера, как изображается встреча космонавток Аллы и Эллы.

Вот что надо нарисовать:

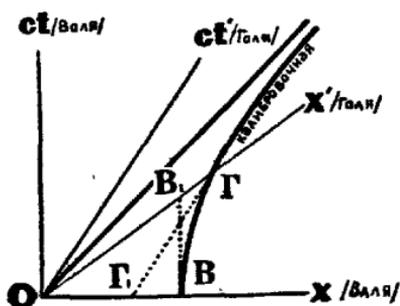


Секунду Эллы (отрезок $OЭ$ на оси времени Эллы, отсеченный калибровочной линией времени) Алла по известным нам правилам проецирует на свою ось времени. Там получается отрезок $OЭ_1$. Он явно больше, чем отрезок OA , который изображает секунду Аллы (отсеченную на ее оси калибровочной линией). Значит, для

Аллы время Эллы течет медленнее, чем ее собственное.

С другой стороны, секунда Аллы (отрезок OA), спроецированная Эллой на ее ось времени, дает отрезок OA_1 , который больше секунды Эллы ($OЭ$). Время Аллы для Эллы течет медленнее, чем ее собственное.

Второй пример — графическое пояснение спора космических продавщиц:



Валя свой метр (отрезок OB , отсеченный на ее оси расстояний калибровочной линией длины) проецирует на Галину ось расстояний. Выходит отрезок OB_1 . Он заметно меньше отрезка OG , изображающего метр Гали в ее системе отсчета.

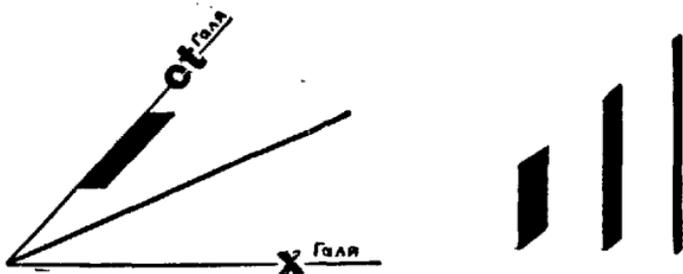
Наоборот, метр Гали в системе Вали (OG_1) меньше Валиного метра (OB).

Для Вали Галины метры короче, чем ее собственные, а для Гали — Валины. Теперь мы это обосновали графически.

Абсолютное в относительном

Я забыл вам сказать, что Галя растянула ленту по ракетному прилавку за несколько секунд до встречи с Валец.

Раньше лента была свернута. А после пререканий раздосадованная Галя своими сверхпроворными руками мгновенно смотала ленту и спрятала ее в шкаф. Таким образом, развернутая лента заняла ограниченную часть мира пространства — времени. Это нетрудно нарисовать на диаграмме:



Заштрихованная часть — лента, пока она была развернута.

«Подставьте» к ней неодинаково движущихся наблюдателей — каждый воспримет ее «под своей длиной» и «под своим временем». На диаграмме выйдет нечто вроде изменений угла зрения, под которым с разных расстояний видна фабричная труба.

Однако в предыдущей главе, рассуждая на эту тему, я обещал вам указать некий признак предмета, не зависящий от движения наблюдателя. Пришла пора исполнить обещание.

Признак этот называется *интервалом*. Его существование строго следует из геометрических особенностей мира Минковского, из того факта, что неодинаковы масштабы длин и длительностей для осей времени и расстояний, направленных на диаграмме в разные стороны.

Так вот, не мудрствуя дальше, я прошу вас принять на веру следующее.

Можно доказать, что на каждой из наших диаграмм (построенных при помощи световых линий, симметричных относительно них осей времени и расстояний и гиперболических калибровочных кривых) в любых системах отсчета остается одинаковым математическое выражение:

$$l^2 - c^2t^2.$$

Здесь l — длина предмета или расстояние между событиями, а t — длительность существования предмета или промежуток времени между событиями. Корень квадратный из этой величины и есть интервал:

$$S = \sqrt{l^2 - c^2t^2}.$$

Вот оно, неизменное и абсолютное в безбрежном море эйнштейновской относительности!

От качества к количеству

Что же такое интервал? Каков его физический смысл?

Это — пространственно-временной промежуток между событиями, выражающий, говоря словами Минковского, «некий род единства» пространства и времени.

Галина лента не имеет абсолютной длины, не имеет абсолютной длительности («времени жизни» в размотанном состоянии). Но она имеет интервал — «некое единство» длины и длительности.

Причем каждый наблюдатель, измеривший длину и время бытия развернутой ленты своими линейкой и часами, может быть уверен: вычисленная величина квадрата интервала ленты и у него, и у всех его коллег из других иначе движущихся систем отсчета получится точно такой же.

В этой неизменности (физики говорят — инвариантности) интервала — драгоценное свойство природы, рецепт для вычисления количественных релятивистских эффектов. Прежде нам были доступны лишь смутные, чисто качественные рассуждения. Я произносил неопределенные слова «длиннее», «короче», «быстрее», «медленнее», и только. Теперь же открыта дверь к математической точности, к числу.

Благодаря инвариантности интервала я вправе сделать о ленте следующее математическое утверждение, объединяющее точки зрения и Гали и Вали:

$$l^2 - c^2 t^2 = l'^2 - c^2 t'^2$$

А из этого равенства после не очень сложных выкладок вытекают знаменитые формулы, называемые преобразованиями Лоренца¹. Привожу их, по традиции этой книжки, без вывода. Для двух систем отсчета, равномерно движущихся друг относительно друга по прямым параллельным путям, релятивистские длительности явлений и продольные релятивистские длины даются выражениями:

¹ По имени известного физика, который сумел вывести их за год до Эйнштейна, исходя из совсем других, неверных представлений: Лоренц думал, что движущиеся тела сплющиваются эфирным ветром.

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Здесь t' — релятивистская длительность, t — собственная длительность, l' — релятивистская длина, l — собственная длина, c — скорость света, v — относительная скорость систем отсчета.

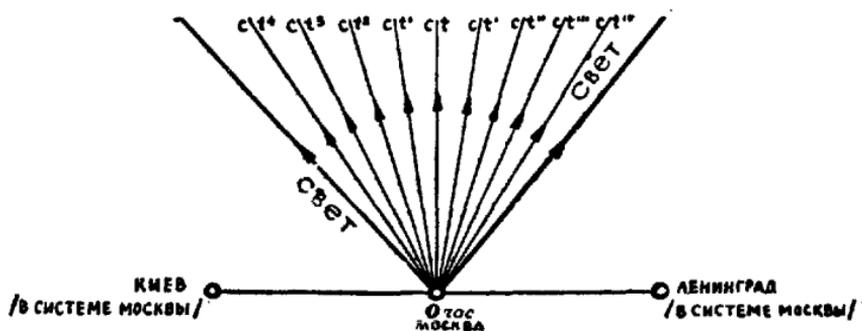
Формулы просты и красноречивы. Сразу видно, при каких условиях они начинают удивлять: когда относительная скорость вплотную приближается к скорости света. В противном случае, для малых скоростей, с практически беспредельной точностью действуют старинные правила Галилея:

$$t' = t \quad l' = l$$

Киев — Москва — Ленинград

Я обязан напомнить: описанный мир — не более чем примитивная модель диаграммы настоящих движений. Ведь наши поезда шли только от Москвы и только в сторону Ленинграда. А пространство фигурировало в виде одной только линии — железной дороги, начинающейся в Москве.

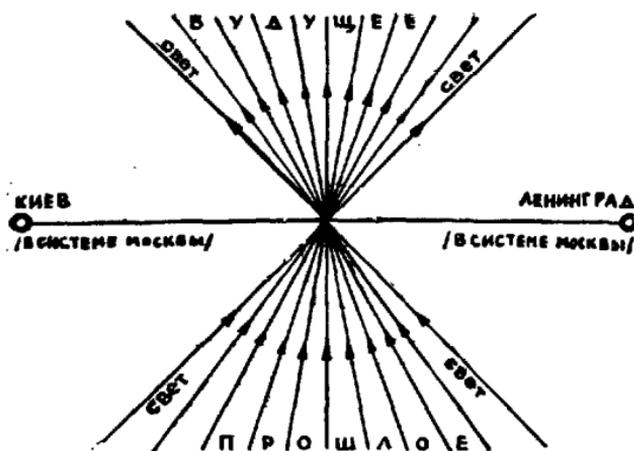
Усложняя мир, присоединим к Октябрьской железной дороге Киевскую (считаем, что получится прямая магистраль), но начало всех систем отсчета (отбытие поездов), как и прежде, предполагаем в Москве в московскую полночь. Вот какая будет диаграмма:



Поезда мчатся здесь из Москвы в Киев (влево) и в Ленинград (вправо). Телеграммы — тоже в обе сто-

роны. Световых линий стало две, и они разместились под прямым углом: в Москве как бы вспыхнула молния, и ее свет летит сразу к Ленинграду и Киеву.

Следующее усложнение. К будущему присоединяем прошлое. Ленинградские поезда в полночь проезжают Москву и едут дальше, в Киев. Киевские, минуя в полночь же Москву, следуют в Ленинград. Телеграммы из Киева в Ленинград и из Ленинграда в Киев точно в 0 часов проскакивают через Москву:



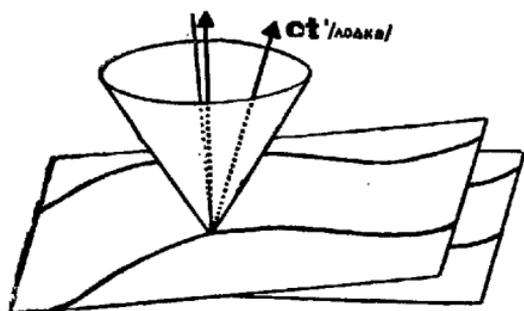
Световые линии скрестились. Сверху между ними будущее, снизу — прошлое. А справа и слева — те области мира, куда поезда, подчиняющиеся нашему невообразимому расписанию (все мнут Москву в полночь и от этой мировой точки считают свои времена и расстояния), попасть не могут. Ибо нет в природе поездов, несущихся быстрее света.

Два плюс одно

Наши диаграммы продолжают оставаться чрезмерно упрощенными. На них лишь те движения, что происходят на единственной прямой линии. Потому-то и удается обходиться лишь одним пространственным измерением — длиной. Но таких движений вокруг почти не найдешь. Разве действительно железнодорожные поезда, да и то если магистраль идеально прямая.

Куда больше вещей движется по поверхности. Например, лодка пересекает наискось реку.

Попробуем изобразить это на диаграмме Минковского (предполагая, что лодка сверхбыстрая). Будут вместо осей расстояний — координатные плоскости, на них оси длины и оси ширины. Начала обеих систем — на берегу в пункте и в момент старта лодки. Оттуда при старте посылаются световой сигнал, который бежит во все стороны и поэтому на диаграмме дает не световую линию, а световой конус. Вот что получится (см. рис.).



Построение исполнено точно по правилам Минковского. Следуя им, координатную плоскость лодки пришлось наклонить так, чтобы углы между нею и световым конусом всюду были равны углам между световым конусом и осью времени лодки. Этой оси на чертеже нет. Нарисуйте ее самостоятельно.

Не забывайте, что верх этой картинки — отнюдь не небо. Небу не нашлось места. Вверх идут оси времени, или мировые линии (на диаграмме есть только ось времени берега).

Разберитесь в чертеже. И попробуйте провести проекции секунд и метров берега, лодки, течения. Это любопытно и поучительно.

Занятие, правда, не из простых — больше подходит для десятиклассников. А впрочем, ничего сверхъестественно трудного в нем нет.

Три плюс одно

Чаще всего физические тела движутся в пространстве в трех взаимно перпендикулярных измерениях (и в длину, и в ширину, и в высоту). Строго говоря, только такие движения и существуют. Самолет облетает гору — и поднимается, и сворачивает; автомобиль делает вираж и прыгает по ухабам; Луна кружит вокруг Земли и вокруг

Солнца сразу. Конечно, старое условие остается в силе: мы обсуждаем пока только равномерные и прямолинейные движения. Но и для них наиболее общи объемные системы отсчета.

Поэтому реальная диаграмма Минковского должна иметь в каждой системе не одну и не две пространственные оси, а три — длину, ширину и высоту. И к ним добавится еще ось времени.

Надо, чтобы три пространственные оси расположились под прямыми углами друг к другу (как ребра аквариума). И чтобы ось времени тоже была к ним перпендикулярна — сразу ко всем трем. Этим условиям должен удовлетворять полный — уже без всяких упрощений — мир Минковского.

Увы, как ни старайтесь, такой *четырёхмерной* диаграммы вы не постройте. Ни на листе бумаги, ни в объемной модели. Потому что пространство, в котором мы живем, всего лишь трехмерно. Четвертое измерение (время) некуда будет девать: его никак не поставишь перпендикулярно к трем остальным.

Но то, что нельзя построить, можно попробовать вообразить.

Знатоки геометрии умеют, не строя четырехмерных фигур, чертить их проекции на трехмерное пространство или плоскость¹. Получаются соответственно объемные тела и плоские фигуры. Примерно так же на плоскость (скажем, стену комнаты) или на линию (натянутую нить) падают тени (проекции) объемных трехмерных тел — людей, чайников, стульев и т. д.

Короче говоря, несмотря на то, что уменьшенную копию четырехмерного мира Минковского нельзя нарисовать на бумаге или вылепить из глины, оперировать с ним можно. И составлять с его помощью сложные «расписания» множества сверхбыстрых движений. В расписаниях нас интересуют времена и расстояния, а они как раз и складываются из «теней» — из проекций пространственно-временных интервалов на оси, плоскости, объемы систем отсчета.

¹ Это умение не требует особой одаренности, его уже начал прививать ученикам некоторых наших физико-математических школ; нужно развить пространственное воображение и накопить навык.

Новое зрение

Так мы добрались до удивительного вообще-то вывода: мир четырехмерен. При жизни Минковского, в годы молодости Эйнштейна это было воспринято кое-кем чуть ли не как божественное откровение.

Тогда, в начале века, широкая публика начала понемножку интересоваться успехами математики, и вошли в моду салонные беседы о многомерных пространствах. Невообразимые, неосязаемые, они казались обиталищем таинственных миров-невидимок, которые пронизывают и обнимают нашу скромную трехмерную Вселенную. Многие склонны были видеть в четырехмерности не математическую абстракцию, а нечто потустороннее, мистическое. И, конечно же, по инерции перенесли такое отношение на мир Минковского. А стало быть, и на теорию Эйнштейна.

Однажды некая знатная дама после популярной лекции Эйнштейна восхищенно поблагодарила его за «подтверждение сверхъестественной четырехмерности». Эйнштейн расхохотался. Дама ровным счетом ничего не поняла. Найти мистику в четырехмерной пространственно-временной диаграмме можно с таким же успехом, как в таблице футбольных игр.

Мир Минковского — это только сочетание графиков, геометрическая иллюстрация физического единства пространства и времени. Каждое событие фиксируется в любой системе отсчета не тремя, а четырьмя величинами — тремя координатами пространства и одной времени.

Вот и вся премудрость.

Этот новый мир — мир-диаграмма. Взгляд сразу на обе составные части системы отсчета — и на пространство и на время. Очень удобный ракурс для физического «зрения».

Но только пользоваться им надо с оглядкой. И помнить одну очень существенную черту четырехмерного мира: одна из осей во всех его системах отсчета — ось времени — неравноправна с тремя остальными. В пространстве можно лететь куда угодно, во времени — только вперед.

Забыв об этом, легко попасть впросак.

Как это бывает, сейчас увидим.

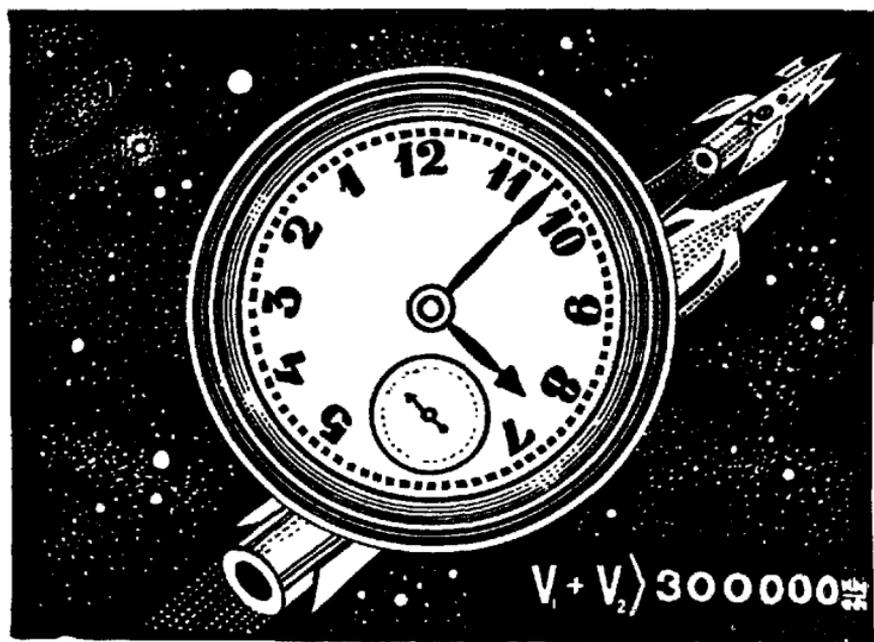
Глава 14. В ПРОШЛОЕ ПУТЬ ЗАКРЫТ

Пират совершает побег

Как ни печально, но я должен сообщить вам неприятное известие. Пока мы чертили графики, межзвездный пират Клио бежал из-под ареста. Это случилось ночью. Часовой увлекся детективным романом и не заметил, как заключенный робот (на следствии было установлено, что Клио — действительно робот, причем очень поверхностно обученный) расплавил своим огненным дыханием стальную решетку и вылез из окна милиции.

Было тихо. Звезды стояли в вышине. В траве стрекотали кузнечики. Клио на цыпочках выбрался на улицу. Последним трамваем приехал на окраину городка. Добрался лесными тропами до своего звездолета «Медуза», спрятанного в кустах.

В голове Клио бродили туманные мысли. Роботу было досадно, что так нелепо сложилась его жизнь. Хотелось изменить темное прошлое, начать жизнь сначала. «Бежать, немедленно бежать... Но куда? Куда? О, если бы мне удалось вернуться хоть на год назад! — мечтал космический бандит. — Тогда я не стал бы сно-



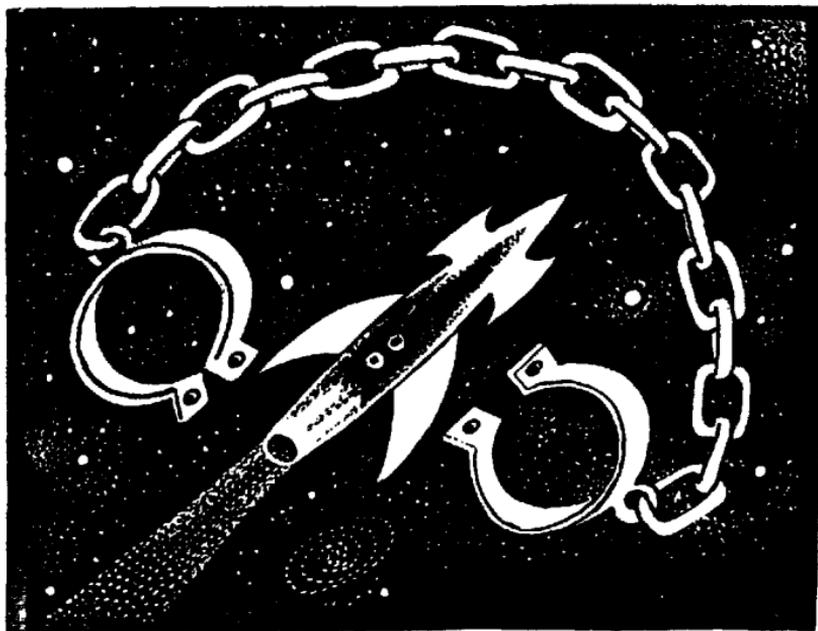
ва на преступный путь... Я начал бы заниматься спортом, пошел бы учиться в вечернюю школу взрослых, из разрушителя я превратился бы в создателя...»

Тут Клио сверкнул глазами и хлопнул себя по лбу. «Ба! — воскликнул он. — А ведь я еще в силах исправить свое печальное положение...» Отрывочные сведения по теории относительности забродили в его отчаянной кристаллической голове и наконец вылились в логическую цепочку, которая показалась пирату безошибочной.

«Моя задача, — торопливо соображал робот-разбойник, — заключается в том, чтобы вернуться в прошлое, года на два назад. Тогда я, само собой разумеется, начну новую жизнь, мирную и честную. Из теории Эйнштейна вытекает, что для путешествия в прошлое нужно совсем немного — просто полетать некоторое время со скоростью большей, чем скорость света. Недаром эта идея увековечена в стихах:

Сегодня в полдень пущена ракета.
Она летит куда быстрее света
И долетит до цели в шесть утра
...Вчера».

Клио с пафосом продекламировал это четверостишие и стал размышлять дальше.



«Правда,— вспомнил он,— Эйнштейн наложил запрет на сверхсветовые скорости, ибо иначе пришлось бы допустить нарушение принципа причинности и разрешать следствиям совершаться до причин. Но мне-то как раз и не нужно никакой причинности! Я готов дать разрешение следствию произойти раньше причины! В этом мое спасение! Значит, дело за малым — полетать быстрее света. И моя верная «Медуза» поможет мне в этом!»

Клио ласково погладил черный бок ракеты, подбросил охапку хвороста в топливный отсек. Кряхтя, влез в кабину, захлопнул люк и решительно нажал на стартер.

«Медуза» заворчала, закашляла дюзами, рванула вверх и, сбив несколько шишек с окружающих сосен, взмыла в высокое черное небо.

Бдительность детektива

У Клио был план. Беглый пират считал этот план гениальным. И — о, удача! — судьба распорядилась так, что всю техническую часть плана разбойнику удалось исполнить блестяще.

Сидя за штурвалом «Медузы» и всматриваясь в звездное небо, дерзкий беглец заметил невдалеке то, что искал — разгоняющийся космический лайнер высшего класса. Это была наша старая знакомая, красавица «Заря». Теперь она совершала экскурсионный рейс по маршруту Земля — Бетельгейзе. И вот, пока «Заря» двигалась сравнительно медленно, Клио сумел нагнать ее и тайком посадил свою черную «Медузу» на ее широкую обтекаемую крышу. Посадил и крепко привязал танталовым канатом. А «Заря» все разгонялась. Подсматривая в рубку звездолета, Клио видел на спидометре цифры: 100 тысяч километров в секунду, 200, 250 тысяч. Потом — 290; 299; 299,9... Никем не замеченный, пират разгуливал по крыше в своих изящных магнитных полуботинках. Он потирал руки: еще бы, его «Медуза» быстрее, чем 150 тысяч километров в секунду, лететь не могла.

Ничего злодейского в замысле Клио на этот раз не было. С «Зари» он задумал улететь в прошлое — всего-

навсего. Как только спидометр межзвездного лайнера показал скорость лишь на стотысячную долю процента меньше скорости света, пират решил, что пора действовать. Влез в «Медузу», нацелил ее вперед, точно по пути «Зари», и включил свой ракетный двигатель на полную мощность.

«Медуза» вздрогнула и понеслась. Тотчас «Заря» оказалась где-то далеко-далеко позади. Скорость «Медузы» относительно «Зари» составила все доступные ей 150 тысяч километров в секунду. Значит, относительно Земли всего вышло примерно 450 тысяч километров в секунду, а это в полтора раза быстрее света. «Полетаю немного, а потом, не сбавляя скорости, поверну домой. Ура! Да здравствует светлое, безгрешное прошлое, в которое я вернусь!» — ликовал Клио.

Радужные картины рисовались в мечтах бандита. Он блаженно закрыл глаза и начал дремать. Но тут из радиотелефона прозвучали чеканные слова:

— Гражданин Клио, руки вверх!

Пират вздрогнул. Оглянулся по сторонам. Рядом с «Медузой» летела легкая спецракета с надписью: «УРСС». Бандиту был превосходно известен зловещий смысл этого сокращения: «Уголовный розыск Солнечной Системы». В иллюминаторе виднелись серые, со спокойной смешинкой глаза того самого детектива, который задержал Клио в кафе. Майор Прошкин! На беглеца было угрожающе нацелено дуло пистолета.

— Вас не может быть! — завопил ошарашенный пират.

— Почему же? — иронически спросил майор.

— Потому что вы можете быть только в будущем, а я уже лечу в прошлое... — Разбойник от волнения заикался. — Я ведь несусь бы-бы-быстрее света!..

— Ничего подобного, — устало возразил Прошкин. — Ваша скорость относительно Земли на четыре миллионных доли процента меньше световой. Так что в прошлое вы не летите. Так же, как и я. Даже мы, работники уголовного розыска, не можем превысить световую скорость. Вы опять доказали свою невежественность — не знаете, как складываются скорости в теории относительности. Стыдно, гражданин! Давайте-ка поворачивайте!..

Упражнения на эскалаторе

На Земле Клио был водворен в камеру и наказан за побег принудительным уроком физики. Тема урока — релятивистские законы сложения скоростей.

И вот учебный каземат. Властным взглядом майор Прошкин усадил заключенного Клио за парту. Написал на доске:

«Задача. Эскалатор в метро ползет вниз со скоростью три километра в час. Пассажиру некогда, и он сбегает по эскалатору со скоростью три километра в час относительно ступенек. Какова скорость пассажира относительно стен шахты?»

— Прошу решить, — сухо приказал майор.

Клио вспомнил, как давно-давно, еще маленьким шалопаем, школяром-третьеклассником, он получил похожую задачу. Тогда он написал $3+3=6$ и заработал пять с плюсом. И сейчас взрослый Клио решил задачу так. Робко написал на доске результат сложения скоростей пассажира и эскалатора: 6 километров в час.

Майор сказал, что ответ правильный, но строго добавил:

— Однако, когда вы, задумав убежать в прошлое, захотели так же просто сложить скорости, близкие к световой, задача не решилась.

— Почему же? — спросил недоумевающий Клио.

— Потому, что при малых относительных скоростях ничтожны поправки, вносимые теорией Эйнштейна. А при скоростях, близких к световой, они огромны. Их необходимо учитывать, чего вы не сделали.

Клио сокрушенно молчал.

— Скажите, что такое скорость? — терпеливо спросил майор.

— Путь, пройденный за какое-то время, — с готовностью ответил Клио.

Прошкин согласился:

— Да. Но вот что надо помнить. Когда вы беззаботно складывали скорости по правилам школьной арифметики, то молчаливо допускали, что масштабы пути и времени для шахты, для пассажира и для эскалатора одинаковы. Может это быть, если скорость эскалатора и пассажира близки к скорости света? Может? Я вас спрашиваю!..

— Наверное, нет,— неуверенно промямлил заключенный.

— Не «наверное», а наверняка нет! — воскликнул Прошкин. — Как только эскалатор помчался относительно шахты почти со скоростью света и пассажир побежал с подобной скоростью относительно эскалатора (допустим такое ради сохранения прежнего примера), у каждого участника этого сложного движения появляются релятивистские оценки событий в других системах отсчета. Для шахты метры эскалатора будут укоротившимися, секунды — удлинившимися, для эскалатора метры пассажира сократятся и секунды пассажира станут дольше. Поэтому для шахты скорость пассажира будет хоть и больше скорости эскалатора, но меньше световой. Так что и этим воровским способом обогнать свет и, значит, удрать во вчерашний день не удастся. Вот она, ваша ошибка, гражданин Клио! Поражаюсь вашему невежеству!

Клио опустил голову. Он был посрамлен. Ему было мучительно стыдно. А майор продолжал:

— Далее допустите совсем уж невероятное происшествие — в метро погас свет. Бегущий пассажир вынимает из кармана фонарик и освещает себе дорогу. Свет из фонарика мчится со скоростью света. Это — относительно фонарика. А относительно шахты?

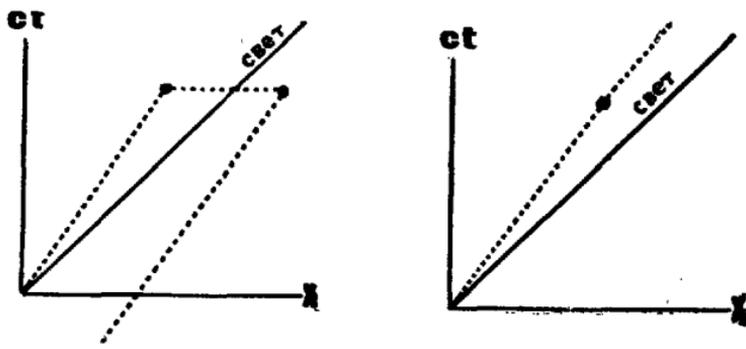
— Э... Вдвое больше, гражданин майор...

— Неверно! Ничего вы не поняли! Относительно шахты скорость света — та же. Она не увеличивается ни на йоту! Ведь мы с вами вернулись в своих рассуждениях туда, откуда отправлялись, — ко второму постулату Эйнштейна: скорость света не зависит от движения источника.

Под конец урока майор подошел к доске.

— Если бы вы, гражданин Клио, проштудировали графики Минковского (в этой книжке — «необязательные» главы двенадцатая и тринадцатая), то вряд ли затеяли бы эту свою нелепую попытку убежать в прошлое. Мировая линия вашей пиратской «Медузы» ни при каких условиях не может пересечь световую линию. В той мировой точке, где «Медуза», сорвавшись с крыши мчащегося звездолета, полетела вперед, ее мировая линия лишь чуточку круче наклонилась к световой линии, попав в область скоростей, где для Земли еще

дольше секунды и короче километры. Вот график (калибровочных линий времени и расстояний я не рисую):



Мировая линия «Медузы» лишь чуть нагнулась, и скорости сложились совсем не арифметически. Вот формула: суммарная скорость

$$v = \frac{v_1 \pm v_2}{1 \pm \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

где v_1 — скорость первой движущейся системы отсчета, в которой движется со скоростью v_2 вторая система отсчета; знак плюс — для совпадающих по направлению движений, минус — для противоположных. Когда скорости v_1 и v_2 малы по сравнению со световой, выходит обычное классическое $v = v_1 \pm v_2$. Ясно?

— Ясно, — не очень уверенно сказал Клио.

Ну, а читателям, я надеюсь, вполне ясно.

Холодный душ

Криминальные, торговые и транспортные эпизоды, приведенные в последних главах, изобретены для пушей наглядности эйнштейновских эффектов. Но, надо покаяться, сделано это с полной безответственностью. Никогда и нигде не сбудется ничего подобного. Причин много. Самые веские щедро выдает в своих формулах сама теория относительности. Вникнув в них, видишь, что придуманные нами театральные эпизоды бесстыдно утрированы.

Если проделать вычисления, то станет особенно ясно, как далеки релятивистские скорости от привычных нам скоростей — поездов, самолетов, даже спутников и лунников. Так, в реактивном самолете время замедляется

для земного наблюдателя на 0,000 000 000 000 5; на такую же ничтожную долю уменьшается длина. Для космического корабля в орбитальном полете соответствующая цифра составляет 0,000 000 000 5 — пять десятиллиардных. Попробуй заметь! Правда, эта величина доступна измерению средствами современной экспериментальной техники. Запустив спутник, через несколько лет можно надеяться уловить отставание летящих на нем часов примерно на тысячную долю секунды по сравнению с земными. Но практически — никакого изменения. Вплоть до скоростей в тысячи километров в секунду действует старая, проверенная и перепроверенная механика Ньютона.

Даже при скорости 30 000 километров в секунду релятивистские эффекты ничтожны: относительное замедление часов и укорочение продольных размеров составляет пять тысячных. Половина световой скорости дает 15 сотых. Чтобы зримо ощутить своеобразие эйнштейновской физики, нужны еще более высокие скорости — совсем близкие к заветному пределу. 225 тысяч километров в секунду — время замедляется и длина уменьшается на 25 процентов от собственных; 260 тысяч — на 50 процентов, 294 тысячи — на 80 процентов, 299 тысяч — на 90 процентов. Разумеется, ни о какой «торговле», ни о каких «подглядываниях в зеркала» или «посадках на ракету» при таких гигантских относительных скоростях не может быть и речи.

Далее эффекты Эйнштейна нарастают стремительно. Скорость, меньшая световой на сотую долю процента, дает семидесятикратное замедление времени.

Судя по злоключениям с космической диверсией (около двадцати световых минут релятивистского пути ракеты против двух световых месяцев расстояния, измеренного с Земли), скорость звездолета «Заря» не достигла световой меньше, чем на стотысячную долю процента. В эпизоде с бегством Клио суммарная скорость была меньше световой на четыре миллионных доли процента (так, кажется, и было сказано сыщиком-релятивистом, поймавшим пирата).

Но, увы, с подобными скоростями никакие ракеты летать не могут. Тут наука особенно решительно одергивает бесшабашную фантастику. И охлаждающий душ на возбужденные головы мечтателей льет опять-таки

сама теория Эйнштейна. Вето накладывает относительность массы — еще не упомянутый важнейший эффект, о котором пойдет речь в следующей главе.

Глава 15. ЭНЕРГИЯ, СПРЯТАННАЯ В ВЕЩЕСТВЕ

Сколько весит леденец

У меня на ладони леденец. Прозрачно-розовый, весьма аппетитный. Сколько он весит? Пять граммов. Так показывают мои весы. Это все пока ничуть не странно. Но вот удивительно: вместе с тем этот самый леденец весит десять килограммов. Или, если хотите, три тонны. Или тысячу тонн. Сколько пожелаете!

Сказанное надо обосновать.

Во второй главе мы пространно рассуждали о том, что такое масса. Было выяснено, что масса имеет двойную сущность — она «едина в двух лицах». Во-первых, она — мера количества вещества, притягиваемого Землей. Это тяжелая масса. Во-вторых, она — мера инерции, мера замедления разгона тела под действием силы. Это инертная масса. Обе массы строго равны. Поэтому все тела падают вблизи земной поверхности с одинаковым ускорением g (разумеется, если им ничто не мешает падать, вроде воздуха). Вспомнили? Очень хорошо.

Дабы уверить вас в странных превращениях леденца, надо будет показать, что леденец в каких-то разных условиях по-разному поддается ускоряющему действию сил или по-разному давит на чашку весов. Я считаю себя вправе выбрать какое-либо одно из этих заданий. Исполнив одно, я не забочусь о втором.

Выбираю первое. То есть берусь убедить вас в том, что мой леденец при неких условиях разогнать так же трудно, как при обычных условиях сдвинуть с места железнодорожный вагон, груженный кирпичом. Сразу скажу, каковы эти условия: надо, чтобы леденец, который мне предстоит разогнать, уже двигался относительно меня. Причем очень быстро — почти со скоростью света. Тогда его масса будет для меня сколь угодно велика — тем больше, чем ближе его скорость к скорости света.

Я думаю, тем, кто усвоил дух теории относитель-

ности, интуитивно ясно: если леденец невозможно заставить двигаться быстрее света, значит, он сопротивляется сверхбыстрому разгону, и естественно предположить, что это происходит благодаря увеличению его инерции на больших скоростях, то есть, другими словами, благодаря увеличению массы.

Это действительно так. Но это так важно, что должно быть растолковано подробнее.

Голову—на отсечение

Много мудрых слов сказано о том, что человек может и чего не может. Может, пожалуй, больше, чем не может. И, самое главное, может достоверно установить, что именно не может. Что же человеку недоступно?

Ни один из трех миллиардов людей не в состоянии пробежать стометровку быстрее, чем за 9,9 секунды. Впрочем, выйдет эта книжка, и, весьма вероятно, появится мировой рекорд — 9,8, а то и 9,7 на стометровке. Почему бы нет! Никто не даст голову на отсечение, что в спринтерском беге увеличение скорости невозможно.

Но любой современный физик с легким сердцем прокладывает голову против посула разогнать в вакууме леденец даже не быстрее, а хотя бы до точной скорости света. Такого не случится никогда — ни сегодня, ни завтра, ни через тысячелетия. Нет и не будет в мире подходящей силы, любая окажется мала. Это в равной мере относится к леденцу, к космическому кораблю, к электрону. Предельная — световая — скорость *недостижима* ни для какого тела, способного, вообще говоря, двигаться медленнее света (сам свет этого, как вы помните, не умеет). И вместе с тем сколь угодно близко подойти к световой скорости не запрещено ни ракете, ни электрону. Сколь угодно близко — но не точно! От любой скорости, как угодно близкой к скорости света, до самой скорости света — дистанция бесконечно огромная, принципиально непреодолимая. Это прямо вытекает из эйнштейновского закона сложения скоростей, о который споткнулся в предыдущей главе необразованный бандит Клио.

Полезно повторить: Клио равномерно двигался относительно Земли со скоростью, которая была лишь на миллиметр в секунду меньше скорости света. Казалось, одно крошечное усилие — и он обгонит световой луч. Но ничего подобного. Вспомнив первый постулат Эйнштейна, Клио мог вообще забыть о своем движении, признать себя неподвижным.

Тогда он понял бы, что не только обгон света ему не удастся, но что даже до прежней скорости ему придется разогнаться заново. С чьей-то точки зрения вы можете, сильно ускорившись, вплотную подойти к скорости света, но, тем не менее, «для себя» останетесь от нее бесконечно далеко.

Итак, к леденцу, летящему в космосе, вдалеке от планет и звезд, я прикладываю силу. Леденец ускоряется. А я, оставаясь «неподвижным», наблюдаю. Сначала, пока скорость мала (вплоть до тысяч и даже десятков тысяч километров в секунду), ускорение тем больше, чем больше приложенная сила и чем меньше масса леденца. Точно соблюдается второй закон Ньютона. Однако дальнейший разгон решительно не подчиняется старому закону. Леденец становится слишком упрямым, неподатливым. Сила прежняя, а ускорение меньше. Выше скорость — труднее дальнейший разгон. У самой скорости света ускорение под действием прежней силы становится таким неуловимо крохотным, что леденец практически перестает разгоняться. Что ж, я неведомым способом увеличиваю силу. В десятки, в тысячи, в миллиарды раз. Трачу титаническую энергию. Но опять эффект мизерный. Скорость почти не растет. Приблизившись вплотную к скорости света, она словно замораживается.

Дело происходит точно так же, как при неудачной попытке бегства в прошлое. Ничего неожиданного нет. Но зато теперь я могу прямо указать на виновницу «сверхньютоновского» упрямства разгоняющегося тела. Это масса. По мере ускорения тела растет его инерция. У самой скорости света ускорить тело практически невозможно, какую бы гигантскую силу ни прикладывать. Значит, инерция, то есть инертная масса, леденца увеличивается к бесконечности.

Все это — с точки зрения любой инерциальной, то есть не испытывающей ускорений, системы отсчета.

Лилипут-лакомна

Вот формула относительности массы. Лаконично и четко она говорит о том, что с чрезмерным многословием пояснялось выше.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Релятивистская масса m (то есть «движущаяся» масса для «неподвижного» наблюдателя) здесь сравнивается с *массой покоя m_0* (то есть с массой, которую измерил неподвижный относительно нее наблюдатель, например я, взвешивающий свой леденец). Можно без особого труда подсчитать, для кого мой леденец весит обещанные десять килограммов. Подставив в формулу соответствующие цифры, получим ответ: для наблюдателя, который движется относительно меня со скоростью 299 999 997 километров в секунду (если считать скорость света равной точно 300 000 километров в секунду).

Неужели бывают такие расторопные «наблюдатели»? Позволив себе очередную некорректную фантазию, вообразим лилипута, сидящего верхом на каком-нибудь протоне из космических лучей, проносащихся мимо моей ладони. Лилипут — сластена, ему ужасно хочется схватить мой леденец и отправить в рот. Но сделать это ему в две тысячи раз труднее, чем если бы леденец летел рядом с ним. Потому что для него масса леденца увеличилась в две тысячи раз!

Лилипутов-лакомок, увы, не бывает. Зато протоны, несущиеся в космических лучах с подобными скоростями, встречаются нередко. У неподвижного протона масса $1,7 \cdot 10^{-24}$ грамма. А у движущегося в космических лучах она возрастает для нас, землян, в те же две тысячи раз. Когда физик, лакомый до научных открытий, захочет поймать частицу космических лучей в какой-нибудь прибор, он помнит о релятивистском увеличении массы. Иначе ничего не выйдет, частица не поймается.

Тот же эффект обязательно учитывают, строя ускорители заряженных частиц. Современные ускорители — это машины, в которых полновластно распоряжается физика Эйнштейна.

Так законы теории относительности подтверждаются опытами. Сегодня они стали совершенно неотъемлемой частью экспериментальной физики быстрых движений и высоких энергий.

Что такое „плохо“

Приспело время исполнить обещание о дополнительной порции холодного душа на отчаянных фантазеров (в том числе и на грешную голову автора этой книжки), тех, что с легким сердцем разгоняют ракеты до релятивистских скоростей, заставляют космонавтов за месяцы достигать далеких галактик и без седины в волосах возвращаться домой. К нашему общему огорчению, подобные прожекты, видимо, никогда не осуществятся. И именно потому, что вместе с сокращением релятивистского пути, с замедлением релятивистского времени должна стремительно расти релятивистская масса ракеты. Для ускорений и торможений даже очень скромного по размерам субсветового галактического корабля потребуются неправдоподобно гигантские запасы топлива. Подсчитано: чтобы облететь нашу звездную систему за десятилетия собственного времени, понадобится энергия, равная, самое малое, полному потоку солнечных лучей за... сто миллионов лет! Комментарии излишни.

Жалко, конечно. Остается слабая надежда съездить на субсветовой ракете куда-нибудь сравнительно недалеко — к одной из ближайших звезд, за несколько световых лет.

Если это когда-нибудь удастся, то предварительно будут решены титанической сложности проблемы. Сегодня вряд ли можно обещать что-либо большее. Во всяком случае, наши мысленные эксперименты с космическим пиратством и межзвездной торговлей не имеют никаких шансов обрести хоть мизерную долю реальности. Что, однако, ничуть не подрывает их принципиальную правильность. В них, конечно, крайность, но не доведенная до физического абсурда. Крайность, в которой наглядно обнажается сущность волшебных релятивистских эффектов.

Выходит так. Эйнштейн, с одной стороны, подарил

нам сказочную власть над временем и расстояниями, доказав их зависимость от скорости. Но, с другой стороны, в огромной мере лишил нас этой власти, доказав увеличение массы с нарастанием скорости. Хочется посетовать: релятивистские времена и пути — это-де «хорошо». А релятивистская масса — «плохо». Так как будто?

Смотря для кого. Фантазерам, быть может, действительно обидно: срывается (вот беда-то!) затея с путешествием за тридевять галактик. Зато физикам, а вместе с физиками и всему человечеству, совсем недурно. Потому что, как вы скоро увидите, факт относительности массы подсказал Эйнштейну открытие знаменитого закона эквивалентности массы и энергии. Закон, безгранично важный не только для науки, но и для индустриальной, хозяйственной жизни людей. Ибо этот закон сделал нас беспредельными богачами.

Вот вам и «плохо»!

Невидимое и неуловимое

Вернемся к леденцу. Брошенный с околосветовой скоростью, он обладает гигантской массой. Уместно спросить: а за счет чего она появилась, такая большая? Не может же что-то сотвориться из ничего!

Вот упрощенный ответ: энергия, расходуемая на разгон леденца, не только ускорила его, сообщила ему новую добавку скорости, но и увеличила его инерцию. Приобретая дополнительную энергию движения, леденец обзаводился дополнительной массой. Мала была энергия движения леденца — мала и масса. Больше энергия — больше масса. И отсюда можно сделать очень важное заключение: энергия и инертная масса — неразлучные сестры. Та и другая, характеризуя движущуюся материю, изменяются вместе, пропорционально. Собственно, в этом-то и заключается эйнштейновский закон эквивалентности массы и энергии.

Но тут есть тонкость. Когда бакенщик, взяв из рук капитана леденец, «остановит» его и отправит себе в рот, масса леденца для бакенщика не пропадет, пять граммов ее останутся. А энергия механического движения леденца относительно бакенщика исчезнет полностью. Энергии как будто нет, а масса осталась. Как это

согласовать с выводом об эквивалентности того и другого?

В предпоследней фразе — умышленная (с моей стороны) ошибка. Энергия у «остановленного» леденца не пропала. Потому что движение *в нем* не прекращено. Нет лишь механического перемещения леденца как целого тела. Зато есть (причем, относительно бакенщика!) непрерывная тепловая пляска атомов и молекул (заморозьте леденец — и он станет легче; правда, совершенно неуловимо). Есть движение электронов в атомах и между ними, мезонов в атомных ядрах. Леденец (как и любое другое тело, будь то песчинка, пушинка, капля, гора, планета) лишь внешне спокоен. Внутри, в микромире своем, это клубок молниеносных вихрей, вибраций, сдвигов. И, конечно же, этот клокочущий круговорот материи, хоть он и невидим для глаз, неосязаем для рук, — средоточие гигантской энергии, той самой, что эквивалентна «массе покоя» — массе «остановленного» леденца.

Хорошо. Это можно понять, когда речь идет о механической энергии. Или о тепловой, которую есть резон свести к механической. А как быть с энергией электрической, или магнитной, или химической? Все ли виды ее имеют массу и вес?

Все.

Листаем книжку назад, к странице 70. Вспоминаем закон сохранения энергии. Он утверждает: при превращениях энергии из одного вида в другой ее количество не может измениться — увеличиться или уменьшиться. Оно постоянно и неизменно. Следовательно, когда работает турбина, вертится ротор генератора и механическая энергия переходит в тепловую и электрическую, то вместе с нею переходит масса. И в том же соотношении. Свою долю массы получает тепло, свою — электричество.

Значит, и электрическая энергия обладает массой, как и магнитная, и ядерная, и все остальные ее формы.

Итак, масса покоя соответствует огромной «энергии покоя». И Эйнштейн подсказал нам, как просто можно оценить ее количество. Поскольку энергия эквивалентна массе, измерить ее можно так же, как массу, — взвешиванием тела. А перевод единиц массы в единицы энергии надо сделать по формуле $E = mc^2$ (E — энергия в эр-

гах, m — масса в граммах, c — скорость света в сантиметрах в секунду). Эта формула ныне стала самой известной из всех когда-либо выведенных физиками. Ее печатают даже на почтовых марках (я видел ее на марке африканского государства Ганы!).

А получена она была, кстати сказать, без всяких разговоров о внутреннем движении в веществе. Эйнштейн добыл ее из гораздо более общих соображений.

Скрытое за формулой

Эйнштейн, человек с добрым и тонким юмором, оставил нам коллекцию остроумных афоризмов. Среди них многозначительный парадокс: «Ни один ученый не мыслит формулами». Как понимать это?

Разумеется, умение легко оперировать в уме математическими абстракциями незаменимо. Без него не может жить современный физик-теоретик. Но за формулами он всегда чувствует нечто большее. В символике вычислений и решений он ищет откровения природы, которые могут выглядеть нелепыми, могут показаться математической фикцией, но на деле отражают глубинную сущность мира.

Яркий пример — открытие эквивалентности энергии и массы. Оно было подсказано неожиданным видом математического выражения кинетической энергии, которое Эйнштейн вывел из своей теории.

Вышло так. Строгими и последовательными этапами, с учетом относительности времени, расстояний, массы для кинетической энергии движущегося тела была получена формула:

$$K_p = mc^2 - E_0,$$

где K — релятивистская кинетическая энергия, m — релятивистская масса, равная $\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, m_0 — масса покоя, а E_0 — какая-то еще не известная нам постоянная величина. Попробуем ее определить.

В свое время (страница 66) мы согласились, что кинетическая энергия есть «обещание работы». Заставим наше K_p выполнить обещание — пусть поработает сколь-

ко сможет. Самое большее, что ей доступно,—отдать на работу всю себя целиком. Тогда она исчезнет, а тело полностью затормозится, его скорость станет равна нулю ($v=0$). При этом будет: $K_p=0$, а $mc^2=mc^2$

(так как при $v=0$ $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=1$). И, следовательно, $0=mc^2-E_0$, то есть $E_0=mc^2$, а $K_p=mc^2-mc^2$.

Последняя формула при малых скоростях переходит в классическую $K_{кл}=\frac{mv^2}{2}$ —поверьте, что это так. Соответствующие не очень сложные выкладки я опускаю.

А основная черта несходства классической формулы с релятивистской—в математической структуре. Если $K_{кл}$ —одночлен, то K_p —двучлен, разность двух одноподобных выражений. Те, кто «мыслит формулами» (лучше сказать: *только* формулами), склонны не обратить внимания на этот факт, посчитать его случайностью. Но Эйнштейн за математическим своеобразием угадал сокровенный секрет природы: то, что любое вещество—это, по сути дела, титанической силы взрывчатка.

Пусть движущееся тело—разрывная пуля. Исполнить работу она «обещает», не только затормозившись до нулевой скорости, но и взорвавшись. Соответственно ее полный запас энергии равен сумме кинетической энергии и внутренней энергии возможного взрыва. А поэтому кинетическая энергия (K) представится разностью между полной (T) и внутренней (E) энергиями. Запишем это:

$$K = T - E.$$

Заметили аналогию с формулой $K_p=mc^2-mc^2$? Благодаря тому, что в тело внесена внутренняя энергия, для его кинетической энергии получен *двучлен*, весьма похожий на тот, что выведен Эйнштейном для кинетической энергии *любого* тела (а не только разрывной пули).

Значит, любое тело подобно разрывной пуле. Даже в покое оно заключает—таки в себе энергию. Причем фантастически огромную. Камень, капля воды, песчинка способны взорваться. И леденец. И космонавтки Алла и Элла. Впрочем, взрываться им совсем не обязательно. Отдать свою внутреннюю энергию они в принципе могут и спокойно. Если бы можно было сделать «леденец Эйн-

штейна», обсасывая который вы слизывали бы с него всю энергию-массу (каждый день — 3000 калорий), то он заменил бы вам пищу на сто тысяч лет!

Для нас с вами это не неожиданность. Но ценно то, что вывод обошелся без всяких допущений о внутренних движениях в веществе. Что бы ни происходило в недрах тела, раз уж масса его m граммов, то запас его внутренней энергии $E = mc^2$ эргов. Граммы массы надо дважды помножить на скорость света — так они переводятся в единицы энергии — эрги!

Глава 16. СЕЙФЫ ЭНЕРГИИ

Богатстао под замком

Сделав расчет по уравнению Эйнштейна, мы убеждаемся, что грамм любого вещества — это $9 \cdot 10^{20}$ эргов энергии. Или 25 миллионов киловатт-часов. По государственным расценкам (четыре копейки киловатт-час) цена энергии, если ее продавать на вес, — миллион рублей за грамм!

Какой-нибудь запасливый богач, убедившись, что об-счета нет, решит, быть может, приобрести на черный день граммов сто такой «законсервированной» энергии. Торговцем будет все тот же бандит Клио, отбывший срок в тюрьме, но, увы, не исправившийся.

Дрожа от жадности, Клио пересчитает деньги (миллион сторублевок) и подаст покупателю полстакана воды.

Потому что сто граммов массы — это и есть сто граммов энергии. Никакого обмана!

С таким же правом он мог отвесить покупателю стограммовую горсточку земли или вручить стограммовый камешек. В ста граммах любого вещества — на сто миллионов рублей энергии. По миллиону за грамм.

Однако в разгар сделки должен явиться вездесущий детектив-релятивист майор Прошкин. Со спокойной усмешкой в серых пронизательных глазах он заставит Клио вернуть глупому богачу покупателю его громадные деньги. Потому что даже при блестящем знании современной физики Клио не сможет приложить к покупке инструкцию, где было бы сказано, как превратить всю проданную на вес энергию недвижимого

вещества в работу. Этому наука пока не знает. Вручить массу-энергию в виде вещества — все равно что выдать зарплату в сейфе, который невозможно открыть.

Итак, вещество — это сейф. Вернее, бессчетные мириады крошечных сейфиков, битком набитых огромной энергией.

Я разгуливаю по планете — и груды энергетических кладов дуют на меня ветром. Другие хрустят под ногами снегом и песком. Третьи плещутся в морских волнах. Четвертые шелестят в листьях. Энергетические клады летают птицами, рыщут зверями. И каждый человек — тоже дремлющий заряд колоссальной энергии. И каждый муравей, и паутинка в лесу... Всюду скрыто обещание к гигантской, уму нелостижимой работе.

Но на обещание наложен запрет. Сейфы закрыты. Правда, не наглухо.

Во многих таких сейфах есть тоненькие щелочки, через которые вырывается наружу энергия, способная работать. Потому-то ползут муравьи, летят птицы, трудится, мыслит человек. И костры горят, и плавится чугун в доменных печах. И действуют ядерные реакторы, и жарко светит солнце...

Щели в сейфе

Первая — очень узенькая — щелочка пробивается химическими реакциями. Как это происходит — разговор особый, касающийся микроскопической структуры вещества, связей между атомами и молекулами. Формула Эйнштейна утверждает главное: через «химическую щель» едва проникают стомиллиардные доли процента сокровища, спрятанного в сейфе вещества. Тем не менее, именно эта ничтожная часть энергии питает величайшее многообразие химических, электрохимических, биологических процессов, окружающих нас повсюду.

Я чиркнул спичку, зажег костер — проделал щелочку в сейфе-хворосте. Горит костер. Я греюсь энергией, освобождающейся в ходе химической реакции между топливом и кислородом. Энергия уходит, а с ней и масса. Поэтому продукты сгорания (угли, зола, дым, отходящие газы) должны весить меньше, чем исходные продукты (хворост и кислород). Разница, однако, на-

столько мала, что зафиксировать приборами ее невозможно. На каждый килограмм она составит меньше, чем 0,000 000 000 5 грамма! Так, старый, испытанный в поколениях химиков закон сохранения веса веществ до и после реакции соблюдается с высочайшей степенью точности, хоть, строго говоря, в нем нет абсолютной справедливости. Теория относительности вносит поправку: если при реакции выделяется (или поглощается) энергия, вес веществ после реакции становится чуть-чуть меньше (или, соответственно, больше).

Это «чуть-чуть» в обычной химии практически не играет никакой роли. Зато в ядерной химии и физике оно превращается в величину заметную и существенную, которую вполне можно обнаружить. Еще в 1905 году, в первой своей работе о теории относительности, Эйнштейн сделал на этот счет дальнейшее предсказание: он посоветовал проверить свою формулу на явлении радиоактивности, в котором, как он отметил, «содержание энергии может меняться в сильной степени».

Кусочек соли радия — это, пользуясь нашим сравнением, дырявый сейф. Из него непрерывно сочится энергия. И радий тает, распадается, превращается в другие химические элементы, теряет в весе. Довольно тонкий опыт позволил определить, какая доля массы уходит вместе с энергией, — получилось точное согласие с предсказанием Эйнштейна.

Нашлись в природе ядерные «сейфы», которые, подобно хворосту костра, поджигаемому спичкой, дают «трещину» по приказу извне, но довольно солидную, пропускающую несколько процентов энергии-массы. Прежде всего — знаменитое горючее атомной бомбы, некоторые разновидности металла урана. Роль запала поручена частице под названием нейтрон. Нейтрон разрушает ядро урана на осколки, а заодно освобождает значительную энергию, которая их сцепляла. Освобождается и соответствующая масса. Поэтому осколки весят на один-два процента меньше, чем ядро до деления. Один-два процента энергии-массы получают свободу — и следует катастрофический атомный взрыв.

Узнав о трагедии Хиросимы, Эйнштейн с отчаянием воскликнул: «О, горе!» Он считал себя причастным к мученической гибели японского города, ибо возможность ядерного взрыва была им предсказана за сорок лет.

Однажды ученый с печальной иронией назвал себя «дедушкой атомной бомбы».

А за несколько месяцев до смерти Эйнштейна в СССР открылась первая в мире атомная электростанция.

Почему светит Солнце

Ньютон совершил научный подвиг, открыв солнечное тяготение, разгадав, почему планеты движутся вокруг Солнца. Но вопрос «Почему Солнце светит?» для классической науки оказался непосильным. Множество гипотез провалилось. Солнце горело своим могучим огнем и одаривало Землю жизнью вопреки недоумениям механики и запретам химии. Будь оно сделано из первосортного угля, бензина, пороха — все равно энергии катастрофически не хватило бы. Не помогали предположения о бомбардировке Солнца метеоритами, о сжатии солнечного шара под действием собственной тяжести (тогда он должен был бы разогреться подобно тому, как греется воздух под поршнем насоса) и т. д. Это было удивление, от которого никто не видел путей бегства. По всем данным науки XIX века, Солнце обязано было давным-давно сгореть, погаснуть и застыть.

Формула Эйнштейна разрешила Солнцу светить так, как оно светит сегодня, миллиарды лет в прошлом и миллиарды лет в будущем. Взвешенное Ньютоном, оно получило из рук Эйнштейна право на гигантскую энергетическую жизнь.

Солнце — тоже «сейф». В нем тоже есть «щели». Прделаны «щели» термоядерными реакциями: при температуре в миллионы градусов и колоссальном давлении атомные ядра водорода в цепочке последовательных превращений соединяются и образуют ядра гелия. Природа микромира такова, что одно ядро гелия весит на несколько процентов меньше, чем четыре ядра водорода, из которых оно возникает в солнечных глубинах. Вот она, «щель» — ядерный синтез. Освобожденная из вещества масса, а с нею и энергия вырываются из Солнца могучим лучистым потоком.

Ежесекундно Солнце «худеет» на четыре тысячи тонн. Много? Для Солнца — не очень. При массе $2 \cdot 10^{27}$ тонн за миллион лет оно теряет лишь миллиардную долю своего энергетического запаса!

Звезды на Земле

Если вы читаете газеты, то знаете, что термоядерный взрыв люди научились осуществлять и на Земле. Это водородная бомба, еще более разрушительная, чем атомная.

Если вы читаете газеты, то знаете и другое: во всем мире ученые ищут пути возбуждения спокойной, не взрывной термоядерной реакции. Решить эту проблему, труднейшую в современной прикладной физике, — значит приоткрыть сейфы с безбрежными богатствами энергии ядерного синтеза. Изотопы (разновидности) водорода, этого солнечного топлива, на Земле есть. Один из них — тяжелый водород — содержится в простой воде, другой, особенно эффективный, — сверхтяжелый водород — можно добывать из металла лития. Тяжелый водород, находящийся в одной кружке водопроводной, дождевой, речной, болотной, морской — какой угодно! — воды, способен дать в термоядерной реакции столько энергии, сколько мы получаем, сжигая бочку первосортной нефти. Мировой океан воды обещает обернуться пятьюстами такими же огромными океанами нефти. И, кстати, вода после извлечения тяжелого водорода ничуть не пострадает — останется такой же мокрой, жидкой, освежающей, вкусной водой, вы даже не заметите в ней никаких перемен.

Словом, относитесь с уважением к воде и следите за газетами — я думаю, не за горами день, когда зажгутся на Земле искусственные звезды. Это не басенный посул синицы, возмечтавшей «поджечь море», это будет наверняка. Ибо обязательство дает тысячи раз проверенная и перепроверенная формула Эйнштейна. Видите: теория относительности пророчит человечеству величайшее, сказочное благосостояние.

Поноя вет нигде

Очередной коротенький экскурс в область философии и религии.

В классической физике неравноправие массы и энергии налицо. Они там оторваны друг от друга. Весом и инерцией Ньютон наделил только «хозяйку»-массу,

оставив «имущество»-энергию невесомым и безынерционным. Так получилось не случайно. Ньютон вынужден был признавать абсолютное неподвижное пространство, и, следовательно, все, что покоилось относительно него, награждалось свойством абсолютной неподвижности. Абсолютная неподвижность же — это полное бессилие, полное отсутствие способности совершить работу. А значит, и безоговорочная пропажа энергии. Вещество Ньютона — мертвое, оно не может стать источником движения.

Ньютон это превосходно понимал. Но видел кругом мир, насыщенный безостановочным движением. Откуда взялось оно, Ньютон объяснил: от бога. Бог — вот кто, по мнению Ньютона, совершил «первый толчок», расшевелил инертное, мертвое вещество Вселенной. Нематериальное вдохнуло жизнь в материальное — прямо по священному писанию. А потом, соблюдая законы механики, мир пошел по кругам истории.

Этот тезис ньютоновского учения с радостью приняла церковь: из уст уважаемого физика прозвучало что-то вроде доказательства бытия всевышнего. Такое откровение было для богословов драгоценностью, неожиданным кладом. Ведь со времен Коперника и Галилея многое изменилось. Отцам церкви стало ясно, что знание уже не сожжешь на кострах, что науку невыгодно отбрасывать, отрицать — ее лучше подчинить, сделать помощницей религии. Тут, как нельзя кстати, и подоспела гипотеза «божественного толчка».

Опять, как прежде, когда обсуждалось ньютоновское обожествление пространства и времени, я приглашаю вас согласиться, что глупо и бессмысленно из многознающего сегодняшнего далека ставить в вину великому физика его религиозность. Спросите умников, которые нынче посылают в прошлое подобные упреки (это, увы, бывает): а что бы они придумали на месте Ньютона?

Ничего бы они не придумали.

Религия — дитя незнания. Пока в научной картине мира зияла такая солидная брешь, как отсутствие материальной причины физического движения, неизбежны были ссылки на мистику. Точно так же, как не мог обойтись без веры в Зевса-громовержца древний грек, понятия не имевший о подлинных причинах дождя и грозы.

Такой вдумчивый атеист, как Фридрих Энгельс, увидел даже зерно прогресса в мистической мысли Ньютона-философа. В божьей власти, по мнению Ньютона, осталось одно лишь давнее прошлое: великий физик отдал творцу только первый удар и лишил всего остального. Таким образом, речь шла, скорее, об освобождении Вселенной от божественного управления. Подобное случалось нередко. Пусть не сразу, но бог неминуемо вытеснялся из естествознания — и знаменательно, что это часто делалось учеными, которые отнюдь не были безбожниками. Постигая природу, наука изгоняла из нее мистику порой даже вопреки воле самих исследователей.

Все же вплоть до начала XX века гипотеза «божественного толчка» оставалась прибежищем идеализма в физике. Она рухнула с появлением теории относительности, создатель которой тоже, кстати, вовсе не был воинствующим атеистом. Ниспроверг гипотезу закон эквивалентности массы и энергии. Именно этот закон показал, что материя буквально «до дна» насыщена движением, скрытым или явным, принципиально от нее неотделимым.

Я приглашаю вас еще раз удивиться этой неуязвимой логике: тому, как из причуд игры света в хитро расставленных майкельсоновских зеркалах родилась уверенность, что любая капля воды, любой булыжник — титанический запас энергии, способности к работе, к движению. Ныне факт этот доказан опытом, подтвержден даже войной, индустрией, освещен заманчивыми и вполне реальными надеждами.

И он же отверг надобность в нематериальном начале для полноты физической картины мира.

Так Эйнштейн лишил божество работы, которую навязал ему Ньютон. И разрушил его прибежище — абсолютное пространство и математическое, отрешенное от физики время. В беспокойном мире Эйнштейна материя сама себя движет, сама себе «обставляет квартиру» (управляет относительными расстояниями) и регулирует собственные «часы» (относительное время). Посторонней — в том числе и потусторонней! — помощи не требуется.

И все это — итог двух постулатов Эйнштейна и принципа причинности. Ведь уже в них материя с самого

начала была лишена покоя: вещество — абсолютного, а поле — даже относительного. Что ни говорите, поразительная цепь умозаключений!

Прикосновение к звезде

Шаг за шагом мы узнали много любопытного из эйнштейновской физики быстрых движений. Теперь попробуем сообразить, как изменяется добытым знанием наше привычное восприятие мирового пейзажа.

Вот еще один утрированный пример. Раз уж расстояние зависит от скорости путника, значит, можно... не сходя с Земли, дотянуться рукой до Луны? Двинь туда достаточно быстро ладонь — и для нее от четырехсот тысяч километров останется полметра? Еще быстрее махни рукой — дотронешься до звезды? Сказка!..

Разумеется, такое невозможно. Запретов масса, о них уже говорилось. «Для головы» (которая «останется дома») путь до звезды не изменится, а движущаяся рука укоротится — значит, оторвется от тела. Спорт варварский. Если «взмах» Земля — Сириус «для ладони» продлится секунду, то «для головы» — больше десяти лет. Тоже нехорошо. Главное же, немислимо преодолеть катастрофически возрастающую инерцию руки, не хватит никакой энергии. Тут, пожалуй, не мысленный эксперимент, а праздное баловство фантазии.

Все так. Со взмахом руки эйнштейновские эффекты не связываются, это ясно.

Но помня о запретах и тем не менее развлекаясь подобными размышлениями, начинаешь, мне кажется, не только умом, но и сердцем, каким-то новым чувством, понимать суть эйнштейновской относительности.

Иными видятся мировые дали. Привычная бездонность небес и вездесущая вечность зримо обогащаются тончайшей игрой релятивистских расстояний и длительностей. Звезды будто рядом, хоть они «технически» и недоступны. Пути и сроки податливы, подчинены движению. Вся Вселенная преобразается во что-то новое, еще более сложное и интересное, чем мыслилось прежде.

Физика Эйнштейна меняет модель мира в самом фундаменте человеческих представлений!

Об этом еще будет идти речь впереди.

Часть третья

УДИВЛЕНИЕ ТЯГОТЕНИЮ

Глава 17. КАК ИЗГОТОВИТЬ ТЯЖЕСТЬ

Еще воспоминание и обещание

Вы не забыли, от какого удивления мы намеревались убежать в начале этой книжки? От удивления падению. Падению ядер, пуль, пушинж. Нам очень хотелось понять внутреннюю сущность земного тяготения: как это оно действует через пустоту, почему одинаково ускоряет тела разного веса? Мы, кажется, довольно скоро поняли, что задача не из легких. На вопрос «Почему тяготение действует через пустоту?» ответа не нашлось. На вопрос «Почему тополиная пушинка и пушечное ядро в безвоздушной среде получают от тяготения равные ускорения?» ответ был добыт, но не очень вразумительный. Пришлось допустить, что во всяком теле существуют две массы — тяжелая и инертная и что они с беспредельной, абсолютной точностью одинаковы.

Равенство тяжелой и инертной масс выглядело в физике Ньютона чистой случайностью. Отсюда следовал неправдоподобный вывод: космический порядок звездных и планетных движений, весь гармоничный хоровод светил держится на совпадении! Удивительно! Просто невероятно!

Дабы убежать от этого удивления, мы углубились в физику. Разобрались в странностях распространения света, через серию промежуточных удивлений проникли в мир Эйнштейна, дошли до относительности времени, расстояний, до великого закона эквивалентности массы

и энергии. По ходу дела мы без стеснения пользовались, если было нужно, равенством тяжелой и инертной масс. Но этим вносили, как по аналогичному поводу выражался Эйнштейн, натяжку в рассуждении, ибо старое сомнение отнюдь не было разрешено. Все разговоры о том, что энергия имеет вес, вытекают из замены инертной массы на тяжелую. А это и есть натяжка.

И вот я с радостью сообщаю вам: настало время избавиться от недоумений по поводу «случайного» равенства тяжелой и инертной масс. Мы уже почти готовы к обсуждению внутренней сущности тяготения, готовы к заключительному этапу бегства от удивления одинаковой быстроте падения мельничных жерновов и тополиных пушинок. И даже от удивления «действию без прикосновения».

Все эти простые и вместе с тем фантастически сложные загадки решаются в тонкой и глубокой области современного физического знания, которая именуется общей теорией относительности. Она охватила универсальным принципом относительности не только равномерные и прямолинейные, но и ускоренные движения, и гравитационные явления. В ней признаются законными, годными для физики, все системы отсчета, а не только инерциальные.

Общая теория, опубликованная Эйнштейном в 1916 году, сразу привлекла к себе пристальное внимание. Ее широта и смелость поразили физиков еще больше, чем парадоксальная новизна частной теории¹. Поныне существует мнение, что общая теория обогнала естественный прогресс науки (об этом говорил и сам Эйнштейн). Поныне вокруг нее не смолкают споры, строятся разные толкования ее идей.

Сотая Олимпиада

Сотые Олимпийские игры будут в 2292 году. Это я рассчитал точно по календарю. Но где их проведут? Тут — целая проблема. Очень может быть, что по этому

¹ То есть теории, касающейся равномерных и прямолинейных движений, — именно частная (иногда говорят — специальная) теория относительности растолковывалась в предыдущих главах.

вопросу в организационном комитете произойдет оживленная дискуссия, а то и перепалка.

Обитатели Земли захотят, чтобы игры состоялись на Земле. Жители Луны предложат, естественно, Луну; марсиане — Марс, венериане — Венеру и т. д. К тому времени люди или созданные ими роботы (не уступающие, быть может, человеку в спортивном мастерстве) поселятся на многих планетах Солнечной системы, и всякий будет звать к себе олимпийских гостей, потому что, я думаю, настанет эра всеобщего гостеприимства. И еще потому, что на родной планете бегать, прыгать и играть в разные подвижные игры удобнее, чем на чужой — хотя бы из-за привычной силы тяжести. Лунному жителю на Земле в шесть раз труднее двигаться, чем у себя дома.

Как же решится спор? Как помирить противоречия и соблюсти равноправие участников? Где состоятся игры?

Из сегодняшней старины, за 325 лет до Олимпиады № 100, я решусь дать совет членам подготовительного комитета: лучше всего, уважаемые прапрапраправнуки, если вы организуете игры на нейтральной территории, свободной от вещества, — где-нибудь в космосе, причем подальше от планет и Солнца.

Я слышу из будущего сердитое возражение:

— Но в космосе нет тяжести! Как же без тяжести прыгать, бегать, поднимать штанги?

Тяжесть можно изготовить, уверяю вас. Любую, и сильную и слабую, на всякий вкус, по потребностям каждого спортсмена — и селенита, и марсианина, и землянина.

— Как это «изготовить»? Что еще за тяжесть без земного, лунного, солнечного притяжения? Подделку, наверное, предлагаете?

Никакую не подделку. Не суррогат, не фальсификацию, а самую настоящую тяжесть. На следующих страницах я берусь убедить вас, что это вполне возможно, и объясню, какие потребуются технические средства.

— Ну ладно, объясняйте, — говорят мне прапрапраправнуки, члены подготовительного комитета сотых Олимпийских игр.

Возражения и реплики из будущего были посланы, надо полагать, со скоростью, превышающей скорость

света,— поэтому и прибыли ко мне на триста с лишним лет раньше, чем были посланы. А так как мне невозможно, то приведенный выше разговор мне, надо полагать, приснился или померещился. Тем более, что через триста лет сведения, которые я намереваюсь сообщить ниже, будут наверное, известны школьникам третьего класса.

Тяжесть проще табуретки

Вы знаете, что такое кухонная табуретка? Вероятно, знаете. А как вы докажете, что знаете?

Можно, конечно, пуститься в многословные объяснения: это-де мебель, на которой сидят, она имеет четыре ножки, но не имеет спинки и т. д. Можно, кроме того, нарисовать табуретку, приложить к чертежу химический анализ ее материала, таблицу удельного веса разных деталей и еще кучу документов. Все это не помешает.

Но лучшим доказательством будет дело. Практика! Сработайте своими руками добротную, прочную, устойчивую табуретку— и любой скептик признает: да, вы до тонкостей знаете ее «внутреннюю сущность».

Если кто-нибудь похвастает, что знает, в чем заключается внутренняя сущность тяготения, ради проверки попросите его сделать это самое тяготение без услуг Земли, Луны или Солнца. И, несмотря на то, что тяготение— не табуретка, а нечто более сложное, знающий человек изготовит его моментально. Ему не потребуются для этого ни досок, ни гвоздей, ни клея. Он просто взмахнет рукой.

Вот ладонь. На ладони лежит пяточок. Пяточок весит пять граммов. Я резко, с ускорением поднимаю ладонь. Чувствую, что пяточок сильнее на нее надавил. Значит, он стал больше весить. Утверждаю: ускоренным движением ладони я создал добавочное тяготение (это, как видите, гораздо проще, чем сколотить табуретку).

Вы, конечно, возражаете: никакое это не тяготение. Это инерция. Перегрузка— как у взлетающих космонавтов. Пяточок не сразу поддался ускорению— ведь, кроме тяжелой, в нем есть инертная масса.

Возражение естественное. Оно полностью согласуется с механикой Ньютона, с первой частью этой книжки и со школьным курсом физики. Но я настаиваю на своем. И прошу вас доказать ваше опровержение не только словами, но и делами. То есть опытом.

Очень просто: надо экспериментом отличить инерцию от тяжести. Например, в следующей научно-фантастической ситуации.

Черномор-космонавт

XXI век. Некая красавица, по имени Людмила, включает стереоскопический цветной телевизор, поворачивается на правый бок и сладко засыпает в своей малогабаритной квартире на Цветном бульваре. Во время сна ее похищает влюбленный, но без взаимности, космический пришелец Черномор. Осторожно переносит в ракету и улетает прочь с Земли. Допускается, что у Людмилы очень крепкие нервы и она не просыпается от грохота и перегрузок во время старта. Однако через пять-шесть часов она должна-таки проснуться. Черномор этого не хочет, и не без причин. Дело в том, что у Людмилы есть знакомый, по имени Руслан, который служит в Московской радиоастрономической обсерватории. Людмила к нему равнодушна и даже приняла от него подарок — перстень, в который вделан маленький транзисторный радиопередатчик. Снять радиоперстень с пальца красавицы Черномор не посмел — боялся разбудить. Вот он и опасается, что, проснувшись и узнав о похищении, Людмила воспользуется перстнем, пошлет Руслану сигнал тревоги, и тогда не избежать погони и других осложнений.

Ради страховки от таких неприятностей Черномор предпринял широко задуманную мистификацию. Во-первых, пассажирскую кабину ракеты превратил в точное подобие Людмилиной спальни — от трещин в паркете до мастерски декорированного московского дворика за окном. Во-вторых (и это главное!), ракета непрерывно ускорялась вверх. Ускорение было идеально плавным и составляло точно $9,81$ метра в секунду за секунду. То есть равнялось g — ускорению свободного падения у земной поверхности.

И вот Людмила проснулась. Потянулась, соскочила

с постели, попрыгала, мурлыкая песенку про черного кота (она любила старинную музыку), и взглянула на часики с маятником, висевшие на стене. Маятник прилежно качался, стрелки показывали восемь. Людмила вспомнила, что сегодня воскресенье, а значит, не надо бежать на работу. И она юркнула под одеяло...

Черномор и на этом строил свой коварный расчет — он знал, что в воскресенье красавица встает около одиннадцати.

А ракета мчалась все дальше.

Через полчаса она ушла из зоны, подвластной земной администрации.

Догадаться о своем незавидном положении Людмиле удалось слишком поздно. Проснувшись около одиннадцати, она накинула халатик и отправилась было в ванну, но обнаружила за дверью комнаты внутреннюю обшивку звездолета, иллюминатор с черным небом и бледного Черномора, робко лепетавшего:

— Простите меня, Люда, но я не мыслю жизни без вас и вот решил увезти вас в надзвездные края.

— Наглец! — воскликнула красавица, дала Черномору звонкую пощечину и тут же закричала в свой радиоперстень: — Алло, Руслан! Учти, что меня украли...

Напрасно. Земля была уже в ста миллионах километров (можете проверить по формуле Галилея

$$S = \frac{gt^2}{2},$$

а заодно решить, не нужны ли релятивистские формулы).

Руслану пришлось, очевидно, самому гадать, где искать похищенную подругу. Как он это делал — спросите у фантастов. Им, я думаю, подсказана неплохая завязка для романа.

Тяготение нан ускорение

Нам с вами интереснее другое. Опять произошло нечто хоть и удивительное, но более или менее привычное: не удалось отличить движение от покоя. Почему же? Может быть, Людмила не сумела? Будь она физиком и отнесись к делу внимательнее, смогла бы она в закрытой комнате с достоверностью обнаружить равномерно-ускоренное движение и отличить его от земного

(в условиях тяжести) покоя? Каким образом, каким прибором, в каком эксперименте?

Испробуем механику. Пусть Людмила построит в своей комнате миниатюрную Пизанскую башню и сбросит с нее пушечное ядро и мушкетную пулю. Как они будут падать?

С точки зрения ньютоновской физики, они вообще не будут падать. Они полетят равномерно по инерции с той «абсолютной» скоростью, с какой в момент сбрасывания летела ракета Черномора через «абсолютное» пространство. А поскольку ракета летит не равномерно, а с ускорением g , пол комнаты, где находится пленница, очень скоро нагонит ядро и пулю. Если пренебречь сопротивлением воздуха, времени на это понадобится ровно столько, сколько надо для падения ядра и пули с той же высоты под действием земного тяготения. Считая себя неподвижной, Людмила зарегистрирует обыкновенное падение — точно такое же, какое бывает на Земле. А поэтому похищенная красавица не сможет узнать, движется она или пребывает на Земле в неподвижности.

Что ж, раз механика не сработала, испробуем оптику. Тут как будто есть надежда на успех, ибо ракета *разгоняется* (в равномерно и прямолинейно движущейся системе надежды на успех нет, потому что скорость света не зависит от скорости светового источника).

Пошлем тонкий луч света параллельно полу, от одной стены комнаты к другой. Пока световые волны пробегут комнату, она, благодаря ускорению вверх, поднимется чуть-чуть больше, чем если бы ускорения не было. Волны же этого ускорения (вверх) не получают — и поэтому на противоположной стене они окажутся, можно думать, немножечко ниже, чем при равномерном движении или покое. Вот оно, свидетельство ускорения, да?

Ничуть не бывало. Луч несет энергию, следовательно, и массу (свет не имеет массы покоя, но имеет массу движения — вспомните предыдущую главу). Масса же обязана притягиваться к Земле. Вот и выходит, что не только в ракете, но и в комнате на Цветном бульваре световой луч отклонится книзу, к полу. В ускоренно поднимающейся комнате — потому, что сам пол, разгоняясь, приблизится к равномерно летящим световым

волнам. В неподвижной — потому, что световые волны станут падать под действием силы тяжести — словно пули, выстреленные параллельно горизонту. Наша Людмила (неподвижный относительно комнаты наблюдатель) всякий раз отметит не прямой, а изогнутый путь луча.

Свет не помог. Опять невозможно установить движение!

Вывод странен: ускоренное движение равноправно с покоем в поле тяготения. Механическим и оптическим экспериментами изнутри системы отсчета не удалось предпочесть одно другому.

Этот мысленный эксперимент — начало общей теории относительности.

Глава 18. СОМНЕНИЯ И ВОЗРАЖЕНИЯ

Жуки-физики в футбольном мяче

Вот небольшое сомнение.

Можно подумать так. Обман Людмилы, предпринятый Черномором, удался благодаря исключительно плавному, строго равномерному ускорению ракеты. Неравномерное ускорение — тряска и толчки — немедленно указало бы, что ракета движется. Удар, встряска — значит, нарушился относительный покой в мчащейся комнате, что тотчас отметят и механические и оптические приборы, да и человеческие ощущения.

Верно. Людмилу насторожили бы толчки. Возможно, она догадалась бы, что дело неладно, потому что с детства привыкла к постоянству земного тяготения.

Но это отнюдь не подрывает вывода, сделанного Эйнштейном. Ибо привычка к постоянству тяготения — чисто житейская. Нам с вами, не космонавтам, никогда не случалось, сидя на стуле, вдруг почувствовать, что тяжесть стала меньше или больше (во время землетрясений, наверное, ощущение похоже, да еще в лифте, в самолете; но там-то мы наверняка знаем, что движемся).

Физик же, заключенный в закрытой ракете, ощутив толчки, должен заглушить в себе голос привычки. Тогда он вправе дать два совершенно противоположных

объяснения. Или произошло изменение ускорения. Или толчок вызван изменением силы тяжести. И опять-таки никакими опытами, никакими измерениями он не сумеет отдать предпочтение одному из этих вариантов.

Вообразите физическую лабораторию, устроенную внутри футбольного мяча. Крошечные лаборанты (например, какие-нибудь фантастические жуки или муравьи) не знают, что происходит снаружи. То ли мяч скачет по полю под ударами игроков (тогда толчки и перегрузки вызваны ускорениями), то ли мяч неподвижен, но в нем происходит пляска тяготения (тогда толчки вызваны быстро меняющимися силами тяжести).

Хладнокровие в лифте

С точки зрения классической механики лаборатория в мяче и ракета Черномора были ареной игры сил инерции. По Ньютону, никаких изменений тяготения там не было. Уместен и обратный пример, в котором ньютоновец нашел бы действие не инерции, а тяжести.

Придумал такой пример сам Эйнштейн. Это падающий лифт.

Оборвался канат, кабинка лифта стремглав падает, влекомая земным тяготением. В конце концов она достигает дна шахты — и наступают печальные последствия.

Если вы достаточно хладнокровны, чтобы размышлять на научные темы в падающем лифте, то можете, по Эйнштейну, считать себя неподвижным. Это засвидетельствуют и механические и оптические опыты. Они зарегистрируют идеальную невесомость и строго прямолинейное распространение светового луча — как в далеком космосе, в ракете, которая летит без ускорений, по инерции. Или по инерции же пребывает в покое (что, конечно, изнутри неотличимо от прямолинейного равномерного движения).

Прежде инерция была сведена к тяготению. Ускорением мы создали тяжесть. Теперь же, наоборот, тяготение сведено к инерции. Ускорение ликвидировало тяжесть.

Итак, Эйнштейн считает равноправными две системы отсчета: ракету, неподвижную в поле земного тяго-

тения, и ракету, летящую вне поля тяготения с ускорением g . Либо лифт, покоящийся или равномерно летящий в глубинах космоса вне полей тяготения, и лифт, который свободно падает в поле тяжести. Основание для такого заключения дал высший судья физических высказываний — его величество эксперимент.

Если никакими способами невозможно отличить одно явление от другого, значит, эти явления физически тождественны. Их различие — только в названии. Немец говорит «*der Tisch*», русский — «стол», а предмет, обозначаемый этими названиями, один и тот же, ибо физических признаков отличия нет.

Похищенная Людмила, веря в свою неподвижность, назвала стремление тел книзу тяготением. Руслан, от которого умчали Людмилу, сказал бы: «Нет, это инерция».

Обитатель падающего лифта, считавший себя неподвижным, не находил никакого тяготения и объяснял этим свою невесомость. Для него лифт летел по инерции. Лифтер же, оставшийся снаружи, объяснил движение лифта, как и пропажу в нем веса, тяготением.

Разные наблюдатели — разные слова. А суть — одна.

Инерция и тяготение — по Эйнштейну, физически тождественные явления природы (правда, с оговоркой, которую я приведу в следующей главе). Таков неожиданный и парадоксальный принцип эквивалентности инерции и тяготения. Он был провозглашен Эйнштейном еще до опубликования общей теории, в 1913 году. А из него прежде всего следует вывод, к которому мы добивались через всю книжку: инертная масса и тяжелая масса равны не потому, что они совпадают случайно (так выходило по Ньютону, помните?), а потому, что это одна и та же масса. Просто масса.

Стадионы на ракетах

Не очень вразумительные разговоры о табуретке, пяточке и изготовлении тяготения без услуг земного шара (хотя бы для организации в космосе Олимпиады № 100) теперь находят обоснование.

Что ж, резко подняв ладонь с пяточком, я действительно сотворил тяготение. Для физика-лилипута, пре-

бывающего, допустим, на моей ладони, пяточок стал тяжелее — это покажут любые весы. А принцип эквивалентности стоит на страже справедливости такого мнения.

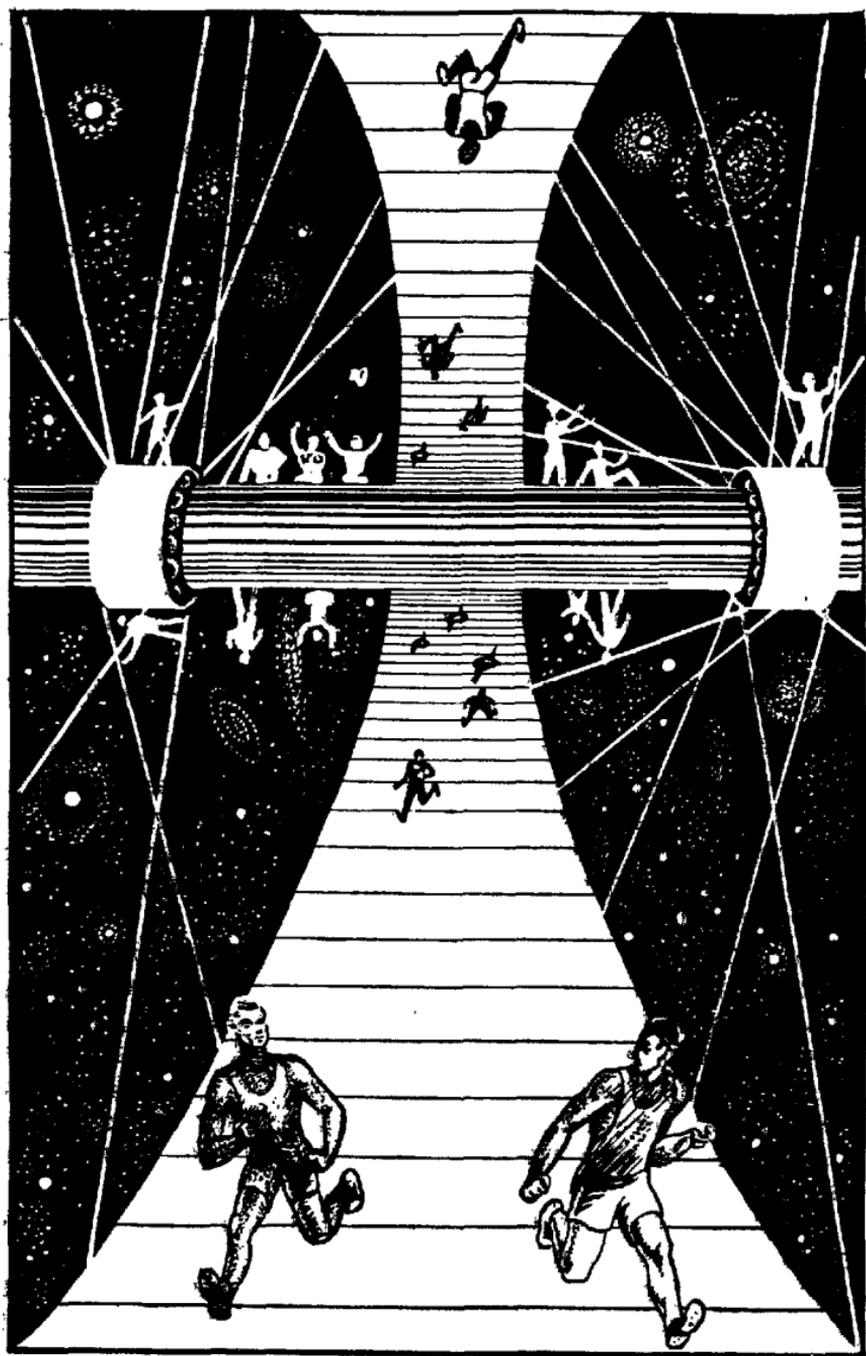
Тот же принцип поможет избежать противоречий среди участников сотых Олимпийских игр. Для спортсменов разных планет придется устроить в космосе по-разному ускоряющиеся крытые стадионы в виде платформ с колпаками, удерживающими искусственную атмосферу. Для спортсменов-землян потребуется стадион, разгоняемый ракетами «вверх» с ускорением g , для селенитов — другой, разгоняющийся с ускорением $g/6$, и т. д. На всех стадионах будут разные силы тяжести — по заказу судейской коллегии. И — никаких планет! Никаких «спокойных» источников тяготения вроде Земли! Стадионы летают взад-вперед (повороты во время перерывов), и всюду спортсмены прыгают, бегают, метают диски, гоняют и бросают мячи — в условиях привычной тяжести, как у себя на родине. Тяготение не имитируется, не подделывается. Оно создается.

Правда, правнуки-олимпийцы могут возразить, что проект технически сложен: требуется множество ракетных двигателей, возникают хлопоты с организацией движения стадионов. Предвидятся протесты и со стороны правнуков-болельщиков. Им, видите ли, неудобно будет летать без конца со стадиона на стадион и никак не удастся обозревать собственными глазами сразу полную картину состязаний (телевизоры к тому времени, надо думать, всем надоедят).

Хорошо. В таком случае я предлагаю другой — упрощенный проект. Он свободен от перечисленных недостатков, но, правда, имеет некоторые другие. Пусть он называется олимпийской каруселью.

Олимпийская карусель

Когда я в городском саду катаюсь на карусели, меня тянет вбок по радиусу центробежная сила инерции, но лодка моя прикреплена к спице, а спица надета на ось. И я не могу улететь вбок, движусь по кругу, удерживаемый центробежной силой связи с осью. А инерцию воспринимаю как тяжесть, влекущую меня вбок,



прочь от оси. С точки зрения кассира, который продает билеты, это, правда, не тяжесть, а все-таки инерция, что, однако, по Эйнштейну, не меняет сути явления.

Так в обычной карусели. Так и в олимпийской.

Она должна быть достаточно велика, эта космическая карусель. Вместо карусельной лодки или лошадки на ее спице — все тот же крытый стадион. Плоскостью своего поля он поставлен перпендикулярно к спице и параллельно оси вращения. Под прозрачным куполом — воздух. Таким образом, «верх» стадиона обращен *внутрь*, к оси карусели. Чем сильнее надо сделать тяготение, тем быстрее придется вращать спицу и тем дальше от оси расположить стадион.

Расстояние от оси лучше делать побольше. И вот почему.

Пусть длина спицы, на которой держится стадион, невелика — скажем, 100 метров. Тогда поле стадиона (шириной в те же 100 метров) будет либо кривым, как дно корыта, либо, если его сделать прямым, в разных местах будет иметь разное тяготение. В центре прямого

поля тяготение окажется в $\frac{\sqrt{3}}{2}$ раза меньше, чем по

краям (учтя, что центробежная сила пропорциональна радиусу, проверьте это сами — простейшая геометрическая задача). В обоих случаях прыгать и бегать будет затруднительно. Спортсмены попросят устроить прямое поле. И чтобы везде на нем было одинаковое тяготение.

Исполнить это требование можно.

Надо сделать так, чтобы размер стадиона был невелик по сравнению с длиной спицы. А поскольку длину беговых дорожек наши потомки, надо полагать, менять не пожелают, придется увеличить длину спицы. При двух-трехкилометровой спице на прямом стадионе вес игроков, перебежавших с краев к центру, будет варьироваться меньше, чем на свою тысячную долю. Пожалуй, терпимо.

А какова должна быть скорость вращения космической олимпийской карусели?

Чтобы устроить на стадионе, закрепленном на спице в километре от оси, такое же по силе тяготение, как на земной поверхности, стадион придется (опять простенькая школьная задача!) заставить совершить один

полный оборот вокруг оси за две минуты. Линейная скорость стадиона при этом окажется довольно значительной — 100 метров в секунду¹.

Говорит Маленький Принц

В чем достоинства олимпийской карусели?

Ее не придется непрерывно разгонять, как того требовали ускоряющиеся платформы со стадионами. В космосе отсутствует сопротивление среды — значит, достаточно одного хорошо рассчитанного толчка ракетными двигателями, и карусель начнет кружиться как положено и создавать надлежащее тяготение.

В общем, проект вышел неплохой. Я даже намеревался взять на него патент и принялся сочинять авторскую заявку. Но произошло волшебство: на мой письменный стол прилетел Маленький Принц из сказки Антуана де Сент-Экзюпери. Он сказал:

— Здравствуй,— и присел на стопку книг.

— Здравствуй,— сказал я.— Как поживаешь?

Он не ответил, поглощенный разглядыванием того, как я выписываю буквы на белой бумаге. Чтобы не испугнуть его, я сделал вид, что несколько не удивился. Наконец он вежливо попросил:

— Пожалуйста, нарисуй мне то, что ты описываешь.

Я нарисовал ему олимпийскую карусель с беговой дорожкой и объяснил, что к чему. Маленький Принц на минутку задумался, и славное личико его стало печальным. Губы вздрогнули, из глаз полились слезы.

Я опешил. И тут же заговорил наигранно-бодрым голосом:

— Ты совершенно напрасно плачешь. С чего это вдруг? Или тебе не нравится мой проект?

— Не нравится.— Маленький Принц проглотил рыдание.

¹ Это вызовет заметные неудобства: будут сильно мешать силы инерции Кориолиса — они приложены к телу, которое не неподвижно, а движется во вращающейся системе отсчета. Эти силы возникнут всякий раз, когда спортсмены станут бегать или прыгать не по линии движения стадиона (не перпендикулярно к оси карусели) — скажем, при прыжках в длину вдоль оси. Однако, путем некоторых ухищрений силы Кориолиса можно свести к минимуму и пренебречь ими.

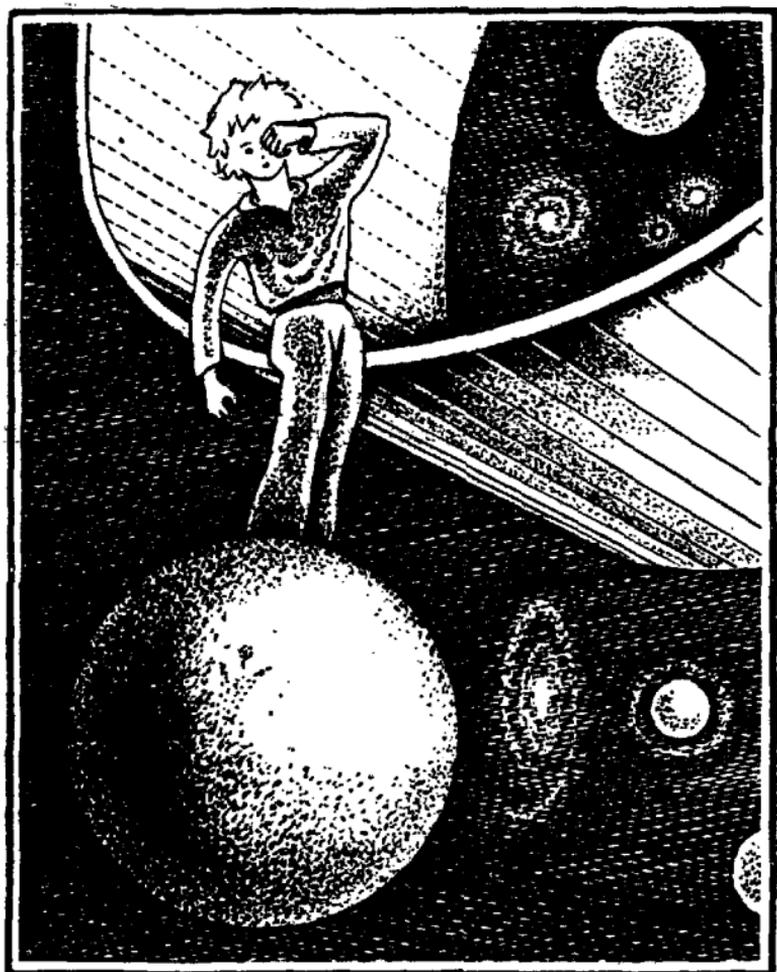
— Почему же? Взгляни-ка, какой он хороший! Каждый житель Солнечной системы получит на нем свою силу тяжести...

— Да, каждый,— сказал обиженно Маленький Принц.— Каждый, кроме меня...

— Почему же?

— Потому что я хочу выпуклый стадион. И выпуклую беговую дорожку. Да такую, чтобы всюду тяжесть была направлена к центру кривизны. Как на моем астероиде. А ты можешь сделать только прямой или вогнутый...

Маленький Принц снова заплакал. Он говорил, что не желает бегать на столе. Он ведь прилетел с крошечной планеты, где любая спортивная площадка как корка на куске арбуза.



Я огорченно слушал и не знал, чем его утешить. Действительно, в моих проектах никак нельзя было устроить то, что подошло бы моему новому заказчику.

Карты спутаны

Надеюсь, после визита Маленького Принца читатель несколько запутался. Это как раз и требуется для четкого понимания дальнейшего.

В самом деле, вышло что-то нескладно.

С одной стороны, приведены факты, доказывающие полную взаимозаменяемость инерции и тяготения: похищенная Людмила, жуки-физики в мяче, хладнокровный человек в падающем лифте дружно засвидетельствовали невозможность отличить одно от другого. На этом основании был провозглашен эйнштейновский принцип эквивалентности инерции и тяготения, утверждена относительность всех движений (а не только равномерных и прямолинейных). Стало понятно равенство тяжелой и инертной масс, разъяснилось как будто загадочное свойство пушинки и камня падать в пустоте одинаково быстро.

Сведя тяготение к инерции, я так обрадовался, что взялся выдумывать способы технического изготовления разнообразных сил тяжести для спортивных целей. Предложил ускоряющиеся платформы-стадионы. Изобрел космическую олимпийскую карусель. Все шло ловко и гладко.

Но тут явился Маленький Принц и смешал карты.

Как это произошло?

Маленький Принц напомнил нечто очень важное: *центральность* сил тяготения. Земля притягивает к себе тела так, как если бы вся ее масса была сосредоточена в одной точке — в центре масс. И Солнце, и Луна, и любая планета, любая звезда. Потому-то и получился на планете Маленького Принца выпуклый стадион со строго одинаковым тяготением в разных точках. Да и на больших планетах, если уж быть пунктуально точным, стадионы со всюду равной тяжестью теоретически чуть-чуть выпуклы.

Однако никаким ускоренным движением невозможно создать в жесткой системе отсчета инерцию, обла-

дающую этим же свойством. Как ни хитри, этого не добьешься. Инерцией можно разбросать тела в разные стороны по *расходящимся* линиям (на карусели), можно заставить их лететь или давить в параллельных направлениях (на ускоряющихся платформах). Можно устраивать вогнутые и прямые стадионы — пожалуйста, сколько угодно. Но устремить инерционное давление по линиям, сходящимся к какому-то центру, нельзя. Ведь для создания центростремительного тяготения жесткая система отсчета должна сразу ускориться и «вперед», и «назад», и «вверх», и «вниз», и как угодно «вбок». Она должна вести себя по примеру ускоренно раздувающегося шара. Тела на таком стремительно растущем шаре станут не только давить «вниз», к центру, но и разбегаться в стороны. Но тогда он потеряет свою жесткость, разрушится, взорвется.

Между тем предметы на земной поверхности в стороны не разбегаются, Америка и Азия не рвутся в небеса, не разгоняются в противоположных направлениях.

Нет инерции, в точности повторяющей земное тяготение, — сразу все и надолго (раздувающийся ускоренно шар, правда, воспроизведет полное тяготение, существующее у земной поверхности, но лишь на бесконечно короткое время — пока его стремительно растущий радиус проскочит через величину, равную радиусу Земли).

Нет, значит, и инерции, которая ликвидировала бы земное тяготение — сразу все и надолго (падающий лифт, в котором пропадет все земное тяготение, должен охватывать планету и ускоренно лететь к ее центру, непрерывно сокращаясь в размерах, что не может, конечно, продлиться достаточно долго).

По этой причине буквально все наши примеры выглядят не вполне верными.

Та же Людмила, установи она безупречную параллельность отвесных линий, могла с уверенностью решить: я не на Земле. Потому что на Земле отвесные линии сходятся к центру планеты. Угол между ними не равен нулю.

Подобные измерения могли в принципе сделать и жуки-физики в мяче. А хладнокровный обитатель падающего лифта мог заметить странное поведение двух невесомых грузов, «неподвижно» парящих возле противоположных стенок кабины. По мере приближения лифта

к центру Земли эти грузы сближались бы. У самого центра они стукнулись бы друг о друга.

Словом, Маленький Принц поставил под сомнение столь заманчивую, столь восхитившую нас эквивалентность инерции и тяжести? Доказал, что тяготение, благодаря его центральности, нельзя свести к инерции?

И да и нет.

От шалого — к большому

Разумеется, Эйнштейн великолепно понимал возражения типа тех, что у нас прозвучали из уст Маленького Принца. Он понимал: выпуклый стадион с помощью инерции не устроишь. Сразу все, везде и надолго земное тяготение не устранишь падением. Он знал, что, вообще говоря, инерция и тяготение в старой, традиционной физике в любых масштабах не эквивалентны. И все-таки он провозгласил принцип эквивалентности!

Почему же? На каком основании? И для чего?

Отвечу сразу: ради создания новой физики, более общей и точной, чем прежняя.

Основания: все описанные выше мысленные и действительные опыты плюс оговорка, которую я раньше не приводил, ибо только теперь будет понятна ее важность. Оговорка такая: принцип эквивалентности инерции и тяготения справедлив для местных, или, по выражению Эйнштейна, локальных явлений.

Людмила в своей комнате на Цветном бульваре — явление сугубо местное. То, что где-то очень далеко, в шести тысячах километров над ней, есть центр тяжести планеты, не играло роли. Непараллельность отвесных линий зафиксировать опытом, может быть, и удастся (если эти линии отстоят в Людмилиной комнате на метр друг от друга, то угол между ними составит десятиллионную долю угловой минуты), но поправка эта не изменит качества явления. В структурах полей сил инерции и тяготения обнаруживается чисто математическое различие, которое никак не сказывается на физической сущности и действии возникающих сил.

Локальное явление — и падающий лифт, если его ширина нормальна (не шире Черного моря), шахта хоть и глубока, но не пронизывает насквозь планету, и

время падения не слишком велико. В обычном лифте, если он падает, тяжесть пропадает полностью. Принцип эквивалентности безусловно выполняется.

Даже крохотная планетка Маленького Принца (если она реальная, не сказочная) обязана создавать тяготение, строго согласное с принципом эквивалентности в достаточно малых, локальных масштабах. Малюсенький стадиончик (для футболистов-микробов) и на такой планетке будет иметь почти плоскую поверхность, а не выпуклую.

И его удастся в точности повторить, если воспользоваться услугами сил инерции.

Так всюду. Любое тяготение, несмотря на свою центральность, в локальных явлениях, в малых масштабах или коротких промежутках времени неотлично от инерции. Соответствующую «малость» всегда можно подобрать, она совсем не обязательно ничтожна, она может быть и весьма крупной.

Этот факт универсален. Исключений нет. Следовательно, принцип *локальной* эквивалентности инерции и тяготения не должен вызывать возражений у физиков. А это открывает великолепные возможности для исследований.

Вот что надо выяснить.

Раз силы инерции и тяжесть едины в малом, то как они соотносятся в большом? Не вносит ли это какой-либо новой, неведомой ранее ученым, черты в физику нашего мира?

Искать ответы — значит погрузиться в дебри общей теории относительности. Что мы сейчас, набравшись храбрости, и сделаем. Вооружимся терпимостью к варварским упрощениям и постараемся постичь хотя бы самую суть этой труднейшей теории.

Глава 19. НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ СТАДИОНЕ

Путевка в XXIII век

Любой современный читатель этой книжки, даже семидесятилетний старец (если таковой среди читателей найдется), может, в принципе, поспеть на сотую Олимпиаду, которая состоится, как я уже говорил, ле-

том 2292 года. Для этого не нужно погружаться в анабиоз, обретать бессмертие или фантастическое долголетие. Нужно только совершить некое путешествие. О том, что подобное теоретически возможно, помнит, вероятно, каждый, кто читал одиннадцатую главу. Через несколько страниц я обещаю вернуться к этой теме. А пока прошу вас вообразить себя счастливецом, заполучившим туристскую путевку на сотую Олимпиаду.

Итак, прозвучали фанфары, взлетели флаги. В открытом космосе вдали от планет вертится космическая карусель: один стадион на спице с противовесом кружит вокруг оси. Туристов, конечно, много, места для них мало, поэтому вся конструкция использована под трибуны. Скамейки всюду — и вокруг стадиона, и на спице, и на оси.

Теперь внимание.

Вы — болельщик. Сидите на скамье трибуны, которая укреплена на спице у самой оси. И кружите вокруг оси вместе со спицей.

Вам не очень удобно. Тяжести почти нет — вы ведь рядом с осью, и центробежная сила мала, ибо она зависит от радиуса вращения, а радиус этот для вас невелик. Далеко «под вами» прикреплен к той же оси олимпийский стадион, и вы смотрите на него в бинокль (или даже в телескоп).

Разумеется, вам хочется «вниз», на стадион — в привычную тяжесть, к полю. Но все близкие места заняты, и вам поневоле приходится обозревать игры издалека, с птичьего полета.

Еще одно (приятное) известие. Наш старый знакомый Клио, бывший космический пират, исправился, остепенился, обзавелся многочисленным семейством и тоже явился на Олимпиаду.

Он работает тут на должности механика, следит за исправным вращением стадиона и строгой неподвижностью оси. (Если ось будет шататься, на стадионе нарушится постоянство центробежной силы, создающей тяжесть, и состязания пойдут насмарку). Очень ответственное дело у старого Клио! Оно осложнено тем, что сооружение ни на чем не укреплено — витает в межпланетном пространстве.

Рабочее место Клио — на оси. А вы — на спице около оси. Поэтому он может переговариваться с вами,

сверять часы, делиться впечатлениями. В этой своеобразной обстановке вам и предстоит познакомиться с любопытными особенностями общей теории относительности.

Рекорд под вопросом

На стадионе — состязания спринтеров-землян. Судьи отметили рулеткой стометровку, сверили свои сверхточные секундомеры (все измерительные приспособления были заранее сравнены с эталонами из Всемирной палаты мер и весов). И вот — выстрел, старт, щелчки секундомеров. Рванулась восьмерка бегунов. И спустя несколько секунд — бурный финиш.

Судьи на стадионе единодушно фиксируют победу человекоподобного робота Клиотти. Это — внук Клио! Чемпион пробежал стометровку за семь и две миллионных секунды. Абсолютный мировой рекорд! Прежний рекорд, установленный на Земле, был чуть-чуть хуже.

На стадионе ликование. Победителя обнимают, качают.

Однако некоторые болельщики, наблюдавшие забег издали, с трибун у оси космической карусели, не согласны с оценкой судей. По их мнению, соревнование проведено неверно. Во-первых, дистанция бега отмечена с ошибкой — на ничтожную долю миллиметра короче ста метров. Во-вторых, время, за которое Клиотти пробежал дистанцию, на столь же крошечную часть секунды больше, чем заявили судьи. А раз так, то никакого абсолютного мирового рекорда нет. Клиотти, хоть и победил, но не вышел в абсолютные чемпионы.

Надо сказать, что болельщики, сидящие у оси, сделали свои оценки отнюдь не на глазок. Они располагали точнейшими угломерными инструментами, идеальными сверхсекундомерами. Вы, сидя рядом с ними, тщательно проверяли их измерения. Клио, находясь на оси, тоже проверял и сам все измерял. Точность оценок, таким образом, была гарантирована. С другой стороны, на стадионе измерения тоже были исполнены безукоризненно.

И вот шум, волнения. Болельщики с оси кричат: — Эй вы, там, внизу! Сапожники! На мыло!..

Судьи хранят олимпийское спокойствие, но поста-

ревший и поумневший Клио, обрадованный победой внука-чемпиона, возмущен:

— Самих вас на мыло! Не знаете теории относительности!..

И на этот раз Клио прав. Болельщики у оси напрасно нервничают. Несмотря на справедливость своих оценок, они зря обвиняют судей в ошибках. Никаких ошибок нет, рекорд установлен по всем правилам. А спор возник по прежней, уже традиционной для этой книжки, причине: не учтены особенности системы отсчета.

Реабилитация спринтера

При проектировании космической карусели обсуждались, быть может, два варианта ее конструкции. В первом предлагалось спицу жестко скрепить с осью (как в колесной паре железнодорожного вагона), чтобы ось вращалась вместе со спицей. Это удобно и просто. Однако по непонятным причинам был принят второй, менее удачный вариант — спица надета на ось свободно и кружит вокруг нее в подшипнике (вроде велосипедного колеса). Так и сделали карусель. И, запуская ее, ось установили неподвижной относительно звезд. (Как это устроили, я не знаю, но, допустим, устроили.)

Спица стала двигаться относительно оси и, следовательно, относительно звезд. Благодаря такой конструкции карусели Клио (тому, кто сидит на неподвижной оси) особенно ясна причина разногласий в оценке забега Клиотти. Ведь ось неподвижна, а стадион относительно нее движется. В любой достаточно малый отрезок времени можно считать, что стадион движется относительно оси равномерно и прямолинейно. Значит, Клио может вспомнить частную теорию относительности и учесть релятивистские эффекты. По его отсчету продольные (перпендикулярные к спице) длины стадиона будут короче, секунды же стадиона — дольше. Соответственно, дистанция забега Клиотти короче, длительность забега больше, чем для него самого и для окружающих его бдительных и пунктуальных судей.

К такого рода поправкам мы, кажется, уже привыкли с одиннадцатой главы.

Значит, для Клио разница в длинах и длительностях стадиона ясна.

Поэтому он знает, что в собственном времени и расстоянии стадиона Клиотти поставил-таки рекорд. Судьи правы.

Но как объяснить это вам и болельщикам, сидящим на спице? Вы ведь *неподвижны относительно стадиона*. Стадион и вы поконите в одной и той же жесткой системе отсчета. И тем не менее и вы и болельщики отметили те же самые изменения стадионного времени и стадионной длины, что и движущийся относительно стадиона Клио.

Почему?

Именно потому, что вертится космическая карусель. Именно потому, что движение стадиона не прямолинейное.

Публика, сидящая на спице рядом с осью, в каждый момент времени имеет меньшую скорость относительно оси, чем обитатели стадиона, укрепленного на самом конце спицы. Это понятно всем, кто хоть раз в жизни вертел пращу или закидывал удочку: конец лески с грузилом и крючком движется быстрее, чем ее начало, привязанное к удилищу.

А раз ваша скорость относительно оси мала, то и релятивистские эффекты относительно оси ничтожны. Во всяком случае, приближаясь по спице к оси, вы можете свести их на нет.

Вот резко утрированный пример. Стадион на 300-километровой спице делает 30 оборотов в секунду. Тогда он мчится относительно оси со скоростью 100 тысяч километров в секунду. Треть скорости света! Релятивистские эффекты стадиона с оси вполне заметны. А зритель, сидящий на спице в метре от оси, плетется относительно оси всего лишь со скоростью звука. И никаких релятивистских эффектов практически нет.

Словом, раз уж вы — болельщик, сидящий на спице у оси, то у вас метры такие же, как у Клио, и ваши секунды такие же, как у Клио. А поэтому ваша точка зрения и точка зрения Клио на метры и секунды стадиона практически совпадают. Если для него стадионные сантиметры укорачиваются, значит, и для вас тоже, если для него стадионные секунды удлиняются, значит, и для вас тоже.

Шаг через века

Сведениями, добытыми на сотой Олимпиаде, я пользуюсь, чтобы выполнить обещание, данное в начале этой главы,— объясню, каким способом вы, человек XX века, не стараясь, попали на Олимпийские игры в XXIII век.

Теоретически (и фантастически) для обгона столетий годится устройство, называемое *центробежной машиной времени*. Войдя в нее, погружаешься в замедленное время: сутки в машине равны году или столетию вне ее. Степень замедления зависит от настройки.

На пульте машины есть регулировочная ручка. Оператор ставит ее на цифру «2» — время внутри машины течет вдвое медленнее, чем снаружи. Поставил ручку на «1000» — время в машине замедлено в 1000 раз. Удобно и практично. Кроме того, на пульте размещены всевозможные экраны, кнопки, телефоны. Есть еще люки для передачи пищи тем, кто находится внутри. Пользоваться этими люками придется не часто: при времени, замедленном в тысячу раз, обитатель машины будет обедать раз в три года (это, разумеется, наши, внешние три года, которые для него, сидящего в машине, составят одни сутки).

Ну, снаружи мы машину оборудовали. А внутри она устроена еще проще. Ничего таинственного и нового.

Открываем двери. Входим. Видим внутри карусель. Да-да, опять карусель, но маленькая, сказочно сверхпрочная, способная крутиться с гигантским числом оборотов (что-нибудь порядка десятка миллионов в секунду). Или, если хотите, центрифуга — наподобие той, в которой тренируют космонавтов, только неизмеримо более быстрая.

Ручка регулировки темпа времени соединена с редуктором — чем быстрее вращение карусели, тем медленнее в ней течет время.

Действие машины понятно всем, кто внимательно прочитал предыдущие страницы. Время в ней тормозится по той же причине, по какой оно тормозилось, с точки зрения болельщиков у оси, на стадионе космической карусели. Вот и весь секрет.

Недавно физики устроили лабораторную модель центробежной машины времени — попросту вращаю-

щийся диск, вроде проигрывателя. И сумели зафиксировать растяжение секунд на движущемся крае диска. Получено подтверждение эйнштейновского предсказания даже при вращении со скоростью долгоиграющей пластинки. Каждая секунда края стала дольше секунды центра на миллионные доли от одной миллиардной доли.

Как проводятся столь тонкие опыты, я расскажу потом. А пока немножко огорчу вас: человеку путешествовать в будущее в таких машинах, к сожалению, не удастся. И вот почему.

Свежее желе

Заметное растяжение времени требует колоссальных оборотов центрифуги, а значит, гигантских центробежных сил, которые мгновенно превратят машину в пыль, а путешественника — в мокрое место.

В одном шутовском фантастическом рассказе приведен именно этот трагический случай: некий ученый, пожелавший самолично испытать сверхпрочную центробежную машину времени, был извлечен из нее в виде желе.

Все-таки испытание прошло небезуспешно: было доказано, что время в машине действительно замедлилось — от внешнего года до двух внутренних суток. Потому что выгруженное из машины желе оказалось абсолютно свежим.

Этот печальный исход ставит крест на центробежной машине времени как средстве человеческого путешествия в завтрашний день. Однако он не отвергает других способов прыжка в будущее. Наиболее безопасен сверхбыстрый космический полет с возвратом к месту старта.

Вспомните космонавток Аллу и Эллу из одиннадцатой главы. Они мчались друг относительно друга прямолинейно и равномерно, и для каждой другая старела медленнее. Но когда одна из космонавток (допустим, Алла) повернула ракету назад и догнала улетевшую подругу, именно *вернувшаяся* космонавтка оказалась моложе.

Этому факту теперь можно дать новое объяснение:

Алла совершила путешествие, подобное движению стадиона в космической карусели или желе в центробежной машине времени. А Элла, продолжавшая прямое движение, была в роли оператора машины или болельщика у оси космической карусели.

Благодаря гигантской относительной скорости полета время для Аллы замедлится очень заметно. Алла может оказаться моложе Эллы на год, на десять лет, на миллион лет и при этом останется жива и здорова. Подсчитано, например, что космонавт, вылетевший с Земли и пролетавший 40 лет (своих) с вполне терпимым ускорением $2g$, вернется на Землю через 10 000 земных лет! Правда, для подобного полета требуются неправдоподобные запасы топлива, но аналогичное путешествие на дистанцию в 300 лет выглядит более или менее допустимой фантазией.

А значит, вы, дорогой читатель, как раз таким способом и прилетели в 2292 год на сотую Олимпиаду.

Между тем там разворачиваются весьма любопытные события. Нам пора туда вернуться.

Глава 20. СЮРПРИЗЫ ИНЕРЦИИ

Когда погасли звезды

Потеряв надежду растолковать болельщикам релятивистские эффекты, механик Клио уходит с трибун, чтобы смазать ось олимпийской карусели. Кряхтя, тащит из кладовой канистру смазочного масла, выливает его в огромный подшипник.

Дело это трудоемкое. Клио устает, садится на пустую канистру и задумывается. Ему приходит в голову здравая идея — а зачем, собственно говоря, нужен этот подшипник? Разве нельзя обойтись без него? Это не мешает и смотреть игры и делать дистанционные оценки. Неважно ведь, сидит наблюдатель на оси или на спице рядом с осью — все равно события на стадионе воспринимаются им одинаково. Но тогда совсем не обязательно, чтобы спица двигалась относительно оси. Можно намертво закрепить ее. И не придется заботиться о подшипниках.

Сказано — сделано. Спица спаяна с осью (для этого

Клио, по обыкновению, применил свое огненное дыхание). Получился «железнодорожный» вариант карусели — более простой и удобный, тот, что резонно было устроить с самого начала.

В этой спокойной обстановке, располагающей к отдыху, Клио устраивается в кресле, вытягивает ноги...

Но вдруг, ради удобств популяризации, наступает очередное маловероятное событие — гаснут звезды.

Да-да, гаснут все звезды на небе. Наплыло облако космической пыли или что-нибудь в этом роде.

Это не очень-то приятно для механика. Это сбивает его с толку.

Кругом крошечная тьма, не видно ни зги. Пропало ощущение плавного вращения, которое только что создавалось поворотом сверкающей небесной сферы. Вместо вращения Клио чудится полный покой, незыблемая неподвижность. Он ведь скрепил ось со спицей, относительное движение их в подшипнике прекратилось, и к тому же исчезло перемещение небесных ориентиров — звезд. Словом, пропали внешние признаки, по которым можно доказать собственное движение.

И вот Клио приходит в голову тревожная мысль: а что, если и в самом деле карусель остановилась? Завязла в этом космическом облаке и потеряла вращение? Он, механик, должен быть готов к любым неожиданностям.

«Нет,— думает Клио,— этого не может быть. Случись такое — исчезла бы центробежная сила на стадионе, бегуны там стали бы невесомы и не смогли бы бегать». А игры, как он видит, идут своим чередом. Соревнования продолжаются. В ярком свете прожекторов спортсмены вообще не замечают нагрывшейся небесной темноты. Им не до звезд. Значит, невесомости на стадионе нет, все, видимо, в порядке.

Тем не менее Клио гложет червь сомнения. Возникает совсем уж неправдоподобное предположение: остановилась карусель, быть может, потому, что стадион притянулся к какой-нибудь планетке, к тяготеющей массе, и она создала «настоящую» тяжесть, подобную той, которая была сфабрикована вращением — центробежной силой инерции. Что и говорить, событие довольно нелепое. Но в этой досадной тьме Клио ничем не может доказать неверность изложенной гипотезы. А если

что-то подобное случилось, он это обязан знать — такая уж у него должность.

Как же быть? Неужели нет никакой возможности узнать, движется стадион или покоится в поле тяготения? Эти вопросы Клио задает вам, читателю и гостю сотой Олимпиады.

— Если верить эйнштейновскому принципу эквивалентности, задача безнадежна, — отвечаете вы. — Никаких признаков отличия существовать не должно.

— Вот оказия! — говорит Клио. — А может, его как-нибудь обойти, этот принцип?..

Наказание за кощунство

Растерянный и обескураженный, Клио старается вернуться из затруднительного положения. И в конце концов, как ему кажется, находит одну хитрость. «Те самые различия в отсчетах расстояния и времени, которые так разволновали публику на трибунах, — вот, — думает робот-механик, — признак вращения карусели». Ведь, как говорилось выше, это релятивистские эффекты, и вызваны они именно движением стадиона. Так ведь?

Объяснение кажется Клио убедительным и утешительным, потому что неучи-болельщики продолжают кричать и возмущаться (доносятся возгласы «Долой жуликов!», «Судьи подыгрывают землянам!»). Значит, и сейчас, во время новых забегов на стадионе, релятивистские эффекты налицо и, следовательно, стадион движется, карусель вращается. Чем не доказательство?!¹

Клио доволен. Он восхищен своей сообразительностью. И успокоен, уверен, что в наплывшей темноте с каруселью ничего не произошло. В пылу самодовольства он забывает, что допустил непозволительную вольность — кощунственно пренебрег эйнштейновским принципом эквивалентности инерции и тяготения.

Не мудрено, что хвастливое ликование длится недолго.

Облако космической пыли исчезает, снова зажи-

¹ Надо, пожалуй, еще раз извиниться перед читателями за пренебрежение силами инерции Кориолиса.

гаются звезды — и Клио, к своему ужасу, видит: они неподвижны! Карусель остановилась. И под стадионом торчит, как он и боялся, неведомо откуда взявшаяся злосчастная планетка, маленькая, да удаленькая — сверхплотная и создавшая поэтому достаточное тяготение на стадионе. И, следовательно, именно это «настоящее» тяготение вызвало на стадионе замедление времени и уменьшение расстояний. Так же, как раньше эти эффекты вызывало вращение карусели.

Как видите, принцип эквивалентности опять оказался справедливым — в масштабах стадиона поле сил инерции, вплоть до тончайших своих особенностей, повторено гравитационным полем. Не сумел хитрый Клио обойти Эйнштейна. Не сумел отличить вращение от покоя в условиях тяжести.

А все потому, что сей эпизодический персонаж, во-первых, остался личностью, склонной к нечестным манипуляциям, а во-вторых, знает теорию относительности только до того места этой книжки, в котором он очередной раз появляется.

Две морали

Принимаю как должное упреки в чрезмерной фантастичности и искусственности вышеизложенного мысленного эксперимента. Но зато из него следуют поучительные морали, с которыми, как мне кажется, теперь будет легко согласиться.

Первая мораль. Не только скорости, но и ускорения ведут к изменениям времени и пространства в движущихся системах отсчета (с точки зрения наблюдателей, движущихся иначе). Такова лодка вращающейся карусели. Центробежная сила все время ее сворачивает с прямого пути, отчего появляется центробежная сила инерции. Поэтому можно сказать короче: в поле инерционных сил происходит изменение времени и пространства.

Любопытно, что это следует только из частной теории относительности, которая, вообще говоря, применима лишь к системам отсчета, движущимся прямолинейно. Тем не менее вывод строг, его много раз приводил сам Эйнштейн.

И вторая мораль. Если инерция изменяет время и пространство, то, не желая повторять ошибки злополучного Клио, мы смело применяем принцип эквивалентности и сразу заключаем: тяготение тоже обязано изменять время и пространство. Раз, по принципу эквивалентности, сила инерции в локальных масштабах неотличима от тяжести, это должно касаться всех и всяческих проявлений инерционных и гравитационных сил. Тут уже действует общая теория относительности.

Конечно, у Эйнштейна на пути к этому удивительному заключению не было никаких спортивных и космических небылиц. Была строгая логика — сухая, трудная и, быть может, скучная для людей, мало склонных к предельно абстрактному мышлению. Было обобщение идей частной теории, соединение их с принципом эквивалентности, и в итоге родилось предсказание: в гравитационном поле время и пространство деформированы.

От локального и всеобщему

В поворотных местах популяризаторского сюжета этой книжки я следую доброй пословице: «Повторенье — мать ученья». На этом основании вкратце вспомним логическую цепочку предыдущих глав.

В малых масштабах подмечена неразличимость инерции и тяжести (Людмила, обманутая Черномором, и т. д.). Отсюда провозглашен принцип эквивалентности инерции и тяготения. Далее выяснено, что в поле сил инерции происходит деформация времени и пространства (споры болельщиков на сотой Олимпиаде). По принципу эквивалентности последовал вывод: в поле тяжести тоже происходит деформация времени и пространства (казус с механиком Клио).

Так сделан немаловажный шаг — отыскан физический признак, присущий в равной мере силам инерции и тяготению: тут и там для внешнего наблюдателя неизбежно изменение времени и пространства.

Пока это заключение законно только в локальных масштабах, где безоговорочно справедлив принцип эквивалентности, то есть для ограниченных объемов или малых промежутков времени (вспомните возражение Маленького Принца). Для планеты в целом

такой вывод сделать нельзя, потому что Земля имеет центр масс. Полное земное тяготение, благодаря его центральности, сразу везде и надолго невозможно повторить неинерциальным движением или, наоборот, уничтожить его свободным падением системы.

Вышеизложенное известно из предыдущих глав.

А вот новое.

Выдвигается гипотеза: раз в локальных, местных явлениях тяготение, сведенное к инерции, изменяет пространство и время, то и в крупных масштабах, где сведение невозможно, должна тем не менее происходить какая-то деформация пространства и времени.

Гипотеза эта напрашивается сама собой. Ведь полное тяготение Земли складывается из сил тяготения, исходящих от ее маленьких частей. В каждой части пространство и время изменяются, значит, и во всех частях вместе — тоже.

Из сугубо локальных явлений извлечено, таким образом, заключение совершенно универсальное: наша планета всей своей массой деформирует пространство и время.

И Солнце, и любая звезда, и любая галактика.

Всякая масса вещества обязана обладать поразительной способностью — способностью *искривлять мир*.

Что же это такое — искривлять мир?

Дабы легче постичь это, еще раз сосредоточьтесь и следующие три главы прочтите с усиленным вниманием.

Глава 21. ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ

Кривые дрова

Геометрия — самая древняя в обширной семье математических наук. И чуть ли не самая мудрая. Учителя единодушно признают ее лучшим пробным камнем математических способностей — она очень глубока по мысли, изящна, безупречно стройна.

Юный Эйнштейн, когда ему в руки попала тоненькая геометрическая книжечка, был восхищенно удивлен открывшимся волшебством логического творчества: шаг за шагом из простейших постулатов вырастала

гармония лемм и теорем, все более запутанных, тонких, подчас неожиданных. Великий физик назвал эту книжечку в числе отправных пунктов своего марафонского бега от удивлений.

Да, геометрия достойна высших похвал. Может быть, даже поэм и од.

Жаль, что их, кажется, еще не успели сочинить.

Зато на геометрические темы придумано порядочно поговорок и пословиц. Есть даже анекдоты.

Мне почему-то страшно нравится тот, где некий машинист на паровозе кричит кочегару:

— Эй, кочегар, кидай в топку кривые дрова! Въезжаем на поворот!

Эти фразы радуют своим несказанным идиотизмом.

Между тем изощренный физик-теоретик сумеет дать им кое-какое разумное истолкование. Чтобы уяснить это, нам придется заглянуть в геометрические первоосновы. Заодно мы поймем, что такое кривизна пространства.

Ножницы, глобуо, оедло

Вот вопрос: «прямое» и «кривое» — как отличить одно от другого? И что такое вообще *кривизна* и *прямизна*?

Прямой хочется назвать линию, которая проложена по кратчайшему расстоянию между двумя точками, а кривой — ту, что обходит прямую. Не зря ведь говорят: «объехать по кривой». Поэтому понятие *прямизны* тесно связано с понятием расстояния.

Теперь поймите главное: никакое расстояние не существует само по себе. Оно всегда отмеривается по чему-то конкретному — по дороге, по тетрадной странице или горному склону, либо, скажем, по световому лучу или по веревке, туго натянутой в пустоте.

Геометры говорят абстрактно и обобщенно: расстояния отмериваются по линиям, по поверхностям, в пространстве. Физики, соглашаясь с геометрами, помнят, однако, что все эти геометрические термины отражают реальные свойства нашего мира.

Кроме того, физик вкладывает свое определенное содержание в слово «отмеривать». Он помнит, что лю-

бое измерение требует не только математической корректности. Необходимы еще соответствующие приборы — линейки и часы.

Да, именно часы — ведь никакое измерение нельзя даже мысленно исполнить мгновенно, это мы с вами хорошо уяснили в десятой главе, когда рассуждали о предельности скорости света и других особенностях эйнштейновского толкования природы.

Таким образом, определение расстояний, как и всякий измерительный процесс, — совершенно очевидное физическое исследование. Тут геометрия зримо оборачивается физикой, физикой пространственных движений.

Пока, впрочем, забудем о часах. Допустим, что мы умеем измерять длины мгновенно. Это разрешено в физике медленных по сравнению со светом движений, в физике Ньютона. И поставим первую простенькую задачу.

Пусть даны две точки A и B — концы разведенных и крепко свинченных ножниц. И пусть расстояние между ними нужно определить по поверхности. Сразу задаем вопрос: по какой поверхности?

Ну, сперва по шаровой.

Хорошо. Подставим под ножницы глобус. Кратчайшее расстояние на его сфере физик проведет вдоль нити, натянутой между A и B по шаровой поверхности. Оно отмеряется, очевидно, не прямой линией, а кривой — дугой большого круга.

Далее. Посадим наши точки на какую-нибудь седловидную поверхность. Расстояние, проложенное туго натянутой ниткой, будет пройдено по другой кривой линии — гиперболе.

Если же концы ножниц приложить к поверхности письменного стола, то расстояние между ними отмерится по линии, которую мы привыкли называть прямой.

Вот, кажется, добрались до прямизны. Срезав ножом седло или шар, получаем поверхности, в которых линии кратчайших расстояний — наикратчайшие. Так как будто?

Но можно ли быть абсолютно уверенным, что линия на столе абсолютно прямая? И что сам стол плоский?

Кажется, вопросы надуманные. Кажется, плоскость потому и плоскость, что она прямее всех поверхностей.

В действительности дело обстоит сложнее. Все за-

висит от пространства, в котором стоит наш стол. Само пространство, с точки зрения геометра, вправе быть искривленным. И в конечном счете именно от кривизны пространства зависят кратчайшие расстояния.

Я—блин

Для новичка это очень странные слова — «кривизна пространства». Чтобы привыкнуть к ним, ответим сначала на несколько риторических вопросов.

Как мы узнали, что глобус круглый?

Посмотрели на него со стороны, из окружающего пространства.

Как мы узнали, что классная доска прямая?

Взглянули на нее откуда-то сбоку, опять-таки из окружающего пространства.

А как узнать, прямое ли само пространство?

И на пространство «поглядеть сбоку»? Но это невозможно. Нельзя покинуть пространство, выйти из него, как из дома, чтобы полюбоваться на него издали. Как ни убегай из него, все равно останешься в нем же.

Выходит, нет способов определить, кривое пространство или прямое?

Попробуем все же поискать их. Попробуем исследовать пространство изнутри, не выходя из него. Но не сразу.

Я сперва расскажу, как решается аналогичная задача для поверхности: постараюсь узнать, какова поверхность, не глядя на нее «сбоку», а находясь непосредственно на ней.

Ради наглядности я готов «разбиться в лепешку». Буквально так.

Смотрите: я полностью теряю свой рост, объем, превращаюсь в бесконечно тонкий блин и оказываюсь либо на сфере, либо на седле, либо на плоскости — сам не знаю где.

В качестве этого поверхностного новосела я получаю от вас задание: не сходя с поверхности, определить, какова она.

Условия задания. Сперва — затрудняющие.

Допускается, что я — маленький блин, а поверхность большая, причем в сколь угодно малых участках она

сколь угодно мало отличается от плоскости. Кроме того, я близорук, а потому могу обследовать, не сдвигаясь с места, только ближайшие участки поверхности. И вижу лишь то, что находится на ней.

А вот условия, облегчающие решение.

Ползать по поверхности мне разрешено, и сколь угодно далеко. Наконец, считается, что я разумный блин. Умею рассуждать и чертить геометрические фигуры.

Что же мне, блину, делать?

А вот что.

Пересечение параллельных

Я намечаю на поверхности две точки — A и B . Соединяю их туго натянутой, но не отделяющейся от поверхности ниткой. По этой нитке провожу линию. И называю ее прямой.

Основания для такого названия у меня есть: во-первых, линия идет по кратчайшему расстоянию между A и B , а во-вторых, из-за сугубой близорукости я вижу вокруг себя плоские участки поверхности. Это, естественно, наводит меня на предположение, что и вся она плоская.

Затем я ставлю на поверхности произвольную точку C , не лежащую на прямой AB , и пытаюсь провести через нее прямые линии, которые нигде не пересекутся с моей первоначальной прямой.

Я усердно работаю. Ползаю туда-сюда, тяну нитки, провожу линии. В конце концов построение закончено. И я прихожу к одному из трех выводов:

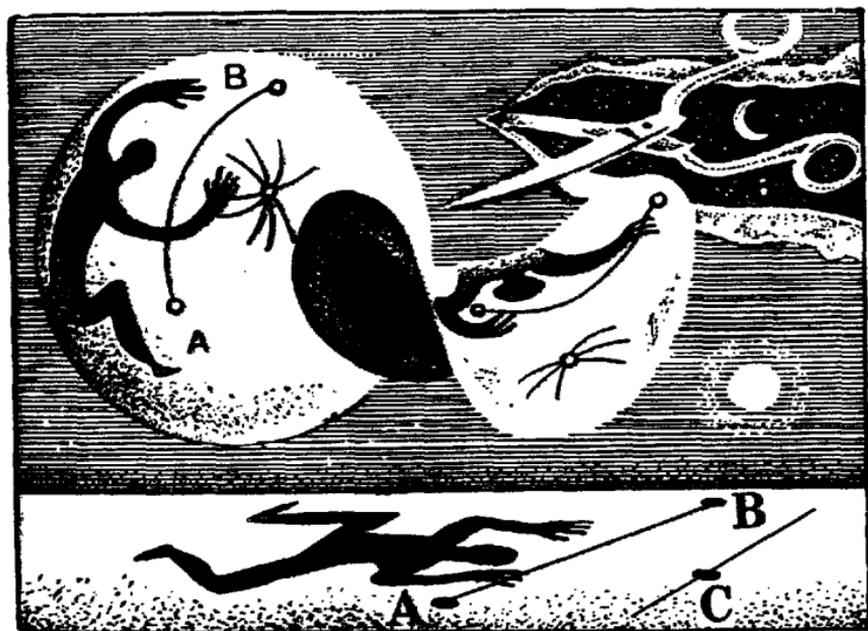
1) Через точку C проходит только одна прямая линия, не пересекающаяся с AB .

2) Удастся построить сколько угодно таких линий (прямейших, но не прямых).

3) Нет ни одной прямейшей линии, которая, проходя через C , не пересекалась бы с AB .

В первом случае моя поверхность — наверняка плоскость. Во втором — седло или какой-нибудь граммофонный раструб. В третьем — сфера либо что-нибудь вроде яичной скорлупы.

Вот смотрите сами:



При взгляде «со стороны» лишь для плоскости оправдалось как будто название «прямая» в применении к кратчайшей линии. На непрямых же поверхностях кратчайшие расстояния отмерились по кривым. Вслед за геометрами я называю их *геодезическими* (сюда относятся, например, экватор и меридианы глобуса, а параллели не относятся: не по ним отмериваются на земном шаре кратчайшие расстояния).

Что такое штрика

Я все еще блин. Побывал на сфере и седле, теперь переведен на плоскость. Хлопочу о возврате высоты и объема, но пока безуспешно. И от нечего делать занимаюсь геометрией. Это тем более любопытно, что мне на плоскость прислали два отличных инструмента — транспортир и мерную рулетку. Могу измерять длины и углы (по-прежнему — мгновенно, то есть в рамках классической физики).

Отправной пункт моих рассуждений — тот самый постулат о единственности прямой, не пересекающейся с данной прямой, по которому без всяких доказательств устанавливается, что поверхность — плоскость. В дав-



ние времена великий греческий геометр Евклид вывел из этого постулата всю геометрию плоскости — планиметрию.

Следом за Евклидом я строю углы, треугольники, квадраты, делаю всевозможные отсчеты, доказываю теоремы. Постепенно я убеждаюсь, что на плоскости действует строгая система правил измерения расстояний. Геометры называют эти правила *метрикой*.

Метрические теоремы — не новинка для любого восьмиклассника. Главная из них — теорема Пифагора, знаменитые в поколениях школяров всех стран и наций «пифагоровы штаны». Теорема утверждает: в прямоугольном треугольнике сумма квадратов меньших сторон (катетов a и b) обязательно равна квадрату большей стороны (гипотенузы S): .

$$S^2 = a^2 + b^2$$

Я, блин, горжусь, что сумел процитировать эту формулу по памяти, не заглядывая в учебник.

Кроме теоремы Пифагора, предметом моей гордости служит доказательство еще одного важного утвержде-

ния из школьной программы: в любом треугольнике сумма углов строго равна двум прямым. Ни больше ни меньше. Надеюсь, и эту теорему вы не забыли.

Примером „пифагоровы штаны“

Один рассеянный ученик по ошибке принес на урок геометрии вместо тетради футбольный мяч. Пришлось ему на мяче чертить всевозможные чертежи. Но вышла незадача: углы треугольников никак не складывались в два прямых. Выходило больше. А когда задали задачу на теорему Пифагора, ученик-футболист аккуратно составил из геодезических линий прямоугольный треугольник, измерил стороны, сложил квадраты катетов — и получилось больше, чем квадрат гипотенузы! «Пифагоровы штаны» оказались велики для футбольного мяча.

Примечательный случай произошел также с одним бравым ковбоем. Он воспылал симпатией к геометрии, но вместо тетради делал построения на лошадином седле. Тут сумма углов треугольника получилась меньше двух прямых, сумма же квадратов катетов — меньше квадрата гипотенузы. На седло «пифагоровы штаны» не натянулись. Они для седла малы.

Почему же? Разве теорема Пифагора не везде справедлива? И теорема о сумме углов треугольника тоже не универсальна?

Да, это так. Метрические правила неодинаковы на поверхностях разной кривизны. Они ведь выводятся из первоначального постулата о пересечении геодезических линий. На сфере, на седле, на плоскости эти линии пересекаются по-разному — отсюда разные суммы углов треугольников и усложненные (геометры говорят — обобщенные) варианты теоремы Пифагора.

Разгадка поверхности

На плоскости — проще всего. Там все точно по Евклиду. А поэтому строгое соблюдение школьных теорем — верный признак плоскости. Какие треугольники ни строй, всегда сумма углов равна двум прямым.

Какие прямоугольные треугольники ни приставляй к расстоянию, всегда соблюдается равенство квадрата гипотенузы сумме квадратов катетов.

Жаль, что, будучи блином, я сразу не захватил с собой рулетку и транспортир. Имея их, я не возился бы с пересечением геодезических, когда определял, какова моя поверхность. Не ползал бы, не уставал. Начертил бы треугольник, посчитал бы сумму углов, вышло два прямых — значит, моя поверхность плоская. Или сделал бы проверку по теореме Пифагора. Совпала сумма квадратов катетов с квадратом гипотенузы — есть доказательство плоскости.

Будь моя поверхность неплоская, вышло бы как у геометра-футболиста и геометра-ковбоя. Сумма квадратов катетов больше квадрата гипотенузы («пифагоровы штаны» велики) — значит, я на шаре. Сумма квадратов катетов меньше квадрата гипотенузы («пифагоровы штаны» малы) — значит, я на седле. Аналогично с суммой углов треугольника. Больше она двух прямых — треугольник начерчен на сфере, меньше — на седле.

Надеюсь, сказанное до сих пор не внушило вам недоверия. Пока шли разговоры о поверхностях, ничуть не удивительно, что их кривизна связана с метрикой. Это — как резиновая игрушка «уйди-уйди». Вообразите, что тетрадная страничка с геометрическими чертежами тоже резиновая, раздуйте ее в пузырь, натяните на седло или бублик — размеры углов и длин на чертежах тотчас станут другими. Ничего странного¹.

Но через эти простые вещи мы с вами подходим к неизбежности труднейшего логического скачка — с кривой поверхности в кривое пространство. К определению его кривизны изнутри, без оценок «со стороны».

¹ Мимоходом стоит заметить, что любую поверхность можно деформировать и без изменения законов пересечения геодезических линий, а значит, без изменений метрики. Сложите тетрадный лист, скомкайте его, сверните в трубочку — во всех чертежах расстояния и углы останутся прежними. Чтобы «изнутри» отличить цилиндр от плоскости, потребуются другие соображения. Например, на цилиндре любая геодезическая (кроме образующей) замкнута — либо эллипс, либо круг. Об этой тонкости не надо забывать, но она — лишь частный случай.

Глава 22. ВДОЛЬ ПРОСТРАНСТВА

От окна до киоска

Я уже не блин. Мне возвращена высота. Я покинул мир тесных, бесконечно тонких площадей, живу, как и вы, в объеме, в глубоком, раздольном пространстве. Хорошо! Есть где развернуться! Можно не только ползать, но и прыгать и летать. Это очень приятно.

Но мне не до развлечений. В бытность блином я привык непрерывно исследовать кривизну своего мира, и теперь меня тянет заняться тем же в пространстве.

Прежде всего я намереваюсь придумать способ облачения пустоты в «пифагоровы штаны» и примерки к ней «треугольной шляпы».

Как это сделать?

Вот легонькая задачка из школьной стереометрии.

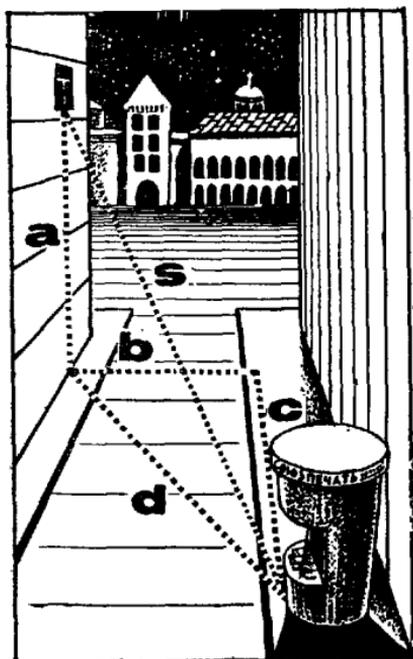
От моего окна (на пятом этаже) до газетного киоска на противоположной стороне улицы «напрямую» S метров. По тротуару от моего дома s метров, b — ширина улицы, a — высоты моего окна. Требуется найти S , не мешая уличному движению — не протягивая из окна к киоску туго натянутой веревки, а вычислив это расстояние через a , b и s .

Решение simplest: считаем, что стена дома составляет прямой угол с поверхностью тротуара, что переход через улицу перпендикулярен к ней самой, пренебрегаем кривизной земной поверхности и дважды применяем теорему Пифагора. Так добываем формулу:

$$S^2 = a^2 + b^2 + s^2.$$

Вышло очень похоже на теорему Пифагора, но уже не для плоскости, а для пространства. Для кратчайшего расстояния S , прокладываемого «через пустоту».

Разумеется, a , b и s можно менять, можно строить около расстояния S самые разнообразные прямоугольные треугольники. И по традиционной школьной геометрии квадрат расстояния во всех случаях будет равен сумме квадратов его трех взаимно перпендикулярных координатных отсчетов. Поэтому выражение теоремы Пифагора считается *главным* инвариантом евклидовой геометрии.



Очень хорошо. От метрики плоскости мы шагнули к метрике пространства. Но вот существенная тонкость.

Наше решение выглядит непогрешимым и единственно возможным. Однако оно предполагает самоочевидное, как кажется, условие: в пространстве существуют плоскости. Именно поэтому мы считали себя вправе дважды применить плоскую теорему Пифагора (она, как говорилось, годится в этом простейшем виде лишь для плоскостей).

На том же условии нетрудно доказать и другую теорему — о том, что не только в плоских, но и про-

странственных треугольниках сумма углов составляет два прямых. Раз уж, согласно Евклиду, через любые три точки пространства можно провести плоскость, то и любой пространственный треугольник обязан быть плоским. Но так ли обстоит дело в действительности? Будут ли в пору «прямые» штаны и «прямая» шляпа реальному пространству?

Что ж, из всего этого следует как будто немудрящий рецепт облачения пустоты в «пифагоровы штаны» и «треугольную шляпу». Надо проделать измерения длин и углов в реальных пространственных треугольниках. И таким способом «испытать пространство на кривизну».

Облачение пустоты

Ночью, чтобы не мешать уличному движению, я протягиваю веревку из своего окна к далекому киоску. Тщательно измеряю расстояние S . Столь же точно измеряю длины a , b и c . Возвожу их в квадрат, складываю, сравниваю. Вышло подтверждение формулы

$\sum^2 = a^2 + b^2 + c^2$ — значит, в пространстве можно провести плоскости и прямые, значит, пространство *плоское*, евклидово.

Или так. Еду на Кавказ. Стягиваю тугими канатами три горные вершины. Измеряю в этом треугольнике углы, складываю их. Получилось в сумме два прямых — есть еще одно доказательство того, что пространство *плоское*.

Ну, а если эти эксперименты приведут к другим результатам? Если S^2 не совпадет с $a^2 + b^2 + c^2$? И сумма углов кавказского треугольника не даст двух прямых? Очень нелегко, очень непривычно допустить подобное. Разум упрямо противится даже мысленно позволить столь странный итог пространственных измерений.

Однако вопреки протестам интуиции заставим себя вообразить, что расхождения все-таки обнаружились. Что это может значить?

Когда подобное случалось на поверхности, вывод был очевиден: поверхность имеет кривизну. А когда нарушения традиционной теоремы Пифагора объявятся в пустоте, резонно будет сказать, что это доказывает кривизну пространства. Прежде, будучи блином, я с помощью метрических теорем определял, какова моя поверхность, не сходя с нее. Теперь, став объемным геометром, я хочу совершенно аналогичным способом узнать, каково пространство: насколько и как оно искривлено. И снова — не выходя из него!

На сфере или седле я не мог построить плоскость и провести идеальную прямую линию. Вместо нее у меня выходили геодезические линии — прямейшие, но не прямые. Именно по ним шли кратчайшие расстояния между точками. Подобно этому, в кривом пространстве я не могу построить ни идеальной прямой, ни идеальной плоскости. Вместо плоскостей проведутся поверхности минимальной кривизны, а вместо прямых опять появятся геодезические линии — прямейшие, но не прямые. Однако изнутри, из пространства, непосредственно увидеть искривление его невозможно, потому что тамошние жители сделают кривыми все свои линейки и другие эталоны прямизны — подгонят их к располагающимся по геодезическим линиям световым лучам, натянутым нитям, путям инерционного полета тел, не подвержен-

ных действию сил, и т. д. Поверхности минимальной кривизны будут выглядеть плоскостями. Только исследования параллельных линий да метрические эксперименты помогут определить эту странную, почти невообразимую кривизну пустоты.

Трудновато? Да, нелегко.

Геометрическая возможность неевклидового пространства была неожиданным открытием науки XIX века.

Это открытие, сделанное в 1825 году, принадлежит гениальному русскому математику Николаю Ивановичу Лобачевскому.

Два варианта кривизны

Итак, мы с вами добрались до кривого пространства. Научились, кажется, устанавливать изнутри его сам факт кривизны: об этом может свидетельствовать нарушение евклидовых метрических теорем.

Геометры идут дальше: они умеют предсказывать, как именно изменится теорема Пифагора и сумма углов треугольника в пространствах, искривленных по-разному. Рассуждения похожи на те, что я вел, будучи блином на неизвестной поверхности. Например, если $a^2 + b^2 + c^2$ меньше, чем S^2 , а сумма углов треугольника меньше двух прямых («пифагоровы штаны» и «треугольная шляпа» для пустоты «малы»), то пространство *гиперболическое*. Вместо плоскостей в нем седловидные поверхности, вместо прямых — гиперболы. Этот вариант неевклидовой геометрии и был разработан Лобачевским.

Другая геометрическая система, развитая замечательным немецким математиком Георгом Риманом, получится, если $a^2 + b^2 + c^2$ выйдет больше, чем S^2 , а сумма углов треугольника превысит два прямых. Эта геометрия называется *эллиптической*. В ней вместо плоскостей — поверхности вроде яичной скорлупы или мяча, вместо прямых — дуги больших эллипсов или, соответственно, больших кругов.

Позволю себе повторить еще раз: в плавно искривленном пространстве все геодезические линии представляются прямыми. «Истинных» же прямых там нет, их

невозможно провести. Любая неизбежно согнется, как обязательно согнется нить, натянутая по сфере. Причем, если пространство искривлено неравномерно, в разных местах по-разному, то и прямейшие геодезические линии в разных точках согнутся неодинаково. При движении вдоль геодезической ее «волнистость», конечно, незаметна. Всюду эта линия выглядит одинаково прямоухонькой. Однако стоит испытать в разных местах метрические правила, как обнаружатся изменения, отклонения от привычной евклидовой «нормы».

Короче говоря, в неравномерно-неевклидовом пространстве от точки к точке меняется метрика, приемы определения расстояний. Меняется теорема Пифагора. В общем виде простая формула ее заменяется более сложной, включающей величины, которые характеризуют кривизну пространства в разных его местах. И, как следствие, в разных местах такого пространства оказываются разными длины предметов, кратчайшие расстояния между точками.

Вот такие чудеса допускают геометры в неевклидовом пространстве!

Сфера Пуанкаре

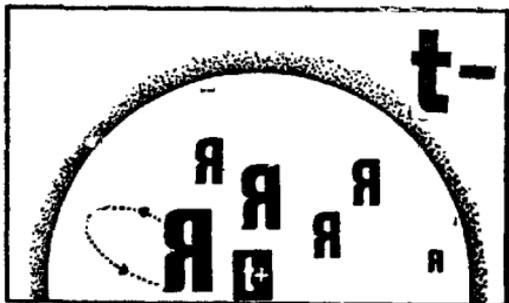
Еще диковина: некоторые неевклидовы пространства могут быть конечными, хоть и безграничными. Расстояния там не превышают некоего определенного значения и, соответственно, не могут существовать сколь угодно большие объемы.

Подобно тому, как яйцо или мяч обладают безграничной поверхностью, но ограниченной площадью, эллиптическое пространство не имеет грани и тем не менее имеет конечный объем. Искривляясь, оно как бы замыкается на себя!

Странно? Очень.

Но все же доступно наглядному моделированию.

Французский математик Анри Пуанкаре.



один из предшественников Эйнштейна, ухитрился придумать любопытную модель замкнутого сферического пространства. Вот что он советует вообразить.

В шаровом сосуде находится некая среда, в которой плавают предметы и существа, наделенные весьма фантастическими свойствами. При охлаждении и среда и предметы абсолютно одинаково сжимаются, причем при нуле градусов обращаются в точки. Кроме того, световые лучи в этой среде преломляются тем сильнее, чем ниже температура. Шар снаружи заморожен до нуля градусов. А изнутри, из центра, разогрет. И от центра к периферии температура плавно снижается. Еще условие: существо в шаре не должно ощущать перемен температуры. Ему всегда «не жарко, не холодно». Вот и все.

По вашей командировке я обретаю указанные свойства, переселяюсь в шар Пуанкаре (пусть висящий где-то в космосе, в невесомости) и, допустим, обитаю в нем в полном одиночестве. Тем не менее я замечаю вокруг множество человеческих фигур. Всюду я вижу себя и только себя — и впереди, и сзади, и со всех сторон. Световые лучи идут замкнутыми путями. Приближаясь к краям шара, они, плавно преломляясь, заворачивают внутрь, так что эти края невозможно увидеть, даже находясь совсем рядом с ними. Завернув, лучи возвращаются туда, откуда вышли. Вот и получается, что передо мной — моя спина, надо мной — подошвы моих ног, подо мной — моя макушка. Стреляя вперед из светового пистолета, я, если захочу, попаду в собственный затылок.

Разумеется, луч представляется мне прямым. Считая его эталоном прямизны, я не замечаю кривизны своего пространства. Ее нельзя обнаружить и движением: шагая вдоль луча, я открываю лишь существование предельно большого расстояния, так как вскоре возвращаюсь к месту старта. Стенки шара мне совершенно недоступны. Когда я подхожу к ним, то сжимаюсь вместе с окружающей средой, и одновременно сжимаются все расстояния вокруг меня, все длины, все высоты. В любой точке шара я не замечаю изменения своих размеров. Поэтому всюду я воспринимаю окружающее пространство так, будто нахожусь в его центре. И не вижу нигде никаких границ своего малень-

кого мирка. Он конечен по объему, но для меня безграничен. Очень красивая модель!

Как это ни парадоксально, шар Пуанкаре, быть может, кое в чем схож с нашей необозримой Вселенной. Но об этом потом.

Обруч и рельс

Полагаю, мы с вами уже созрели для геометрического истолкования анекдота о кривых дровах. Очень просто: если паровоз въезжает из плоского евклидова пространства в любое неевклидово, то прямые дрова автоматически превращаются в кривые.

Наоборот, если паровоз шел в неевклидовом пространстве и дрова в нем, по мнению машиниста и кочегара, были прямыми, то при въезде в евклидово пространство они искривятся.

Кривизна и прямизна предстают перед нами свойствами не абсолютными, а относительными! Каждое из них зависит от точки зрения, от договоренности, продиктованной, правда, не свободным произволом, а геометрическими свойствами пространства. Вообразив, что пространства разной кривизны вложены друг в друга и из одного можно наблюдать другое, относительность кривизны удастся представить вполне наглядно.

Допустим, например, такой случай. Изготавливая шар Пуанкаре, я вмонтировал в него резиновое кольцо. В евклидовом пространстве это кольцо мне представляется безусловно кривым. Но в шаре Пуанкаре оно может стать прямейшим, если вдоль него пойдет луч света. Вместе с тем железнодорожный рельс, для меня прямой как стрела, в сферическом пространстве станет дугой — ведь «прямой» для обитателя шара Пуанкаре световой луч от рельса отклонится. Удивляйтесь, если не устали!

Такова в самых примитивных чертах неевклидова геометрия. Заканчивая беседу о ней, я должен сообщить вам нечто важное и несколько обескураживающее.

Как вы наверняка догадываетесь, описанные в этой главе геометрические странности имеют непосредственное отношение к общей теории относительности, к тяготению, к инерции, в конечном счете — ко все еще не разгаданной нами до конца загадке падения тел, действию тяжести через пустоту.

Это действительно так. Но связь, к сожалению, далеко не столь проста, как хотелось бы любителям легкого бегства от удивлений. Приготовьтесь к разочарованию. Все, буквально все только что изложенные геометрические рассуждения и примеры в мире Эйнштейна не имеют ни грана физического смысла. Ибо с самого начала этой главы мы с вами разрешили себе непопозволительную идеализацию истинного положения вещей — признали возможность мгновенного измерения расстояний. Отсюда выросла физическая небылица: пространство, не зависящее от времени.

На самом деле ничего мгновенного в природе не бывает. Измерения расстояний кроме линеек требуют еще и часов. И строгого соблюдения не только геометрических, но и чисто физических правил, говорящих, в частности, о том, что пространство вообще не может существовать вне времени. В реальном мире пространство и время неразделимы.

Как велики последствия этого, вы скоро поймете.

Глава 23. ВДОЛЬ МИРА

О пользе чпототы

В начале двадцать первой главы я пропел панегирик геометрии. Потом долго втолковывал вам всякие странные геометрические идеи, а затем объявил, что они лишены физического смысла. Получилось вроде бы не очень последовательно. Зачем же понадобились эти разговоры?

Дело в том, что сама по себе геометрия, как и любая чисто математическая наука, слишком абстрактна, слишком узка, чтобы служить надежным зеркалом природы. За гармонией линий, за сплетением идеальных фигур, за сложной очередью посылок и следствий она склонна не замечать настоящего мира. С давних пор создавалась эта рафинированная, очищенная от реальности, всеядная, применимая к чему угодно символическая логика. Чистой математике все равно, что считать. Лишь бы считать.

Шли века, и геометрия развивалась двумя путями. С одной стороны, теснее и теснее сближалась с практи-

кой, училась виртуозности в решении практических задач. Но одновременно все дальше уходила от действительности, все глубже погружалась в мир математических грез. Именно на этом пути она отыскивала неевклидовы пространства.

Я думаю, так будет всегда. Несколько утрируя и упрощая, можно сказать: академически-изысканный геометр-теоретик никогда не заинтересуется вплотную физической подоплекой своих построений. Главное для него — чтобы открывались новые и новые логические шаги, чтобы неизменно соблюдалась твердокаменная строгость, ветвилось дерево безупречно точных, растущих друг из друга абстракций.

Хорошо это или плохо? Великолепно! Ведь это полное освобождение математической мысли, широчайший простор для логики, труднейшая тренировка и строжайший экзамен человеческому уму.

Но ведь логична не только математика. Природа тоже логична. Во всем, всегда и весьма строго логична. Вот почему поиски «чистых» математиков просто не могут быть бесполезными для естествознания. Рано или поздно абстрактнейшие математические упражнения становятся источником находок, драгоценных для естествоиспытателей. Стало законом: любая новая физическая теория опирается на заранее открытый, предварительно подготовленный математический аппарат. «Чистые» математики стараются не зря.

Это в полной мере касается общей теории относительности. Ее фундамент — дополненное, одухотворенное физикой учение о неевклидовых искривленных пространствах, то самое, что было основано гением математиков за девяносто лет (!) до первых догадок Эйнштейна.

Эксперимент Гаусса

Полезно проследить, как от физической небылицы неевклидова геометрия поднялась до почетной персоны, олицетворяющей остов реального мира.

История эта началась в середине прошлого века, когда идеи о кривизне пространства стали постепенно проникать в научное сознание. Одновременно с Лобачевским их проводником был талантливый венгр Янош

Большой, затем — немец Георг Риман. Маститые коллеги скептически, а то и иронически относились к их трудам. Кривизна прямейших линий представлялась совершенно беспочвенной фантазией, фикцией, измышлением, чрезмерно абстрактным даже для чистой математики.

Все-таки семя было брошено. И начало давать ростки. Мало-помалу привыкая к парадоксальной геометрической гипотезе, ученые закономерно пришли к мысли: а не проверить ли ее? Не откроется ли в большом то, что незаметно в малом?

Так родился замысел физико-геометрического эксперимента вроде того, о котором я уже упоминал в предыдущей главе, во время популяризаторского галопа в неевклидовом пространстве: измерить сумму углов какого-нибудь гигантского треугольника.

Карл Фридрих Гаусс, знаменитый немецкий математик, предпринял ради этого обширную геодезическую экспедицию. Световым лучом были связаны три горы — Брокен, Высокий Хаген и Инзельберг. Горные вершины стали геометрическими вершинами треугольника. Тщательные измерения его углов дали в сумме традиционные евклидовы два прямых — как и на классной доске. Эксперимент утвердил Евклида в масштабах Тирольских Альп. И как будто опроверг идею пространственной кривизны в тех же масштабах и в пределах точности угломерных инструментов.

Можно было думать, что если кривизна пространства и существует, то обнаружить ее удастся либо более точным измерением углов, либо в треугольнике еще более крупного масштаба — скажем, астрономического, с вершинами, лежащими на каких-нибудь звездах.

Так считалось много десятилетий, пока в умах ученых царила физика Ньютона с ее вечно неизменным абсолютным пространством, с возможностью (хотя бы принципиальной) сколь угодно быстрых путешествий и измерений.

А потом явился Эйнштейн. Мгновенные путешествия и измерения получили отставку. И выяснилось, что эксперимент Гаусса некорректен, несовместим с физикой мира. Его нельзя исполнить даже мысленно¹.

¹ Это не очень широкоизвестное замечание высказано советским физиком А. А. Фридманом (о его работах — после).

Не забывать о времени!

Приговор был таков: в малых масштабах, где мир бесспорно евклидов (это видно во всех школьных тетрадах), мгновенное творение и измерение светового треугольника не даст ничего нового — там и кривизны практически нет. А в крупных, астрономических масштабах ни Гаусс, ни потомки его, вооруженные новейшей техникой, просто не успели бы сделать желаемых измерений.

Пока световой луч, «вычерчивая» гигантский космический треугольник, бежал бы от звезды к звезде, он вместе с тем «поднимался» бы в будущее. Это сделало бы невозможным возврат в точку старта — ведь вспять во времени двигаться запрещено во имя исполнения принципа причинности.

Но может быть, сама точка старта, равномерно «поднявшись» в будущее, совпала бы с финишем луча, обежавшего треугольник? В частном случае, при неизменно равномерном времени, это допустимо. Но в общем случае это невозможно, потому что, как объяснялось в девятнадцатой и двадцатой главах, вместе с деформацией пространства происходит деформация времени. Точка старта, двигаясь в будущее, могла пережить изменения темпа времени и встретиться с вернувшимся лучом совсем не там, где произошла бы эта встреча, будь время неизменно равномерным.

Строго говоря, в крупных, астрономических масштабах вообще невозможно построить пространственный треугольник. Он распадется при «черчении». И, значит, невозможно измерить его углы. И, следовательно, невозможно определить кривизну пространства.

Такова же причина объявленной нефизичности всех примеров двадцать первой главы.

Нет в эйнштейновской физике «независимого», «самостоятельного» пространства.

Тут снова отчетливо проступает существеннейшая черта идей Эйнштейна: неразделимость пространства и времени, их тесное единство. Только в специальных, нарочно придуманных случаях могут быть исключения — скажем, прямое время в искривленном пространстве (один из таких примеров — эйнштейновская космологическая модель Вселенной — будет разобран в двадцать

шестой главе). А как правило, деформация пространства обязательно сопровождается деформацией времени. Из этого и надо исходить при физическом осмыслении идей неевклидовой геометрии.

Короче говоря, раз уж есть где-то в мире кривизна, то она присуща сразу и пространству и времени.

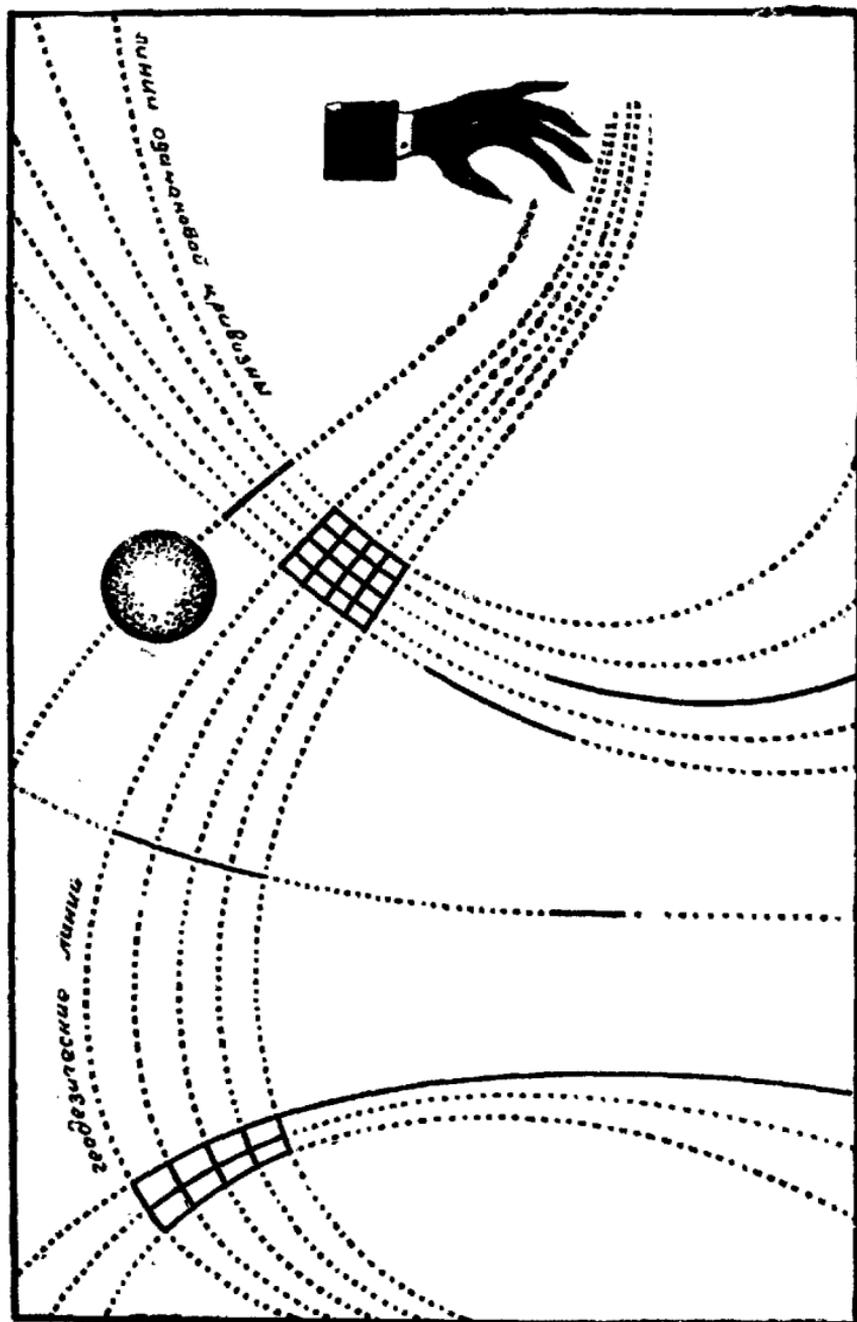
Эволюция аквариумов

Снова коротенькое воспоминание. Прочтите его не спеша и хорошенько почувствуйте.

Много страниц назад, рассуждая о воззрениях Ньютона, я уподобил классическую систему пространственного отсчета гигантскому жесткому аквариуму. Он был неизбежно неподвижен, ибо покоился на неподвижных звездах. И относительно его дна и стенок можно было мгновенно отмеривать расстояния в абсолютном евклидовом пространстве. На аквариуме висели нематериальные звездные часы, отсчитывающие всеобщее, везде одинаковое, равномерное математическое время. Это был божественный остов ньютоновского мира.

При движении тел их пространственные координаты (расстояния до дна и двух стенок аквариума) непрерывно менялись, для разных тел по-разному. Время же для всех тел текло совершенно одинаково. Из-за этого пространство мыслилось независимым от времени. Таким оно пребывает и до сих пор в наших головах, потому что очень трудно выбить привычку жизни в мире Ньютона — в мире движений, медленных по сравнению со светом.

Затем, когда на арену выдвинулись быстрые движения, когда были запрещены скорости, превышающие световую, аквариум рухнул. Вместе с ним исчезли абсолютное время и абсолютное пространство. Эйнштейн выдвинул вместо них относительные пространства и относительные времена — свои для каждого тела, движущегося по инерции равномерно и прямолинейно. Можно сказать так: у всех таких тел появились собственные аквариумы, движущиеся вместе с ними по прямым равномерно, не быстрее света. Они остались вполне жесткими и прямыми, эти «индивидуальные» аквариумы. Но, во-первых, масштаб длины в любом из них стал



неабсолютен — укорачивался для движущихся наблюдателей. И, во-вторых, для движущихся наблюдателей замедлился темп хода часов, висящих на аквариумах.

Так вместо движений, происходящих в абсолютном пространстве и едином математическом времени, появились движения в собственных и релятивистских временах и пространствах, соединенных неразделимо. Чтобы изображать их графически, мы построили диаграмму:

Это был мир Минковского¹. Каждому событию принадлежала четырехмерная *мировая точка* — три собственных пространственных отсчета и собственный отсчет времени. Для иначе движущихся систем все четыре отсчета этого же события были другими. Но в любой из этих систем отсчета, летящих относительно друг друга равномерно по прямым, квадрат интервала между двумя событиями сохранялся неизменным.

Последнее утверждение — знаменитая инвариантность интервала. Из нее Эйнштейн извлек все формулы частной теории относительности, все эти удивительные парадоксы, проиллюстрированные у нас приключениями Клио, недоразумениями с космической торговлей и т. д. Вплоть до закона эквивалентности массы и энергии и предсказания атомной бомбы.

Кривой мир

Далее мы посетовали, что, несмотря на красноречивые успехи специальной теории относительности, она все же далековата от действительной природы: не было тяготения, пронизывающего Вселенную.

И тогда мы вспомнили о жерновах и песчинках. О странной особенности их совместного падения, отмеченной еще Галилеем, о необъяснимом у Ньютона равенстве тяжелой и инертной масс.

После обмана Людмилы космическим Черномором мы провозгласили эйнштейновский принцип эквивалентности инерции и тяжести. Выслушав возражения Маленького Принца, признали сугубую локальность этого принципа. Но потом побывали на сотой Олимпиаде и

¹ Чтобы четко понимать дальнейшее, перечитайте двенадцатую и тринадцатую главы. Кто пропустил, самое время прочитать их.

выяснили, что, несмотря на свою ограниченную применимость, принцип эквивалентности вместе с выводами специальной теории относительности ведет к знаменательному и неожиданному утверждению: масса деформирует пространство и время.

Наконец мы научились понимать слова «искривление пространства». Постигли кое-что в неевклидовой геометрии. Согласились, что движение материи должно сопровождаться деформацией пространства — времени. Массы вещества искривляют саму диаграмму движения.

Я нарочно столь назойливо, не стесняясь повторений, навязываю вам эту истину. Иначе трудно осмыслить главную идею общей теории относительности, к которой мы уже подошли вплотную.

Вот она.

Тела, летящие по инерции, движутся не по прямым линиям несуществующего ньютоновского абсолютного пространства. Мировые линии их располагаются не по прямым упрощенного мира частной теории относительности, лишенного тяготения. В *общем случае* тела, летящие по инерции, следуют *геодезическим линиям реального искривленного пространства — времени*. Толкните камень, уроните его, подбросьте — его движение изобразится четырехмерной геодезической линией, которая располагается на диаграмме поперек линий одинаковой кривизны пространства — времени. Там, где геодезическая искривится, камень приобретет ускорение. Причем сам, без всяких усилий, приложенных со стороны. Ибо такой путь на диаграмме будет для него наиболее прямым.

Этот четырехмерный путь будет, однако, не кратчайшим, а, как ни странно, *длиннейшим*. Самым прямым, но самым длинным! Ибо именно по длиннейшим расстояниям идут четырехмерные геодезические линии в мире пространства — времени. Совсем не так, как на глобусе или седле! Вот вам очередной парадокс.

Впрочем, в нем нет ничего нового. Ведь речь идет не об обычном пространственном пути. Мы говорим о линии на графике пространства — времени, построенном по рецептам теории относительности. А для разных относительных скоростей на этой диаграмме — разные масштабы длин и длительностей. Тут сойти с геодезической — значит ускориться под действием силы. И следо-

вательно, попасть во власть относительно «укороченных» километров и «удлиненных» секунд.

Тот же, кто движется строго по геодезической (то есть только по инерции), преодолевает «наиболее длинные» километры, тратя на это лишние «коротенькие» секунды. Потому-то, кстати, и получается парадокс близнецов — движение по инерции между двумя мировыми точками обязательно дольше, чем полет по тому же пространственному пути с ускорением и замедлением.

С легкой руки английского философа Бертрана Рассела это своеобразие называют иногда «законом космической лени». Он действует и в мире, искривленном массами планет и звезд. Падение камня, обращение лун и спутников — это «самое ленивое» движение: по длиннейшим, хоть и прямейшим, но согнутым геодезическим линиям.

В последних абзацах — суть теории тяготения Эйнштейна. В них спрятана долгожданная разгадка чудес падения: таинственного «действия без прикосновения» и равной быстроты летящих с Пизанской башни ядер и пуль. В них же немало других физических откровений, вплоть до указаний на устройство всей Вселенной.

Миновав лабиринты недоумений, рогатки логических трудностей, ухабы парадоксов, мы с вами наконец-то видим финиш длинной и извилистой трассы бега от удивления загадочному поведению падающего камня.

Глава 24. ПОЧЕМУ ПАДАЕТ КАМЕНЬ

Моинюок отчета

Мой труженик-читатель, которому я искренне сочувствую и которого от души благодарю за то, что он добрался-таки до этой главы, наверное, устал. Поэтому остатки нашего книжного пути проследуем не торопясь. Честно говоря, тут надо бы сделать даже остановку, и длительную — лет этак на пять — десять, с тем чтобы засесть за учебники и проштудировать весьма сложный математический аппарат, без которого немисливо уяснить количественные выводы эйнштейновской теории тяготения. Отказываясь от этого экскурса, мы обрекаем себя на очень приблизительное ее понимание.

Все же качественная сторона проблемы при вдумчивом и неспешном чтении нижеследующего может стать, мне кажется, вполне ясной рядовому девятикласснику. А то и восьмикласснику.

Собственно говоря, основное содержание эйнштейновских взглядов на природу тяготения вам уже известно (курсив на странице 232). Остаются подробности и тонкости.

Разберемся, какова в общей теории относительности судьба систем пространственно-временного отсчета.

Это знакомые нам «индивидуальные» аквариумы специальной теории, но они изменили строение и форму. Часы же, висевшие на каждом аквариуме, размножились в огромное число раз. Системы отсчета потеряли жесткость — стали гибкими, растяжимыми, ячеистыми. Вместо жесткого аквариума, вместо твердого трезубца пространственных координат, увенчанного единственными часами, появился, по выражению Эйнштейна, *моллюск отсчета*.

Вообразите мягкую каучуковую губку, которая невидима, неощутима. Она огромна — величиной со Вселенную, однако связана каким-то образом с телом, движущимся как угодно, и движется вместе с ним. Эта губка состоит из бесчисленных крошечных ячеек. Каждая ячейка — участок прямого пространства и равномерного времени (для наблюдателя, движущегося вместе с этим участком). Еще лучше представить себе, что никаких ячеек нет — просто в бесконечно малом пространстве губка не имеет кривизны и темп времени в достаточно близких точках различается бесконечно мало. Но в крупных масштабах заметна пространственно-временная четырехмерная кривизна. И она от ячейки к ячейке, от точки к точке плавно меняется.

Вот это неевклидово пространство, привязанное к определенному движущемуся телу и заполненное (мысленно) множеством часов, идущих в плавно меняющемся темпе, и есть эйнштейновский моллюск. Трепетная, чуткая система отсчета. Состояние ее зависит от масс, распределения и движения вещества.

В таком моллюске и происходит реальное физическое движение. Оно изображается графиками мира событий — на четырехмерной диаграмме Минковского, которая тоже искривлена. Геодезическими линиями ее, тут

прямыми, там изогнутыми, определяется движение по инерции планет, спутников, камней. В том числе и падение. Падение — только по инерции!

Соль тут заключается в следующем: отсутствует то, что мы привыкли называть силой тяготения. Камень не притягивается Землей. Он по инерции движется вдоль четырехмерной геодезической, а вблизи Земли эта геодезическая изогнута так, что «втыкается» в мировую линию поверхности планеты. И камень, летя с башни по инерции, падает на Землю.

Штаны для шира

Пока наши разговоры о моллюске отсчета, сменившем старый аквариум, не более, чем слова. Пока есть только изложение замысла. Реализовать замысел — значит указать, каков моллюск, каковы конкретно закономерности изменений его формы, как она зависит от заполняющего его движущегося вещества.

Поставив перед собой эту цель, Эйнштейн шел к ней долго, с исключительным упорством. Надо было влить математическое содержание в идею кривизны четырехмерной пространственно-временной диаграммы. Дать формулы для ее вычисления и, как следствие, для предсказания движений тел в реальном мире.

Отправным пунктом работы послужила общая математическая характеристика кривизны — не что иное, как усложненная и обобщенная форма хорошо знакомой нам теоремы Пифагора.

Напомню, что эта теорема — метрическая, то есть содержит в себе рецепт определения расстояний. На плоскости она имела простейший школьный вид:

$$S^2 = a^2 + b^2.$$

На искривленной поверхности изменилась: S^2 стало не равно $a^2 + b^2$. Не стоит выписывать измененной формы этой теоремы. Скажу лишь, что для определения квадрата расстояния на любой искривленной поверхности a^2 и b^2 надо на что-то умножить да еще в формуле появится член с произведением a на b . (Тут к тому же a и b будут бесконечно малыми величинами.) Ана-

логично изменится вид трехмерной теоремы Пифагора в изогнутом трехмерном пространстве.

А в мире Минковского? На четырехмерной диаграмме быстрых движений?

Эта диаграмма строилась на основе постулатов Эйнштейна. В результате на ней отобразилась связь пространства и времени: появились гиперболические калибровочные линии, отсекающие на разных осях разные масштабы длин и длительностей. Это определило выражение для квадрата *интервала* (то есть, опять напоминаю, расстояния между двумя событиями в четырехмерном пространственно-временном мире). В двенадцатой главе оно было записано так: $S^2 = l^2 - c^2 t^2$. Расшифровав по «прямой» пространственной теореме Пифагора l^2 как сумму $x^2 + y^2 + z^2$, получим:

$$S^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2.$$

Очень похоже на теорему Пифагора, только четвертое слагаемое отрицательно. Но от этого можно избавиться. Ради симметрии сделаем замену: вместо $-c^2 t^2$ будем писать τ^2 . Тогда сходство, во всяком случае по математической форме, будет полным.

Таково метрическое правило для измерения интервала на диаграмме частной теории и относительности — без учета тяготеющих масс. Тут мир не имеет кривизны.

Ну, а в искривленном мире выражение интервала усложнится — подобно тому, как усложнилась теорема Пифагора на шаре или седле. Каждый член правой части формулы на что-то умножится, появятся члены с произведениями xy , xz и т. д. Что же получится?

Дабы подчеркнуть неравномерную кривизну мира, все отсчеты снабдим значком Δ (дельта) — это будет означать, что измерения ведутся в достаточно малой области мира, где кривизна его остается постоянной. И тогда (поверьте на слово) интервал между двумя близкими событиями в искривленном мире пространства — времени будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} \Delta S^2 = & g_{11} \Delta x^2 + g_{22} \Delta y^2 + g_{33} \Delta z^2 + g_{44} \Delta \tau^2 + \\ & + 2g_{12} \Delta x \Delta y + 2g_{13} \Delta x \Delta z + 2g_{14} \Delta x \Delta \tau + 2g_{23} \Delta y \Delta z + \\ & + 2g_{24} \Delta y \Delta \tau + 2g_{34} \Delta z \Delta \tau. \end{aligned}$$

Множители g , снабженные парой индексов (от 1 до 4), — коэффициенты кривизны. Их всего десять. От них-то, в конечном итоге, и зависит искривление мира. А сами они зависят от масс и расстояний до окружающих тел.

Написанное выражение носит громкий и почетный титул — фундаментальный метрический тензор. Отметив музыкальную звучность термина, воздержимся от расшифровки его смысла (это чистая математика). По существу, здесь не что иное, как усложнение и обобщение «покроя» школьных «пифагоровых штанов» на случай искривленного четырехмерного мира, диаграммы движения в эйнштейновском моллюске отсчета.

В далекой от звезд и планет пустоте при равномерном движении моллюск обращается в аквариум и никакой кривизны мира нет. Фундаментальный метрический тензор становится интервалом специальной теории относительности. В этом случае (при обратной замене τ^2 на $-c^2t^2$) $g_{11}=g_{22}=g_{33}=1$; $g_{44}=-c^2$, а $g_{12}=g_{13}=g_{14}=g_{23}=g_{24}=g_{34}=0$.

Там же, где нет вокруг полной пустоты, где сравнительно недалеко звезды и планеты, должны иметь место отклонения от этих «нормальных» значений метрических коэффициентов.

Эллиптическая кривизна

Следующий шаг — разгадка математической зависимости между метрическими коэффициентами и массами движущегося вещества.

Шаг труднейший.

Коэффициентов — десять. Значит, нужно написать систему из десяти уравнений, связывающих эти коэффициенты с массой и расстояниями от точки наблюдения до окружающих тел.

Гений и труд Эйнштейна отыскиали эту систему — систему *мировых уравнений*.

Нам с вами не стоит даже пытаться разбирать логику вывода и выписывать уравнения. Удовлетворимся сообщением, что они существуют.

Еще сложнее и тоньше дальнейшая работа — решение системы мировых уравнений. Тут Эйнштейн и его

последователи столкнулись с трудностями поистине титаническими. До нашего времени задача полностью не решена. Добыты только отдельные частные решения, годные лишь ограниченно, при всевозможных упрощениях.

Тем не менее результаты огромны: создана математическая теория тяготения, в которой действительно нет, как таковой, силы тяготения! Есть только силы инерции.

Грубо говоря, дело обстоит следующим образом.

Удалось выяснить, как именно отклоняются от «нормы далекой пустоты» метрические коэффициенты мира около тяжелого тела — например, Земли. На этом материале был установлен «околоземной вариант» фундаментального метрического тензора, то есть, другими словами, характеристика кривизны пространства — времени.

Оказалось, что геометрия тут эллиптическая (вроде геометрии поверхности яйца, но только, конечно, четырехмерная, да еще такая, что геодезические линии служат не кратчайшими, как на яйце, а длиннейшими расстояниями. Причем с приближением к центру Земли кривизна мира увеличивается (кривизна поверхности яйца увеличивается с приближением к его «острым углам»). И увеличение кривизны мира означает очень малое замедление времени и сокращение расстояний.

Отсюда попробуем представить себе ход геодезических линий, этих прямейших длиннейших путей, «рельсов» инерционного движения тел на диаграмме искривленного пространства — времени.

Во-первых, все геодезические сходятся, вроде меридианов на глобусе.

Во-вторых, кривизна их тем больше, чем больше кривизна мира.

Не забывайте, что речь идет о мире-диаграмме, построенном по правилам Эйнштейна, что одно из его измерений — время — может только возрастать. Поэтому геодезические линии, обладая наибольшей прямизной и наибольшей длиной, имеют, кроме того, направление — устремлены в сторону возрастания времени. Тела движутся по ним из прошлого в будущее, но не наоборот. Так вода в реке обязательно течет сверху вниз.

Разумеется, вообразить все это вместе и сразу не просто. Попробуем все же применить сказанное к поведению камня, находящегося около Земли.

Камень выпущен

И вот пробил торжественный час исполнить давнее, много раз повторенное обещание: окончательно объяснить чудо падения камня на Землю.

Включите мысленно духовой оркестр — и, пожалуй, сразу выключите, чтобы не мешал.

Внимание!

У меня в руке камень. Внизу — Земля.

Будем считать, что в пространстве Земля стоит на месте (движением ее вокруг Солнца пренебрежем, как и прочими астрономическими движениями). Но во времени она движется. Она мчится в будущее. И камень мчится в будущее. И я тоже. Этим бесспорным фактом удобно воспользоваться для объяснений.

Земля не испытывает никаких сил (о Солнце пока совсем забудем), то есть находится во власти одной только инерции. Можно сказать: Земля по инерции движется в будущее.

А камень испытывает действие силы — он удерживается моей рукой.

Я разжимаю пальцы — дарю камню свободу, избавляю его от действия силы. И (внимание!) давайте теперь вообще забудем о таком понятии, как сила тяготения. Пусть камень, как и Земля, остался во власти одной лишь инерции.

Что ж, тогда и камень полетит по инерции в будущее.

Будь Земля бесплотна, лишена массы, мир вокруг нее не был бы искривлен и геодезическая линия освобожденного камня была бы совершенно прямой. Не получив толчка, камень благодаря инерции хранил бы покой в пространстве, передвигаясь только во времени, — спокойно висел бы возле моей разжатой руки. Обо мне можно было бы сказать то же самое. Я и камень мчались бы в будущее вместе, по соседним строго прямым и параллельным геодезическим линиям, все время находясь в относительной неподвижности. Никакого падения не случилось бы.

Но в действительности Земля отнюдь не бесплотна. Мир искривлен ее гигантской массой. Поэтому я и камень неравноправны. Я испытываю действие силы — пол давит на мои подошвы, не позволяя мне «провалиться сквозь землю». Другими словами, меня все время «на- сильно» сдвигают с моей геодезической линии и держат на мировой линии, параллельной геодезической линии центра планеты.

А камень по-прежнему свободен. На него ничто не давит. Он и теперь путешествует в будущее по своей геодезической линии.

Но на этот раз она изогнута, потому что мир искривлен.

Правда, пространство — время деформированы так мало, что и геодезические изогнуты совсем незначительно. В первые мгновения свободы камня его геодезическая линия почти совпадает с моей мировой линией, и камень почти неподвижен относительно моей ладони. Но бег во времени стремителен. За микросекунды «путешествия в будущее» геодезическая линия камня чуть отходит от моей мировой линии. Поэтому камень, мчась вместе со мной во времени, неизбежно набирает скорость и смещается относительно меня в пространстве. С каждым мгновением скорость и пространственное смещение камня больше, потому что его геодезическая линия все круче отклоняется от моей мировой линии.

Саму кривизну мира я не замечаю, как и ее увеличения: замедление секунд и сокращение сантиметров слишком незначительны. Не чувствую я и того, как вместе с камнем и Землей мчусь в будущее: этого «полета» ведь на самом деле нет, он лишь условность, привлеченная для удобства объяснений. Поэтому движение камня по геодезической линии возле Земли предстает передо мной в явлении зримом и привычном: ускоренном движении камня к центру планеты.

Так на моих глазах совершается чудо падения.

Если бы я зажал в кулаке камень и песчинку, а потом одновременно отпустил их, и песчинка и камень опять полетели бы в будущее по инерции, не отставая друг от друга, ибо следовали по одной и той же геодезической. И, конечно, одновременно столкнулись бы с земной поверхностью.

Никаких сил тяготения, действующих «через пустоту»,

как видите, не понадобилось. Не потребовалось никаких невидимых нитей и резинок между Землей и камнем. И все-таки падение состоялось. В точном согласии с давнишним наблюдением Галилея.

Прыжки шича

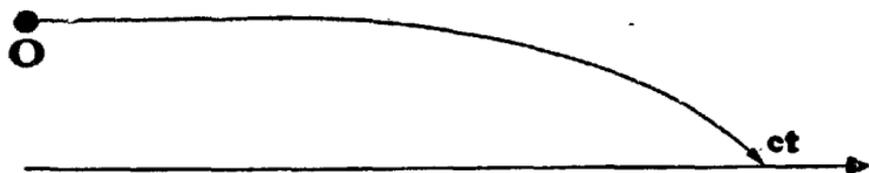
Ради большей ясности сейчас будут повторения сказанного в видоизмененных вариантах и пояснения с помощью упрощенных диаграмм.

Начало координат мира пространства — времени устанавливаем на камне в момент времени $t = 0$. Пространство принимаем одномерным, то есть учитываем единственное пространственное измерение — ось x (ее направим вниз, не рисуя). Где-то на ней центр масс и начало мировой линии Земли. Диаграмма ньютоновского мира в этом случае такова:



Ось времени — прямая как стрела. Мировая линия камня согнута. Черными стрелками изображена сила тяготения, без нее в классике не обойтись.

А вот диаграмма той же последовательности событий с точки зрения Эйнштейна — Минковского:



Ось времени камня пригнулась к мировой линии Земли. И не требуется никаких сил тяготения.

Конечно, камень не обязательно просто ронять. Его можно как угодно подбросить. И система отсчета может как угодно двигаться относительно Земли и камня. Все равно он будет лететь по инерции вдоль осей времени

или геодезических линий мира, искривленного массой планеты. С точки зрения старой механики Ньютона, это представится движением под действием силы тяжести.

Вот, например, график движения мяча, который сначала был отпущен с полуметровой высоты, упал, ударился о землю, подпрыгнул вертикально вверх и т. д.



В каждом прыжке мяч находился примерно секунду. За это время в пространстве он пролетал метр. А во времени?

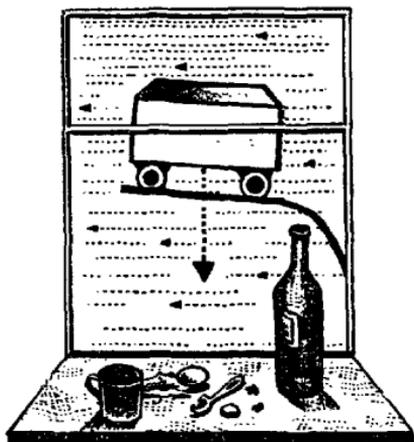
На диаграмме Минковского масштаб времени множится на скорость света, то есть каждая секунда приравнивается к тремстам тысячам «километров». Такой гигантский «путь во времени» и проделал наш мяч, пока прыгал на полметра вверх и вниз в пространстве. Отклонение геодезической линии мяча от евклидовой прямой, таким образом, составляло на диаграмме пять десятичных долей сантиметра на «километр времени».

Повторю еще раз: разумеется, никакого «километра времени» на самом деле нет — он есть только на графике движения, где время, ради формального удобства, выражается в единицах длины.

Но цифра, которую мы выудили из графика Минковского, хорошо демонстрирует ничтожность искривления диаграммы мира массой Земли у ее поверхности. И именно эта неуловимо крошечная кривизна пространства — времени полностью объясняет зримое, весомое, ежеминутно творящееся на наших глазах чудо падения. Фигурально выражаясь, происходит оно потому, что уж очень быстро мы и все окружающее мчимся в будущее. Масштаб на оси времени диаграммы множится на скорость света! Поэтому несмотря на малость деформации пространства — времени микроскопическое искривление четырехмерной геодезической линии движения мяча мгновенно накапливается в величину заметную и ощутимую.

Вот одно не очень удачное сравнение.

Я смотрю из идущего поезда на тележку, катящуюся рядом по колее, которая круто сворачивает к колее поезда. Пусть я не чувствую, что движусь, что мчусь



вперед тележка, не замечаю рельсов. Я вижу одно: тележка ускоренно приближается. «Падает» на поезд!

Аналогия, правда, неточная: поступательный ход поезда и тележки уподобляется бегу во времени, а это условность.

Вообще надо помнить: наш реальный мир — не диаграмма. Условная четырехмерность мира — лишь математический прием, позволяющий «начертить» то, что

время и пространство связаны и подчинены влиянию вещества.

Вес—сила инерции

Еще одно замечание — про вес. Что же такое тяжесть камня, если нет дальнедействующей, «проникающей сквозь пустоту», «таинственной», «божественной» силы тяготения?

В самом начале этой книжки мы с вами предположили: тяжесть есть давление камня на опору, и только.

Теперь это предположение подтверждается: вес предстает перед нами как давление камня на опору, которая не дает ему двигаться свободно по геодезической линии.

Другими словами, вес — не что иное, как сила инерции. Подобной силой действовал бегун на дорожку стадиона олимпийской карусели или похищенная Людмила — на пол ускорявшейся ракеты Черномора.

А теперь я сижу и силой инерции давлую на стул, который не позволяет мне по инерции улететь к центру планеты. И яблоко прикладывает силу инерции к ветке яблони, на которой висит. Знал бы это Ньютон!

Видите: благодаря открытой Эйнштейном кривизне пространства — времени сила тяжести сведена к силам инерции в совершенно земных, совсем не фантастических событиях.

И этот факт, честное слово, удивительнее самой экзотической литературной небывальщины.

Часть четвертая
УДИВЛЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Глава 25. ПОВИНОВЕНИЕ ЭЙНШТЕЙНУ

Дьявольский скепсис

Если бы я снова допустил на наши страницы дьявола (того, что в конце шестой главы умудрился устроить всемирную катастрофу путем ликвидации удивительности мира), он, быть может, начал бы провокационную болтовню вроде такой:

— Ну и чего вы добились? Маленького изменения в чертеже диаграммы движения, всего-навсего. А какой ценой! Относительность пространства и времени, кривизна мира, метрические коэффициенты, которые вы не сумели даже рассчитать,— фу-ты, ногу сломишь в этом беге! И все это ради единственного результата — изгиба диаграммы Минковского. Чепуха! Пустяки! Никакой практической пользы!

— Но зато,— ответил бы я,— мы избавились от удивлений!

— И завели новые,— добавил бы он злобно.— Похлеще прежних! Променили кукушку на ястреба! Стоило ли стараться?

— Подумаешь! — возразил бы я.— Это даже интересно!

— Ну, кому как. Мне неинтересно. Мне больше нравится щелкать семечки и смотреть телевизор.— Он решительно дернул бы хвостом и удалился, презрительно цокая копытами.

Все-таки этот дьявольский скепсис заразителен.

В самом деле, на первый взгляд не так уж много дало нам с вами эйнштейновское толкование тяготения. Приятно, конечно, избавиться от томительных недоумений по поводу падения камней и пушинок. Однако окупаются ли приобретение принесенными затратами?

Затраты-то велики. И даже, кажется, утраты.

Утрачена легонькая формула ньютоновского закона всемирного тяготения, с которой нам было так занятно взвешивать на тетрадном листке Землю и Солнце. Вместо нее объявился этот мудреный фундаментальный метрический тензор, и вычислить его в общем виде еще не под силу даже академику. Резонно, кажется, предпочесть старую простоту новой сложности.

Нет, совсем не резонно. Дело-то обстоит как раз наоборот: раньше была сложность, а теперь настала простота. Ведь речь идет о физике. Хоть математическое изложение эйнштейновской теории тоньше и запутаннее, чем ньютоновской, физическое содержание воззрений Эйнштейна гораздо проще. Это видно невооруженным глазом. Прежде две причины объясняли падение тел — инерция плюс тяготение, а теперь одна — инерция. Прежде фигурировали две массы — инертная и тяжелая, а теперь одна — только инертная, просто масса.

А вот самое главное. Прежде во всей Вселенной представлялись законными лишь инерциальные системы отсчета — только в них, как считалось, безукоризненно выполняются законы механики. Общая теория относительности справедлива в любой, в том числе и падающей и подверженной какому угодно ускорению, системе отсчета.

Как это доказать?

Перечисленные достоинства громадны. Их, вообще говоря, вполне достаточно, чтобы признать эйнштейновскую теорию, согласиться, что она стоит гораздо ближе к реальной природе, чем классические взгляды на тяготение.

И все же для полной и безоговорочной ее победы нужен эксперимент. Нужно, чтобы падающие камни и планеты, летящие в космосе, сами заявили: мы следуем именно Эйнштейну, а не Ньютону.

Как добиться такого признания? Какой выдумать опыт? Легко ли его поставить?

Очень и очень трудно это доказать. Очень и очень трудно придумать и поставить опыт. И вот почему.

В бесчисленном множестве земных и астрономических движений ньютоновская и эйнштейновская механики дают почти тождественные результаты. Все равно, по какой из них составлять «небесное расписание» планет, лун, звезд,— та и другая предрекают светилам практически одни и те же пути. Сразу же после создания своей теории Эйнштейн утвердил это в специальном исследовании — показал, что ньютоновский способ расчета в первом приближении дает результаты, точные и с эйнштейновской точки зрения. Так что знаменитый закон всемирного тяготения остался на вооружении ученых. Да иначе и быть не могло — иначе не было бы знаменательных триумфов ньютоновской небесной механики.

Как же так? Ньютон, с его соблазнительно «очевидным» (а в действительности фиктивным) абсолютным пространством, со столь же инстинктивно-желанным, но невозможным математическим звездным временем, с его изумительно простым законом всемирного тяготения, описывающим взаимное влияние тяжелых масс (несуществующих, по Эйнштейну), ошибся-таки ничтожно мало. Из физических фикций он ухитрился воздвигнуть почти безукоризненно правильную систему вычислений! Почему?

Тут особенно ясно, что традиционные понятия и модели старой механики вовсе не бессмысленны. Они лишь ограничены. Таким образом, теория Эйнштейна отнюдь не отменила почтенную, заслуженную классику, а, по существу, обобщила ее.

Расхождения же между Ньютоном и Эйнштейном начинаются лишь тогда, когда отсчеты измеряемых движений пойдут на совершенно ничтожные доли секунд и сантиметров, или если вступят в игру невообразимо гигантские массы, или если различия накопятся на протяжении столетий и сотен миллионов километров.

Исходя из этого и должны строиться опыты, планироваться наблюдения, призванные испытать эйнштейновскую теорию.

Изгиб света

Первый опыт — волнующий, связанный с экзотическими путешествиями, насыщенный драматическим ожиданием — был выполнен в 1919 году под руководством английского астронома Артура Эддингтона. Опыт до того небывалый в истории науки — оптико-механико-астрономический.

Замысел принадлежал Эйнштейну: предлагалось измерить, на сколько отклонится луч света, проходящий в непосредственной близости от Солнца.

К этой мысли великий физик пришел через собственную ошибку. Сначала Эйнштейн сделал вывод, что и по его теории и по Ньютону луч света будет смещаться к Солнцу одинаково. Значит, проверять тут нечего, зацепиться не за что. Однако позднее более внимательный разбор задачи выявил тонкость, которая прежде ускользнула. Оказалось, что возле поверхности Солнца мир должен быть немножко «круче», кривизна его — чуть больше, чем требуется для согласия с ньютоновской физикой. Другими словами, поле тяготения в непосредственной близости Солнца, по Эйнштейну, больше, чем следует из старой небесной механики.

Поэтому камень, признающий эйнштейновскую физику, у поверхности Солнца должен падать с большим ускорением, чем камень-ньютонианец. Или пуля, пролетающая близко от Солнца, должна, по Эйнштейну, быстрее отклониться к центру светила, чем по Ньютону. Вот и подсказка экспериментатору: заберитесь на Солнце и измерьте ускорение свободного падения камня или отклонение пули.

На Солнце не заберешься. Нужен обходной маневр. Нужно поставить эксперимент с Солнцем, не дотрагиваясь до Солнца, находясь от него в полутора сотнях миллионов километров.

Такой эксперимент и был исполнен. Самый крупный по пространственному охвату физический опыт из всех, когда-либо ставившихся человеком. В этом отношении он поныне остается рекордным.

Вместо камней или пуль были использованы световые лучи, идущие к Земле от далеких звезд мимо Солнца. Ведь лучи тоже имеют массу (ибо они имеют энергию) и поэтому притягиваются Солнцем (по Ньютону).

или движутся по инерции вдоль геодезических линий, согнутых массой Солнца (по Эйнштейну). Колоссальная скорость, с какой мчится свет, ведет к тому, что отклонение лучей возле Солнца очень мало. Однако оно может быть заранее вычислено — как в теории Ньютона, так и в теории Эйнштейна. И затем измерено. И сопоставлено с обоими теоретическими предсказаниями.

Основное препятствие для наблюдения ближайших к солнечному диску звезд — ослепительное сияние светила. Избавиться от него можно, лишь загородив Солнце какой-либо заслонкой. Лучшее всего Луной.

Таскать по небу Солнце и Луну не понадобилось — они сами встали на необходимые места. Очень просто: 25 мая 1919 года состоялось солнечное затмение, полная фаза которого прошла через Южную Америку и Африку.

И вот в Бразилию и на западное африканское побережье приехали две организованные Эддингтоном экспедиции. Во время затмения сфотографировали Солнце вместе с небесными окрестностями, усыпанными звездным узором. Его создали концы согнутых звездных лучей. Потом дождались, когда Солнце ушло из этого участка неба, и снова сделали фотоснимки — вышли изображения звезд, созданные прямыми, недеформированными лучами. Во втором снимке звезды стояли тесно, в первом казались отодвинувшимися от Солнца, которое пожаловало в их компанию. Это значило: действительно, лучи пригнулись к светилу. Но на сколько, каков угол отклонения? Сравнение снимков позволило вычислить этот угол. Исследование было сделано неторопливо, с должной тщательностью.

Ожидали эйнштейновского отклонения — на 1,75 угловой секунды. Вдвое меньшее отклонение отвергло бы идеи Эйнштейна и подтвердило теорию тяготения Ньютона. А если бы отклонение вышло вдвое большим?

— Тогда, — шутил один из участников экспедиции, — Эддингтон сошел бы с ума.

Эддингтон остался в здравом рассудке. Судя по фотоснимкам, звезды сместились на 1,67 угловой секунды — очень близко к предсказанию общей теории относительности.

В описанном уникальном астрофизическом эксперименте луч света недвусмысленно заявил физикам:

— Я подчиняюсь Эйнштейну, а не Ньютону.

Это было триумфом новой физики. По всему миру прокатилась волна восторга ученых. И не только ученых. Торжество теоретического предсказания всколыхнуло широкие массы рядовых любителей науки. Тогда-то к сорокалетнему Эйнштейну и пришла шумная слава, не утихшая до конца его жизни.

Меркурий танцует вальс

У Ньютона был дальний взгляд, обзор природы с птичьего полета.

Эйнштейн вооружил физику умением исследовать небесные движения вблизи, в тонких подробностях, которые не могли попасть в поле зрения ньютоновской теории. Так случилось с отклонением света вблизи Солнца. Так вышло и с обращением вокруг Солнца самой близкой планеты — Меркурия.

По Ньютону, орбита Меркурия — эллипс. В небесной механике его досконально рассчитали, на столетия вперед и назад составили «расписание» прибытия планеты в различные его места. Через каждый меркурианский год Меркурий обязан возвращаться в точку, пройденную по эллипсу год тому назад.

И вот многолетние астрономические наблюдения опровергли это теоретическое расписание. На деле оно не исполнилось. Через год Меркурий не возвращался на старое место, а оказывался лишь рядом с ним. Разобравшись, астрономы поняли, что эллипс меркурианской орбиты сам движется — очень медленно обращается вокруг Солнца. Строго говоря, Меркурий описывает не эллипс. Его путь похож на контур цветка ромашки, на своеобразную розетку.

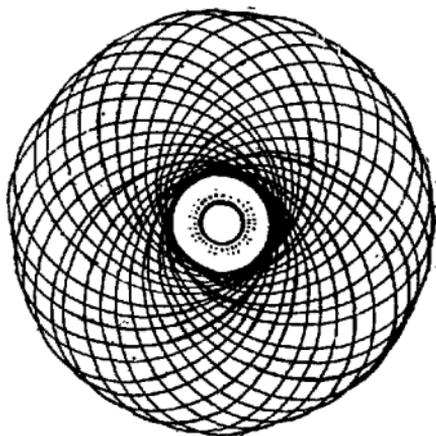
За столетие эллипс орбиты Меркурия поворачивался на угол в 43 секунды — только и всего. Но эти злощастные секунды с позиций старой механики были досадно непонятны. Они вносили неприятный диссонанс в гармонию строго согласных с ньютоновской теорией небесных движений. Откуда они взялись?

В теории Эйнштейна розетка меркурианской орбиты стала обязательна: так уж пролетает соответствующая геодезическая линия в мире, искривленном солнечной

массой. Это засвидетельствовали вычисления. Давняя загадка нашла объяснение.

Мало того. По Эйнштейну, подобные же розетки, только еще менее заметные, обязаны описывать и соседка Меркурия — Венера, и соседка Венеры — Земля. В орбите Венеры астрономы-наблюдатели пока не могут найти релятивистских особенностей. Но зато тщательнейшие астрономические исследования как будто подтвердили предсказание для нашей планеты. Путь Земли оказался чуть-чуть иным, чем назначил Ньютон. И, по-видимому, близким к тому, что указан общей теорией относительности. Так сам шар земной, не очень, правда, уверенно (потому что точных измерений еще не сделано), объявил ученым:

— Я повинуюсь Эйнштейну!



Что окажут опутники?

Луч, склонившийся к Солнцу, безмерно медленное смещение орбит Меркурия, Земли — налицо явные подтверждения эйнштейновской теории. В скором будущем есть надежда тщательно изучить орбиты искусственных спутников, облетающих планету, и тут тоже должны объявиться намеки на розетки.

Быть может, удастся уловить еще одно явление, предсказанное Эйнштейном, но пока не подтвержденное в эксперименте или наблюдении, — зависимость земного тяготения от вращения планеты вокруг своей оси.

У Ньютона вращение не играло никакой роли. Кружится ли Земля, неподвижна ли — Луна притягивается ею совершенно одинаково.

У Эйнштейна иначе. Вращение придает Земле дополнительную энергию, значит, и массу. Поэтому неподвижная и вращающаяся планеты по-разному деформируют вокруг себя метрику мира. Около вращающейся Земли геодезическая линия спутника будет поэтому иной, чем около неподвижной.

Этот эффект еще тоньше, еще незаметнее. И все же физики намереваются подвергнуть эйнштейновскую теорию и этому строжайшему экзамену.

Здесь уместно в виде отдыха коротенькое раздумье.

Нас с вами с первых страниц этой книжки интересовал падающий камень.

Мало-помалу мы разобрались в его поведении, вслед за Эйнштейном свели тяготение к инерции. Но подтверждение нашли совсем не в камне — в световом луче, в орбите планеты.

Ну, а камень? Есть ли что-нибудь специфически эйнштейновское в падающем булыжнике?

Памятуя то, что сейчас было сказано о спутниках, я рискну ответить на этот вопрос утвердительно. Ибо спутник — не что иное, как камень, с достаточной быстротой выброшенный с земной поверхности. И, может быть, настанет день, когда прямо в лаборатории, в каком-нибудь настольном приборе обыкновенный падающий булыжник обнаружит некую фантастически крошечную, неправдоподобно тонкую черту своего релятивистского характера. Это будет значить, что и камень вместе с лучом, планетой, спутником заявит:

— Я за Эйнштейна!

Думаю, что рано или поздно физики вырвут у камня это признание. Потому что могущество экспериментальных средств растет очень быстро.

Краснее красного

В наше время, когда астрономия все более становится экспериментальной наукой, небесная проверка идей Эйнштейна обретает близкое сходство с лабораторным опытом.

И в небе порой хорошо заметно то, что в земных условиях и масштабах отыскать невозможно.

Многие из вас, вероятно, слышали про необычные звезды — белые карлики. Их вещество обладает небывалой плотностью — в сотни тысяч раз тяжелее нашего свинца. Поэтому они создают вокруг себя колоссальное тяготение, значительно деформируют пространство — время. Как следует из теории относительности, тяжесть служит там «машиной времени», замедляет темп бытия атомов. Так вот, свет белых карликов несет в себе

явный отпечаток этого действия. Из-за «тяжелых условий» рождения световые колебания замедлены. А понижение частоты—это изменение цвета лучей. Например, красная спектральная линия, излучаемая водородом, «более красна», чем такая же линия на Земле.

Это явление с полной достоверностью зарегистрировали астрономы. Да и не только на белых карликах. Оно замечено даже на Солнце, где тяжесть, хоть и велика, но не идет в сравнение с могучим гравитационным полем белого карлика.

После чудес предыдущей главы это, впрочем, не выглядит странным.

Но вот новинка, отличный повод для очередного (какого уже по счету!) удивления.

Замороженный криотали

Оказывается, был сделан и лабораторный опыт, благодаря которому удалось непосредственно зафиксировать замедление темпа времени в поле тяжести.

Эксперимент исполнен впервые в 1960 году. Авторы — американцы Паунд и Ребка, воспользовавшиеся замечательным открытием физика из ФРГ Рудольфа Мессбауэра, сделанным в 1958 году. Как видите, перечисляются события совсем недавнего прошлого.

Вообразите башню. На ней двое часов. Одни внизу, у подножия, другие вверху, под крышей. Если верно предсказание Эйнштейна, нижние часы должны отставать от верхних, потому что поле тяжести внизу чуть-чуть больше, чем наверху.



Разумеется, часы должны быть предварительно выверены. В равных условиях они обязаны идти совершенно одинаково.

В опыте Паунда и Ребки были и башня и двое одинаковых часов. Башня самая натуральная, старинная, высотой 22 метра. А роль часов исполнили ядра атомов в кристалле радиоактивного железа, замороженного до сверхнизких температур в жидком гелии.

Ядра наверху излучали кванты (порции) гамма-лучей — коротковолнового электромагнитного излучения со строго точной частотой колебаний. То была «радиостанция». А внизу стоял «приемник» — атомные ядра, призванные поглощать посланные сверху лучи. Поглощение могло произойти лишь тогда, когда частота спустившихся гамма-квантов совпадала с частотой таких же квантов, если бы они выпускались внизу.

Тут очень важна точность настройки «радиостанции» и приемника. Она и была соблюдена благодаря открытию Мессбауэра.

Прежде частоту гамма-лучей не удавалось делать строго определенной. Она «гуляла» — оказывалась то больше, то меньше некоего среднего значения. Мессбауэр же поставил рекорд остроты «настройки» гамма-излучателей и приемников. Как это ему удалось?

Главный секрет как раз в том и заключается, что в качестве источника и приемника лучей он использовал сильно охлажденный кристалл. В обычных условиях ядра, «стреляя» гамма-квантами, испытывают отдачу, как ружейные приклады, тратят энергию на это. А в замороженном кристалле ядра так крепко стоят в строю кристаллической решетки, что, «стреляя» гамма-квантами, не испытывают практически никакой отдачи. Поэтому вся (в точности!) энергия, освобождающаяся при излучении, отдается именно испускаемым лучам. Ни малейшей доли ее не теряется, не тратится на раскачку ядра, ибо оно, прочно связанное с кристаллической решеткой, просто не может раскачаться.

Так гарантируется постоянство энергии испускаемых гамма-квантов. Но по законам микромира энергия гамма-квантов строго соответствует их частоте¹. Значит,

¹ Соответствующую формулу вывел, кстати, Эйнштейн: $E = h\nu$, где E — энергия, ν — частота, h — постоянная величина.

замороженный гамма-излучатель дает кванты очень точной «длины волны».

Столь же точна должна быть частота лучей, которые способен поглотить замороженный кристалл-приемник. Его ядра не могут ни на йоту изменить свое состояние, чтобы «схватить» квант даже с крошечным недостатком или избытком энергии (или, что то же самое, с чуть-чуть уменьшенной или увеличенной частотой).

Это сверхточное излучение и поглощение гамма-лучей именуют теперь *эффектом Мессбауэра*.

Скорость роста ногтей

Итак, на верху башни точнейший гамма-излучатель, внизу такой же гамма-приемник. Идет «передача». Так вот, если она «принимается», если нижний кристалл поглощает летящие сверху кванты (другими словами, если этот кристалл для них непрозрачен), предсказание Эйнштейна отвергнуто. Ведь случись такой исход опыта — значит, время наверху и внизу течет одинаково, ядра-часы тут и там имеют равный ход.

В эксперименте этой беды не произошло. Поглощение не состоялось. Потому что на верху башни из-за ничтожного ослабления поля тяжести ядра-часы шли немножко быстрее и, следовательно, излучали гамма-лучи немного большей частоты, чем требовалось для их поглощения внизу. Частота увеличивалась (время ускорялось) на $5 \cdot 10^{-15}$ — пять миллионных долей от одной миллиардной доли. Убедительная цифра! Этого было достаточно, чтобы приемник отказался от предложенных ему лучей!

Как же измерили эту невообразимую величину?

Кристалл-приемник стали медленно-медленно опускать, перемещать от кристалла-излучателя. Волны сверху начали достигать его немного реже. И поглощение состоялось. Скорость опускания приемника в опыте была сравнима, по образному выражению одного физика, со скоростью роста ногтей. Потребовались особые ухищрения, чтобы добиться этого рекорда тихиходности. Ну, а по темпу опускания нижнего кристалла, при скорости, когда он становится непрозрачным для лучей верхнего кристалла, нетрудно было подсчитать разницу

частот излучаемых и поглощаемых квантов. И отсюда — величину замедления времени в нижней части башни по сравнению с верхней. С точностью до 10 процентов результат совпал с предсказанием Эйнштейна.

Иного итога никто и не ожидал.

Подобным же методом было измерено затем и замедление времени на краю медленно вращающегося диска (о чем упоминалось в девятнадцатой главе).

Что ж, я думаю, не мешает еще раз вслух удивиться.

Давно ли, рассуждая о теории относительности, мы оперировали околосветовыми скоростями, энергиями атомных взрывов, силами, превращающими человека в желе. И вот противоположность. Черепашьи скорости, фантастически ничтожные изменения гравитационного поля...

Один физик ничуть не солгал, заявив, что машинистка, работающая на десятом этаже, стареет быстрее своей подруги с первого этажа. Вряд ли, правда, это обстоятельство встревожит девушек, желающих сохранить молодость, — за тридцать лет разница в возрасте составит миллионную долю секунды. Но поразительно, что эта разница была предначертана теорией и затем измерена. Причем измерена даже не полностью, а в своей миллиардной доле. И не за 30 лет, а за несколько минут эксперимента Паунда и Ребки.

Четыреста лет тому назад великому основоположнику экспериментальной физики послужила первым прибором Пизанская башня. И вот снова башня... Какой гигантский скачок в умении человека испытывать природу!

Солнце остыло? На олош!

Под конец главы небольшое развлечение. Сейчас состоится знакомство с невероятной возможностью... уничтожить Солнце! Способ уничтожения подсказан идеей так называемой *гравитационной машины*. Эту идею академик Я. Б. Зельдович сформулировал в виде физико-математической теоремы. Из нее и следует изложенная ниже популяризаторская фантастика.

Исполнителем роли гравитационной машины назначается совсем уже постаревший робот Клио (не забыли

его?). В преклонном возрасте он стал чрезвычайно трудолюбив и старателен. А лет ему теперь очень много — десятки миллиардов. Дело происходит в том безмерно далеком будущем, когда погаснет Солнце.

Для землян это, правда, не катастрофа. Цивилизация разумных существ, машин, систем расселилась по всему миру, зажгла тут и там искусственные звезды — энергии вполне хватает, всюду, где требуется, голубеют небеса, светло, тепло, хоть темное Солнце висит бесполезной глыбой и мешает космическому транспорту.

Тут-то Клио и получает последнее задание: убрать из нашего мира скопище истлевшей солнечной золы, а заодно извлечь из нее остатки энергии.

Прежде всего старый робот изменяет свою конструкцию — запасается сверхдлинными руками с такими маленькими пальцами, что ими можно брать и перекладывать с места на место сами атомы. Это сверхъестественное умение необходимо для нормального действия гравитационной машины.

Когда подготовка закончена, Клио улетает на Солнце и с энтузиазмом приступает к работе. Он выполняет неправдоподобно кропотливую операцию — перекладывает атомы солнечного праха так, чтобы они не могли опираться друг на друга и упали к центру остывшего светила (возможность такой перекладки как раз и доказывается в теореме о гравитационной машине). И атомы, сдвинутые Клио с прежних мест, низвергаются. Солнце спадает, сжимается. В падении вещества освобождается огромная энергия, которую заботливый Клио неведомым способом собирает и отправляет на Землю.

Все это сопровождается весьма любопытным эффектом. Вещество холодного Солнца, и без того сверхплотное, по мере сжатия еще более уплотняется. Вблизи него возникает исполинское поле тяготения. То есть, говоря терминами общей теории относительности, круто искривляется пространство — время. Поле непрерывно нарастает, мир сгибается все круче. Наблюдатель с Земли обнаруживает на сжимающемся Солнце уменьшение расстояний и замедление времени. Будто тамошние события происходят на киноэкране, который становится все меньше и меньше, а движение «киноплёнки» непрерывно замедляется.

«Для себя» Клио несколько не уменьшился и работает в бешеном темпе, но с Земли он представляется уменьшающимся и все медленнее шевелит руками.

В конце концов для землян Солнце вместе с Клио исчезнет. Пространство вокруг него «захлопнется», время полностью остановится. Но этого земной наблюдатель не увидит никогда. Для него это произойдет... через вечность земного времени!

Ну, а Клио, незаметно для себя проскочив через «вечное для Земли» состояние, окажется... вне нашего пространства — времени, в ином пространственно-временном мире! И жить ему останется недолго. За малые доли секунды все вещество катастрофически спадет и вспыхнет гигантским взрывом.

Таков *гравитационный коллапс*, распад вещества в поле тяготения, погребение его в «гравитационной могиле» (слова Я. Б. Зельдовича). По мнению некоторых астрономов, кое-где в далах Вселенной совершаются и подобные необычайные процессы.

Таким образом, бывший бандит и пират, а затем неутомимый и вечный (для землян) работник пал благородной жертвой научной популяризации. И похоронен.

Глава 26. В ПОИСКАХ ПОКОЯ

Про шрак ночной

Две последних главы — о самом большом. Обо всем мироздании. О его строении, о его движении, о его неисчерпаемой противоречивости и удивительности. О тайнах, от которых еще предстоит избавиться.

Теперь я сбавляю пафос, перехожу на деловой тон.

Космология — это рассуждения о строении Вселенной.

Когда говорили, что Земля покоится на трех китах, плавающих в безбрежном и бездонном океане, или утверждали, что небо держится на плечах терпеливого Атласа, — высказывали космологическую гипотезу. Не очень, правда, аргументированную.

Когда уверяли, что хрустальная небесная сфера при-

бита гвоздями-звездами, тоже провозглашали космологическое утверждение. Только было неясно, к чему она прибита.

Самое оригинальное предположение сделал, мне кажется, один глубокомысленный чеховский герой, заявив, что наша Вселенная обитает в дупле зуба какого-то гигантского чудовища. Здесь, пожалуй, видна попытка решить очень нелегкую космологическую проблему: почему мироздание погружено во тьму, а не залито светом. В дупле зуба темно, это бесспорно.

Ну, а если обойтись без дупла?

Незабвенный Козьма Прутков сетовал по поводу того, что Солнце не светит ночью, днем-де «и так светло». В этом философическом недоумении есть, представьте, доля здравого смысла. Надо только перевести одно слово во множественное число — вместо «солнце» сказать «солица». А лучше поставить вопрос попроще: почему ночью небо темное?

Так титанической важности проблема сведена к примитивной, с виду прямо-таки детской, загадке.

Ответ далеко не очевиден. Нельзя объявить просто: ночью темно потому, что не светит солнце. Ведь звезды — те же солнца, только далекие. Если их бесконечно много в бесконечных даях мироздания, над самым малым уголком небосвода их бесчисленно много. Значит, свет их на небосводе обязан давать сплошной фон, сливаться в ровное ослепительное сияние. А так как светят звезды из-за высокой температуры и вместе со светом изливают лучистое тепло, то во Вселенной не должно быть места ни для Земли, ни для людей. В нестерпимом свете и жаре немислима жизнь. Любой листок, любая букашка мгновенно испепелились бы в такой Вселенной. Вещество привычных нам состояний — твер-



дого, жидкого, даже газообразного — стало бы невозможно. Всюду было бы так же жарко, как в недрах Солнца!

Изложен старый, полуторавековой давности, космологический парадокс, называемый фотометрическим. Выдвинул его в свое время немецкий астроном Ольберс, сделав это в форме вполне корректной физико-математической теоремы. И потом многие десятки ученых пытались его снять.

В дедрах противоречий

Может, свет погдощается межзвездной средой — газом, пылью, холодными планетами, «золой» остывших звезд?

Нет. Сколько бы ни поглотилось света, его все равно останется бесконечно много. Расчет простой: разделите бесконечность пополам, на десять, на сто — результат будет бесконечностью. Кроме того, атомы межзвездной среды не «поедают» свет без остатка — просто «глотают» его, чтобы «выплюнуть» потом в другом направлении. Они лишь рассеивают, разбрызгивают звездные лучистые потоки по всему миру, и в бесконечном пространстве должна сохраняться бесконечность лучистой энергии. Небо даже станет ярче.

Ну, а если есть-таки в мире некая твердая холодная оболочка, на манер чудовищного зуба, придуманного Чеховым? Увы, и эта гипотеза, сколь серьезно ее ни обставить, не спасает положения. Снаружи-то владелец зуба обязан купаться в том же бесконечно обильном, испепеляющем лучистом ливне. Ничто не вправе устоять против его пагубного действия. Испарится и оболочка.

Остается сделать еще одно, весьма рискованное предположение: снять запрет на ночную тьму путем отказа от его главной причины — от звездной бесконечности. Признайте, что в бесконечном мироздании существует всего «горстка» звезд и галактик, — и все встанет на место, не так ли?

Нет, не так. Еще Ньютон убедительно рассудил, что в мире не может быть конечного числа звезд. Если бы их набралась всего «горсть», пусть громадная, благодаря тяготению они, как думал Ньютон, слиплись бы

в комок, в одно огромное небесное тело. Позднее, правда, физика внесла поправку: «горсть» звезд не слиплась бы, а, наоборот, разбрелась по бесконечному пространству. И тогда Вселенная опустела бы, из нее исчезло бы практически все вещество.

Но вещество есть! Как бы далеко ни заглядывали астрономы в свои телескопы, всюду находилась материя. Значит, звезд бесконечно много? Тогда почему же все-таки ночью темно?

Видите, дело запуталось. Мы блуждаем в лесу противоречий.

Звезды вустого шира

Я однажды провалился на экзамене — дали, на беду, неразрешимую задачу. На другой день сообразил, что в экзаменационных билетах не принято задавать неразрешимых задач. Начал старательно думать — и, хоть с печальным запозданием, нашел ответ.

В космологии было похоже. Физики и астрономы сперва не разгадали каверзную загадку Ольберса. Но они знали, что фотометрический парадокс разрешим: небо-то темное! А потому продолжали размышлять, вычислять и постепенно выпутывались из лабиринта противоречий.

Представим такое. Мир бесконечен, звезд в нем бесчисленно много, их полная масса бесконечно велика, но тем не менее плотность звездной материи в бесконечном объеме равна нулю. Невозможно?

Оказывается, возможно. Нужно только, чтобы при увеличении объема плотность космической материи уменьшалась.

Плотность есть масса, деленная на объем. В каждой звезде плотность весьма велика, ибо весь ее объем заполнен веществом. Но в объеме, включающем две соседних звезды, средняя плотность меньше: много места ушло на пустоту. Дальше — то же самое. В объеме, охватывающем две соседние галактики, средняя плотность меньше, чем в каждой галактике по отдельности. А еще дальше? Что, если так будет продолжаться без конца? В пределе — для бесконечно большого объема — мы получим нулевую среднюю плотность материи.

И тогда выйдет долгожданное опровержение парадокса Ольберса: запрет ночной тьмы упадет. Глядя в глубь мира, мы практически не увидим вещества, ни светящегося, ни темного. Несмотря на то что звезд и прочих небесных тел останется бесконечно много.

Эта идея легла в основу любопытных схем размещения звезд, которые придумал в начале нашего века бельгийский космолог Шарлье. Главную их особенность Шарлье заимствовал у астронома XVIII века Ламберта, провозгласившего принцип иерархии в строении мироздания: небесные тела образуют системы, сложность которых с увеличением размеров растет, а средняя плотность материи падает. Мир, подчиненный таким правилам, свободен не только от фотометрического, но и от некоторых других (не упоминавшихся) парадоксов космологии — например, гравитационного (о мнимой неизбежности бесконечно большого тяготения в любой точке бесконечно большого мира с бесконечно большой суммарной массой звезд).

Так модель Вселенной, придуманная Шарлье, получила ранг более или менее разумной космологической гипотезы.

Кви обьять необьятнее

Хороша ли модель Шарлье? Пожалуй, неплоха. Лучше, во всяком случае, чем мир, плывущий на китах или пребывающий на плечах Атласа. Не нужно ни того, ни другого, и вдобавок очень приятно понимать и объяснять друзьям, почему ночью темно. Для Вселенной Ньютона что-либо кардинально иное вряд ли сочинишь.

Однако есть в этой системе мироздания существенный изъян. Вместо Атласа, вместо китов и тому подобных красивых вещей понадобилось нечто, хоть и не столь фантастичное, но никак не вытекающее из небесной механики: иерархичность звездных систем. Этот армейский порядок звездно-галактического строя, строгая субординация размеров и дистанций — условия, придуманные независимо от физики. Они внесены очень искусственно, с единственной целью спасти природу от космологических парадоксов, причем так, чтобы остались в силе ньютоновские «надфизические» фетиши —

абсолютное пространство и математическое время. Пока эти ипостаси ньютоновства были неприкосновенны, схемы Шарлье представлялись неизбежностью.

Лишь в наши дни доказана их невозможность: столь искусственное «построение» галактик очень быстро распалось бы. Не могут звезды «стоять» по стойке «смирно».

Конечно, убедительнее было бы вывести всемирную систему из проверенных и бесспорных физических законов, лишь обобщив малое на большое и не измышляя для материи никаких дополнительных правил поведения, не требуя от нее *неестественного* послушания.

Все дальнейшее развитие космологии составлено из серии попыток реализовать эту программу — отправляясь только от знаний, добытых маленькими людьми на маленькой Земле, понять необъятное, этот черный звездный дом, притаившийся за окном наших избушек и небоскребов, за иллюминатором космических кораблей, за воздухом атмосферы, эту великую тайну, обступившую со всех сторон любопытное человечество.

Программа оказалась исполински трудной. Сдвиги начались лишь с работ Эйнштейна, с того этапа эволюции физики, когда пространство и время обрели тесную связь с движущейся материей. Но на первых порах и релятивистская космология делала неуверенные, неточные шаги.

Вреде иссели

Замысел сводился к следующему риторическому вопросу.

Если каждая планета и звезда искривляют вокруг себя прилегающий кусочек пространственно-временного мира, то не деформируется ли полной совокупностью звезд и галактик все пространство — время Вселенной? И если да, то как?

Заранее ничего нельзя было сказать. Возможно, мир в целом ничуть не согнут, или искривлен лишь в отдельных малых участках — будто воронки крутятся тут и там на зеркальной водной глади. Так это или не так, могло сказать конкретное исследование.

И Эйнштейн решает задачу. Отказывается от нефизичного требования Шарлье — чтобы средняя плотность

вещества в пределе равнялась нулю. Пусть она составляет некую конечную величину — это естественнее. Отвергает и схемы Шарлье, они теперь не нужны. А взамен выдвигает тоже, правда, не очень справедливое на первый взгляд предположение: материя распределена во Вселенной равномерно, без сгущений и пустот, словно сплошной, всюду одинаковый, непрерывный кисель. Зачем это?

Не думайте, что Эйнштейн позабыл об атомах, звездах, галактиках и прочих вездесущих комках материи. Нет, он просто представил себе, что, начиная с каких-то громадных объемов, «зернистость» Вселенной становится несущественной в формировании пространства — времени. И тогда плотность материи не меняется при еще большем увеличении этих объемов. Ведь и обыкновенный клюквенный кисель, как известно, не непрерывен, а состоит из молекул. Но мы воспринимаем его как сплошную жижу. Подобно этому, звезды и галактики — нечто вроде молекул всезаполняющего вселенского «киселя» — «космологического субстрата».

Так задача была облегчена. В достаточно крупных масштабах гипотетическая кривизна мира становилась величиной постоянной, повсюду одинаковой.

Но понять ее характер, вычислить ее было необычайно сложно.

Решение никак не получалось. Не удалось найти неизменный «радиус кривизны» всего мира. Вселенная выходила какой-то зыбкой, нестабильной.

Тут-то Эйнштейн и допустил оплошность, за которую впоследствии сам себя изрядно поругивал. По традиции предков он прибег к услугам... Атласа. Навязал природе нечто неведомое, придуманное специально для того, чтобы уравнения можно было решить так, как хотелось их автору.

Математический Атлас

На должность Атласа, держащего мир в целостности и сохранности, была принята всего лишь маленькая закорючка, добавленная Эйнштейном в выражение фундаментального метрического тензора для всего мира. Она именовалась «космологической постоянной» или «лямб-

да-членом». Этот математический символ (греческая буква λ — лямбда, отсюда название), внесенный в метрические коэффициенты, так скорректировал теоретически вычисляемую кривизну пространства — времени, что стала возможна ее стабильность, независимость от времени. Этого и хотел Эйнштейн. Так он достиг целостности, постоянства своей модели мироздания.

На языке Ньютона наличие лямбда-члена означало весьма много: произвольно признавалось, что в большой Вселенной существуют, помимо тяготения, еще какие-то другие силы. Они-де и гарантируют сохранность мира.

И впрямь вышел невидимый вездесущий богатырь, держащий на плечах само небо! Он не дает звездам падать друг на друга, бережет их, сдерживает. Чем не Атлас!

Этой-то ценой и заплатил Эйнштейн за свою модель Вселенной. Но она вышла конечной, а не бесконечной, как у Ньютона. Ее пространство — замкнутым, как в шарике Пуанкаре со страницы 223. Шагая прямо вперед, мы в этом мире обязательно вернулись бы в точку старта, хоть она и поднялась бы «вверх по времени», так как время для всей Вселенной было единым и неизменно равномерным. Брошенный камень, двигаясь по инерции, не покрыл бы путь больший, чем «вокруг Вселенной». Так же повел бы себя и световой луч: яркую звезду можно было бы увидеть сразу впереди и сзади,



в диаметрально противоположном направлении — в виде слабенькой звездочки. Появилась надежда даже найти на небе такие «задние» изображения ярких звезд (их хотели отождествить по сходству спектров). Ничего, однако, найти не удалось.

В модели Эйнштейна, как и в шаре Пуанкаре, отсутствовали достижимые изнутри границы, «обрывы» пространства.

Всюду, следуя давнишнему совету Лукреция Кара и других античных мудрецов, можно было «бросить копье» — оно полетело бы вперед, что доказало бы отсутствие каких бы то ни было границ. (Пользуюсь случаем восхититься простотой и остроумием этого древнего рецепта проверки пространства «на безграничность».)

В беспредельном, но конечном мире Эйнштейна любая точка могла считаться центром пространства. Делались попытки вычислить «радиус кривизны» этого мира, подсчитать его объем, полную массу материи в эйнштейновской Вселенной, даже полное количество ее звезд и прочих материальных тел¹.

Звезд тут и в самом деле должна была набраться всего «горсть», большая, но конечная. И поэтому казалось, что наконец-то фотометрический парадокс разрешился, нашлось разумное объяснение ночной темноты: разумеется, конечное число звезд не создало бы бесконечного обилия света.

Однако за эту «разгадку» было заплачено слишком уж дорого — признанием существования в природе неведомых космических сил (в лице лямбда-члена), придуманных специально для того, чтобы получить приемлемое для Эйнштейна решение мировых уравнений. Пусть конечность и неизвестные силы, лишь бы мир не менялся во времени, — вот девиз этой модели.

¹ Согласившись с идеей конечного мироздания, Эддингтон занялся подсчетом всех элементарных частиц Вселенной и опубликовал маловразумительное число: 15 747 724 136 275 002 577 605 653 961 555 468 144 714 914 527 116 709 366 231 425 076 185 631 031 296 штук протонов и столько же электронов! Любопытно, что, когда, кроме протонов и электронов, в природе нашлись еще нейтроны (открытые в 1932 году), Эддингтон вынужден был подправить свои вычисления и объявил новое число частиц Вселенной, оказавшееся на четверть меньше (!) первого.

Материю—по углам

Сразу же вслед за Эйнштейном (это было в 1917 году) другую модель построил его датский последователь профессор де Ситтер. Он отыскал новое решение системы мировых уравнений — опять с космологической постоянной, но без всяких условий о состоянии и плотности вещества. Это было теоретическое исследование *пустой* Вселенной. Она тоже вышла конечной. Призрак Атласа, обернувшийся лямбда-членом, согнул ее и запер. Но тут вместе с пространством искривилось время. Ход часов стал замедляться с удалением от наблюдателя, и «на горизонте мира» полностью тормозился.

Когда прикинули, что будет с веществом, если осторожно внести его в пустой мир де Ситтера, уравнения дали любопытный ответ: материя сосредоточится в периферийных областях пространства — времени. В центре (возле наблюдателя) ее не будет. Эддингтон заметил по этому поводу, что у де Ситтера «вещество разметено по углам Вселенной». И роль уборщика сыграла все та же искусственно привнесенная космологическая постоянная. На сей раз призрак Атласа исполнил обязанности дворника!

В начале двадцатых годов обе модели подробно изучались. Постепенно в них обнаруживались изъяны — и те, о которых я уже сказал, и другие. В том числе главный: ни Эйнштейн, ни де Ситтер не добились, оказывается, того, к чему стремились. Постоянства, неизбытности Вселенной не устроилось, несмотря на рискованное введение лямбда-члена.

В модели Эйнштейна равновесие мира, как выяснилось, было очень неустойчивым, как у тарелки на острие ножа. Стоило где-то в равномерном «киселе» вещества объявиться случайному сгущению, оно обязано было расти лавиной, и мир летел кувырком, разваливался на куски.

У де Ситтера же демонстрировались печальные последствия — пустынная, чисто выметенная Вселенная, в которой если и есть немного вещества, то оно убрано подальше от наблюдателя и сковано кандалами вечности.

Все это очень и очень сомнительно. Как ни говорите, космическая материя мало схожа с киселем. Всюду

комки вещества, и они, по всей видимости, не покушаются на стройность Вселенной. Не заметно и абсолютной пустоты. Словом, нет признаков, что модели Эйнштейна и де Ситтера близки к реальному мирозданию.

Доктрина неподвижности

Почему же вышло так нескладно? Могло ли сразу получиться лучше?

Наверное, не могло. Не мог Эйнштейн дать другого решения. Видимо, даже он, ниспровергатель абсолютов классики, не был способен сразу отречься от бесспорной, как тогда казалось, очевидности — монументально-го покоя звездной Вселенной.

Причинам к такому отказу неоткуда было взяться. Их не давала астрономия, всюду в космических далях она находила неподвижность, подтверждая древнюю веру людей в монументальную неизменность мироздания. Эта вера, продиктованная памятью бесчисленных поколений, подкрепленная каждым взглядом на небо, стала аксиомой. Может быть, самой прочной и живучей аксиомой.

Отсюда, от этой твердой убежденности, и сделала первый шаг релятивистская космология. Другого пути никто не видел. Лишь задним числом, значительно позднее, профессор де Ситтер признал, что в ту пору «смутно чувствовалась» ограниченность такого подхода.

Но далее последовали новые шаги.

Мало-помалу идеи, метод Эйнштейна ушли из-под контроля гениального первооткрывателя, зажили новой, более свободной жизнью. И как закономерное следствие, в конце концов из уст исследователей прозвучал решительный отказ от аксиомы неподвижности мироздания.

Эволюция взглядов, правда, длилась долго. Лишь в наши дни окончательно пала крепость всемирной неподвижности.

А первый удар по ней нанес еще в двадцатые годы замечательный советский ученый Александр Александрович Фридман.

О нем, о его идеях — отдельный рассказ.

Глава 27. МИР — ВЗРЫВ

Математик, летчик, космолог

Кто такой Фридман?

Математик ответит:

— О, это тот, что еще гимназистом опубликовал серьезное исследование, автор бесчисленных математических работ...

Метеоролог скажет:

— Кроме того, он — создатель превосходной теории атмосферных циклонов, видный геофизик, организовавший и возглавивший у нас службу погоды. Отличный организатор, человек заразной активности...

Летчик добавит:

— Фридман был в рядах первых авиаторов, он энтузиаст воздухоплавания, участник рекордного исследовательского подъема на высоту 7400 метров. Вторым участником был знаменитый Федосеенко, погибший впоследствии вместе с двумя товарищами при штурме 22-километровой высоты...

Астроном или физик-теоретик заключит:

— Все это так. Но главная заслуга Фридмана — его работы в области космологии.

Да, этот человек был многогранен, разносторонне талантлив, очень деятелен. По складу характера — прямая противоположность Эйнштейну. Вместо заветной эйнштейновской тишины и уединения, вместо «башни из слоновой кости» (по мнению Эйнштейна — идеальное место для научной работы) у Фридмана — корзина аэростата, директорство в Аэрологической обсерватории, яростное воспитание молодых ученых. Он расценивал эту свою черту как недостаток, как склонность разбрасываться. Нарочно ограничивал себя, сдерживал в рамках главной увлеченности, которой считал геофизику атмосферы, теоретическую метеорологию. И сделал в этой области немало.

Но судьба распорядилась так, что самым высоким и прочным памятником Фридману стала именно побочная его работа, родившаяся из непреодолимого интереса к глубинной проблеме теоретической физики — релятивистской космологии. Верный поклонник и тонкий знаток общей теории относительности, Фридман сумел

по-своему решить эйнштейновскую систему мировых уравнений. В 1922 году он начал публиковать работы, в которых избавил релятивистский мир от окаменелого покоя, создал общепринятую ныне теорию расширяющейся Вселенной.

Он рано и нелепо умер — от брюшного тифа (в 1925 году, в возрасте 37 лет), ровно через два месяца после уникального и рискованного подъема на аэростате. И долго имя его как космолога оставалось в тени, потому что очень уж парадоксальной казалась выдвинутая им идея. Слава пришла к нему через несколько десятилетий после смерти.

Что равно нулю?

Как шел Фридман к своей теории, придется умолчать. Уместен лишь упрощенный пересказ логической канвы.

По Эйнштейну, из системы десяти мировых уравнений, написанных для Вселенной с «киселем» вещества (равномерным космологическим субстратом), удается извлечь одно. Левая его часть представляет собой произведение двух математических выражений, правая же, как положено в любых уравнениях, есть нуль. С начальных уроков алгебры вам известно: когда произведение равно нулю, обязательно равен нулю один из сомножителей. Вопрос заключается в том, какой именно. Какой сомножитель приравнять нулю?

Тут-то Эйнштейн и сделал выбор между движением и неподвижностью, отдав предпочтение последней. Он приравнял нулю тот из сомножителей, где содержалась величина, связанная со скоростью изменения средней плотности мировой материи. И отсюда, с помощью космологической постоянной, извлек свою модель стационарного замкнутого мира, ту самую, что оказалась по-то шаткой и ненадежной.

Фридман же, допустив в принципе нестационарность Вселенной, приравнял нулю другой сомножитель. И получил целый класс новых, неожиданных решений. Все они представляли собой математические функции, изменяющиеся с течением времени.

Здесь законен вопрос: а какого времени? Ведь если

материи во Вселенной позволено двигаться, то, надо думать, и времени разрешено претерпевать изменения вместе с движущейся материей — как того требует теория относительности. Можно ли тогда соблюсти строгость, рассуждая об изменении Вселенной в каком-то одном, едином времени? Не возрождается ли ньютоновская абсолютность?

Да, можно. Нет, не возрождается.

Положение спасает эйнштейновский моллюск — деформирующаяся система отсчета. В каждой точке однородной, лишенной крупных потоков и вихрей, Вселенной мы вправе представить себе моллюск, неподвижный относительно ближайших космических окрестностей — так называемые сопутствующие координаты. В них последовательность мировых событий едина. А потому каждый наблюдатель, покоящийся относительно сопутствующих координат, может пользоваться собственным временем для всей Вселенной. Строение и поведение моллюска как раз и дает космологическую модель мира.

Пульс мира

Фридмановские модели не могли не двигаться. Мир с необходимостью обрел динамизм. Как же решался вопрос о его конечности или бесконечности?

Допускались обе эти возможности — дело зависело от средней плотности материи. При большой средней плотности вышел мир конечный и пульсирующий, как сердце. Такова *закрытая* космологическая модель Фридмана. А при малой средней плотности из уравнений вставала *открытая* модель — бесконечная, способная либо расширяться, либо сжиматься. Причем во всех случаях тем быстрее, чем дальше от наблюдателя.

Эта особенность фридмановских моделей трудновата для наглядного представления: кажется нелепостью расширение сразу изо всех точек или сжатие сразу ко всем точкам (потому что в каждой может находиться наблюдатель). Но надо вспомнить, что речь идет не о движении тел в пространстве — времени, а о деформации самого пространства — времени, самой системы отсчета (моллюска), о преобразовании действующих

там метрических правил: чем дальше, тем заметнее становятся изменения метрики. Прочувствуйте это хорошо, вспомнив сказанное раньше о неевклидовой геометрии,— и будет, я думаю, понятно.

А вот наиболее существенное. В теории Фридмана впервые в истории космологии полностью отсутствовало что-либо специально придуманное, искусственно привнесенное, вроде космологической постоянной, сыгравшей у Эйнштейна и де Ситтера роль Атласа — вседержителя небес и звездного подметальщика. Прямо от земной физики, и только от нее,— ко всему миру. От падающего камня, от розетки Меркурия, от светового луча, согнувшегося возле Солнца,— к безбрежным сонмам галактик. Нет в природе вещей, недоступных взгляду махонькой человеческой науки,— вот что было неявно заявлено в трудах Фридмана. Весь мир, все глубины его познаваемы с крошки Земли!

Изменение гения

Эйнштейн к решениям Фридмана отнесся ворчливо. Посчитал их неверными. Был недоволен, написал опровержение в журнал, где они были напечатаны.

Фридман послал Эйнштейну письмо, в котором вежливо спорил. Доказывал свое. Потом с Эйнштейном встретились коллеги Фридмана, советские ученые, работавшие тогда в Германии, и тоже старательно убеждали великого физика.

В конце концов произошло уникальное в эйнштейновской биографии, хоть и закономерное событие: самокритичный, ироничный, чуждый важничанья и упрямства, Эйнштейн признал свою неправоту. Признал безупречную верность решений Фридмана. Извинился перед Фридманом и потом во многих своих статьях ссылался на его исследование.

А как же с космологической постоянной? Дошло до того, что Эйнштейн публично отрекся от нее, как праведник от бесовского наваждения. И объявил ее самой большой из всех ошибок, когда-либо им совершенных.

После этого три фридмановские модели Вселенной — конечная пульсирующая, бесконечная сжимающаяся и бесконечная расширяющаяся — начали жизнь в науке.

Сразу встал вопрос: какой из моделей отдать предпочтение, какая ближе к реальности?

Дилемма решалась на основании конкретных наблюдений и вычислений.

„Комната“ космоса

Во-первых, тип модели — открыта она или закрыта? Бесконечна или конечна? Для ответа надо узнать среднюю плотность вещества в нашем мире. И вот тут пора сделать очень серьезную оговорку.

В ходе космологических рассуждений нам понадобилось выяснить среднюю плотность мирового вещества, то есть сделать, по существу, физический опыт. Но исполнить его даже в принципе мыслимо лишь там, куда мы в состоянии заглянуть через астрономические инструменты или поставить прибор, а значит, в пределах *нашего* пространственно-временного мира. Поэтому все выводы относятся лишь к доступной нам (хотя бы в принципе) пространственно-временной «комнате» космоса. Ее называют обычно Метагалактикой или Мегамиром.

Быть может, есть в неисчерпаемой Вселенной и другие миры, другие пространственно-временные «комнаты». В этом допущении нет ничего мистического. Другой мир — отнюдь не потусторонний мир. Он вполне материален, так же как и наш. Но оттуда к нам невозможно *принести* прибор. И туда от нас нельзя добраться даже за вечность нашего времени. Подобно тому как обитатель «шара Пуанкаре» не в состоянии выйти из него и вынести что-нибудь за его пределы.

Сегодня еще никто не доказал достоверность существования других миров. Разговоры о них — только предположения. Но ради осторожности надо иметь в виду: когда произносятся слова «мир», «мироздание», «Вселенная», речь идет о Метагалактике или Мегамире.

Открыта или закрыта?

Итак, прикидываем массу звезд и темного космического вещества в доступном астрономическому взгляду участке мироздания, делим на объем этого участка...

Если получится больше, чем $2 \cdot 10^{-29}$ грамма на кубический сантиметр, значит, мир замкнут. Всюду в нем положительная кривизна длиннейших четырехмерных световых и геодезических линий (вспомните еще раз меридианы на глобусе), ограниченное количество вещества и света. Из такого мира нет «выхода», хоть нет у него и границ — обитатели его находятся в положении жителей четырехмерного «шара Пуанкаре». По Фридману, такая безграничная, но конечная модель, как сказано выше, медленно пульсирует.

Если же средняя плотность материи меньше, чем $2 \cdot 10^{-29}$ грамма на кубический сантиметр, выходит на сцену открытая модель. Кривизна длиннейших четырехмерных геодезических отрицательна (как кратчайших трехмерных на седле или граммофонном раструбе). И — либо сжатие, либо расширение.

Что же по этому поводу говорят астрономы?

Сегодня никто не рискует назвать достоверную цифру средней плотности вещества. Выходит близко к пограничной величине, но больше или меньше ее — неизвестно. Еще не так давно многие склонялись все же к бесконечной модели. Плотности как будто чуть-чуть не хватало, чтобы замкнуть ее. Но в последние годы физики пришли к мнению, что заметная доля мировой материи существует, быть может, в форме, недоступной пока телескопам и потому выпадающей из поля зрения астрономов. Эту долю составляют неуловимые, невидимые и неосязаемые частицы под названием *нейтрино*. Они испускаются звездами вместе со светом, пронизывают все и вся, мчат сквозь планеты, сквозь любые толщи вещества, почти не взаимодействуя с ним, и несут довольно значительную энергию, следовательно — и массу.

Как много их? Достаточно ли, чтобы замкнуть, ограничить Вселенную?

Неизвестно.

Совсем недавно отыскалась в мире еще одна невидимая материальная субстанция — фотоны низких энергий (кванты сантиметровых радиоволн). Их тоже много, и они всюду. Но и этот «фотонный фон» (или «реликтовый свет» — причина этого названия будет объяснена позже) еще не «взвешен» по-настоящему.

Таким образом, остановить выбор на закрытой или

открытой модели пока нельзя. Не хватает данных. Космологи надеются, что их удастся раздобыть с развитием внеземной астрономии — при наблюдении Вселенной прямо из космоса, без помех земной атмосферы.

Все же вероятность замкнутости с открытием нейтрино и «фотонного фона» стала больше.

Уходящие галактики

Ну, а расширяется мир или сжимается?

Здесь ответ однозначен. Расширяется. Основание — знаменитое «красное смещение» линий спектра далеких галактик. Именно это открытие, которого, к сожалению, не дождался Фридман (оно было сделано через четыре года после его смерти американским астрономом Хэбблом), подняло исследование советского ученого от уровня более или менее вероятной гипотезы на почетный пьедестал достоверной космологической теории.

Хэббл установил знаменательный факт: спектральные линии света далеких галактик сдвинуты к красному концу спектра, и смещение тем значительнее, чем дальше галактика от нас. Тут-то и отыскалось прямое доказательство разбегания галактик, что легче всего было объяснить расширением самого мира, моллюска отсчета. Причем тем более быстрого расширения, чем оно дальше от наблюдателя, точно в соответствии с теоретическим предвидением Фридмана.

Ведь от удаляющегося источника к неподвижному наблюдателю световые волны приходят как бы растянутыми, их колебания — замедленными (вспомните опыт Паунда и Ребки). Уменьшается частота — значит, меняется цвет излучения, линии спектра сдвигаются к низкочастотному — красному — его краю. Словно поезда с фонариками на хвостовых вагонах, уходят от нас звездные города, влекомые расширяющимся миром. И сигнализируют об этом красным смещением своих спектральных линий. Темп расширения установлен. Галактики, находящиеся от нас за три миллиона световых лет, убегают, по современным данным, со скоростью 75 километров в секунду, вдвое более далекие — вдвое быстрее и т. д.

С этой точки зрения находит, наконец, естественное

и очень простое объяснение ночная тьма. Из парадокса она превращается в закономерную необходимость, присущую даже бесконечному миру с бесконечным числом галактик, расположенных как угодно. Лишь бы было расширение. Потому что от далеких галактик, несущихся прочь от наблюдателя с колоссальными скоростями, вместо света должны приходиться невидимые излучения малой частоты — инфракрасные лучи, радиоволны, то есть темнота. Может быть, «чуть тепленькая» темнота и еле слышный «контрабасовый» радиосум. От самых же далеких — бесконечно длинные волны, бесконечно медленные колебания и, значит, полное отсутствие энергии — холодная тьма, мертвая тишина.

Таков в общих чертах современный взгляд науки на современное состояние Вселенной. Интересен также взгляд в прошлое мироздания.

Сколько лет Мегаширу?

«Вопреки обычному мнению, предсказывать в науке будущее несравненно легче, чем восстанавливать историю», — сказал однажды профессор Я. А. Смородинский, ободрив тем самым историков вообще, и историков природы в частности.

Но труднее — значит, любопытнее. Вероятно, поэтому о прошлом Вселенной высказано несколько оригинальных гипотез. Эта ветвь научного значения — самая, пожалуй, дерзкая, самая близкая к философии, самая антимистическая. Сейчас вы с ней немножко познакомитесь.

Многие ученые твердо убеждены в том, что если ныне Метагалактика расширяется, то когда-то она была еще не расширившейся — катастрофически сжатой, с качественно иным состоянием пространства — времени и материи. Как давно это было, судить можно. По современному темпу разбегания галактик, расстояниям до них, при внесении кое-каких поправок и допущений возраст наблюдаемого нами состояния Вселенной оценивается примерно в 10—15 миллиардов лет.

Это не так уж много, если вспомнить, что, по словам геологов, возраст Земли составляет 5—6 миллиардов лет, и Солнце, по мнению астрофизиков, живет тоже 5—6 миллиардов лет.

Так что же представляла собой наша «комната» мироздания в начале ее бытия?

Какие процессы там разворачивались? Можно ли восстановить их сегодня?

Кухня вещества

Как явствует из одной фантастически-шутливой телевизионной пьесы Станислава Лема, в Галактике действует некий «Лик», занимающийся «размещиванием» мировой материи (чтобы она «не подгорела»). Так вот, хоть «Лик» нашему миру, разумеется, не нужен (так же как «вседержитель Атлас» и прочие небесные деятели, шуточные и нешуточные), однако его работа осуществляется. Сама собой. Потому что «мировой кисель» не только отлично сварен, но и тщательно размешан. Всюду состав вещества неизменен. В любом уголке мира — одинаковое соотношение атомов разных сортов. Астрономы в этом убедились после многолетних наблюдений звездных и других спектров.

Больше всего в мире водорода, заметно меньше, но тоже много, гелия, а затем идут в определенной последовательности остальные элементы периодической системы Менделеева.

Эта четкая дозировка (известная пока, правда, довольно приблизительно) служит ключом к расшифровке начала начал мироздания. Проблема формулируется так: понять, каков мог быть исходный, лишенный современного простора, сверхсжатый мир, чтобы его расширение вызвало к жизни нынешние формы материи в их современном процентном отношении. Другими словами, надо угадать, из какого «сырья» и как некогда синтезировалось вещество Вселенной.

С первой гипотезой выступил в 1949 году американский физик Георгий Гамов. Его идея: сырье было жидкостью, спрессованной из нейтронов и света.

Основание для гипотезы такое. Материя нашего мира в целом электрически нейтральна, а потому резонно предположить, что первичное сырье для нее было составлено из самых распространенных нейтральных частиц — нейтронов и фотонов. К тому же в свободном состоянии нейтрон нестабилен — за 1000 секунд поло-

вина таких частиц распадается, обращаясь в протоны и электроны (да еще антинейтрино). А из протонов, нейтронов и электронов построены все атомы.

Вот гамовский вариант «варки вещества».

В «дозвездном» состоянии мира сжатые нейтроны были несвободны и не могли распадаться (при этом Метагалактика умещалась в объеме нескольких кубических сантиметров). Как только началось расширение, нейтроны получили свободу и стали распадаться. Рождались протоны и электроны. Новорожденные протоны соединялись с еще не распавшимися нейтронами. Так возникли атомные ядра. Они захватывали электроны — творились атомы. Разные — в зависимости от числа протонов и нейтронов, образовавших атомные ядра, в основном водорода и гелия. За несколько минут сформировалось все «легкое» вещество нашего мира.

Горячий или холодный?

На бумаге сперва все выглядело благополучно. Но подробный разбор гипотезы внес сомнения. В описанной картине «вселенской кухни» не вышло современного соотношения элементов. Даже основных. Избыток изначальных нейтронов и нехватка новорожденных протонов привели бы к острому недостатку в мировой материи водорода (ведь атомные ядра водорода — это просто протоны, которые, по Гамову, отсутствовали в первичной материи). Гелия же, наоборот, должно было «свариться» больше, чем есть на самом деле (потому что мириады нераспавшихся нейтронов жадно соединялись бы с только что возникшими протонами). А из гелия водород самопроизвольно выделиться не мог — по той же примерно причине, по которой из золы не может само собой воскреснуть березовое полено.

К тому же гамовский мир в «только что приготовленном виде» был очень горячим. Температура там достигала миллиарда градусов. Гигантская энергия в виде света, гамма- и рентгеновых лучей обязана была затопить новорожденное пространство лучистыми потоками. А потому и сегодня в космосе должно присутствовать много света — гораздо больше, чем, казалось бы, есть на самом деле.

Эти соображения заставили ученых усомниться в идее Гамова. Были выдвинуты другие гипотезы. В частности, наш академик Я. Б. Зельдович опубликовал вариант «холодного» формирования вещества. У Зельдовича в качестве сырья вместо света и нейтронов предлагались протоны, электроны и нейтрино, а нейтроны возникали в начале расширения из-за «уменьшения тесноты». Когда стало посвободнее, электроны «впрыгнули» в протоны (куда прежде, пока было «тесно», их «не пускали» нейтрино). Вот и получились нейтроны.

Против этого варианта трудно было спорить, тем более что он дал более точное соблюдение процентного состава синтезировавшихся элементов.

И все же идея «горячего мира» сейчас признается более правдоподобной. Дело решилось совсем недавно — после открытия уже упоминавшегося «фотонного фона», или, иначе, «реликтового света» (какой, кстати, красивый термин!). Именно он, то есть вездесущие кванты сантиметровых радиоволн, разгуливающие по нашей Вселенной, и является собой реликт, остаток, ослабленный след грандиозной лучистой вспышки первичного мирового взрыва.

За миллиарды лет очень энергичные кванты потеряли энергию и частоту — ведь они много раз поглощались и излучались, место их рождения стремительно удалялось от всех точек нашего «взрывающегося» мира. Вместе с частотой благодаря расширению Мегамира уменьшилась и плотность излучения первичной вспышки. Значит, снизилась его температура. Сейчас в расширившейся Метагалактике от бывшего миллиарда градусов осталось всего около трех (выше абсолютного нуля).

Поразительнейший факт! Сегодня мы «принимаем по радио» первовспышку своего мира! Фигурально выражаясь, чувствуем отблеск совсем юной Метагалактики, находившейся в «младенческом» возрасте — вскоре после ее бурного рождения! Правда, это «вскоре» составляет сотни тысячелетий — лишь через такой срок взорвавшийся бурлящий мир обрел прозрачность.

Для полной реабилитации гипотезы «горячего взрыва» надо, правда, исправить гамовскую ошибку в оценке процентного состава синтезировавшихся атомов. Но это, как считают, дело поправимое. Возможно, в первичной «взрывчатке», кроме нейтронов и света, были и какие-то

другие частицы, что несколько изменило программу синтеза вещества. А может быть, астрономы, пристальнее изучив мировую материю, найдут-таки в ней невидимый сейчас, как-то «спрятанный» гелий. Подобное отнюдь не исключено — ведь очень долго и весьма успешно «прятался» от пронизательного взгляда ученых тот же реликтовый свет.

Во всяком случае, главное теперь общепризнано: наш мир некогда взорвался как бомба, это был «горячий, горячий, горячий мир». Потом он расширялся и остывал.

Прогноз на будущее

Подавляющее большинство новичков, усвоив вышеизложенное, незамедлительно стреляют залпом вопросов. Первый из них всегда такой:

— Что ждет нашу Вселенную в будущем?

Прогнозы составлены.

Если мир незамкнут, он будет вечно расширяться, только и всего.

Если мир замкнут, через многие миллиарды лет его расширение сменится сжатием. Галактики двинутся навстречу друг к другу, кривизна моллюска отсчета станет расти. Вероятнее всего, сжатие продлится до какого-то предела, до не очень тесного сближения галактик, а потом снова начнется расширение. (Этот вариант исследован в работах наших ученых Е. М. Лифшица, И. М. Халатникова, В. В. Судакова.)

Менее достоверен другой вариант, согласно которому начавшееся сжатие не остановится, пока не стянет Мегамир опять в точку. Как свидетельствует расчет, такое может случиться, лишь если мир обладает идеальной сферической симметрией. Это условие едва ли отвечает реальности. Все же некоторые ученые допускают впереди катастрофическое «захлопывание» мира.

Разумеется, столь бурный эпизод в истории мироздания не будет означать «конца света». Совершится лишь переход материи в иное состояние.

Более того, сохраняя верность оптимизму, можно, я думаю, не опасаться за судьбы разумных существ, которые доживут до тех далеких пор и овладеют высшим

знанием и могуществом. Какие-нибудь высокоразвитые цивилизации будущего сумеют, быть может, предотвратить надвигающееся «миротрясение» — хотя бы тем, что заранее нарушат симметрию сжимающейся Метагалактики (вот вам идея для умопомрачительного ультрафантастического романа).

Последний абзац уместен, конечно, лишь в сугубо несерьезной книжке — такой, как эта. Однако мне вспоминается кулуарный разговор двух молодых и темпераментных ученых между заседаниями одной космологической конференции. Оба выражали недовольство тем, что в нынешних гипотезах игнорируется роль возможного разумного вмешательства в судьбу Вселенной... Разумеется, вполне материального вмешательства, отнюдь не мистического.

До прошлого

Остается еще один существенный вопрос, обычно задаваемый начинающими любителями космологии:

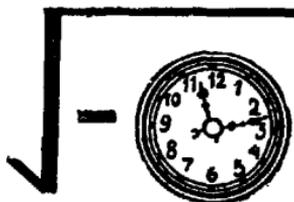
— А что было за секунду до первичного мирового взрыва? За год? За сто миллиардов лет?

До взрыва было, вероятно, очередное сжатие, до него — расширение, еще раньше, быть может, — опять-таки взрыв и т. д. Такой ответ допустим. Но в нем молчаливо признается возможность отсчета времени в какой-то внешней, не принадлежащей нашему миру, системе отсчета.

«Не выходя» же из нашей Метагалактики, подобный отсчет выполнить, строго говоря, невозможно.

Согласно решению Фридмана, время до начала расширения мира находилось, если воспользоваться терминами алгебры, под квадратным корнем и имело отрицательный знак. Оно было *мнимым*. Другими словами, его физически не существовало. Во всяком случае, в том понимании, которое использует наш физик.

Тут нет никакой мистики, никакой непознаваемости. Структура общей теории относительности такова, что ей доступны причинные связи только той формы физической



природы, какая есть. Пока мир хотя бы похож на современный, теория действует и может сказать очень многое. Но в качественно ином мире (а таким и было, конечно, это самое «прамироздание») действовали другие причинно-следственные связи, недоступные теории Эйнштейна, как и всей физике, привычной нам и выведенной из доступных нам явлений.

Ну, а откуда-то извне, из иного пространственно-временного мира, подобно нашему (и, разумеется, вполне материального), отсчитывать в том времени наши события, конечно, не возбраняется. Теоретически это можем делать и мы.

Вечности и бесконечности

Пожалуй, надо отдельно сказать о старой-престарой проблеме, поныне волнующей любознательных людей. О философской вечности и бесконечности природы. Иногда на эту тему случались бурные споры. Философы и физики говорили как бы на разных языках. Иные философы наотрез отказывались признать физические идеи о возможной конечности и невечности мира. Ссылаясь на авторитеты, приводя множество цитат, они безапелляционно объявляли физиков идеалистами: ведь невечность мира наводила мысль о «творце».

Физики, в свою очередь, ругали философов догматиками, ссылались на свою науку, призывали поглубже заняться космологией. Что касается идеализма, то он, как напоминали физики, пристегивался в свое время и к бесконечной Вселенной. Тот же Ньютон хотел отождествить божество с абсолютным пространством и математическим временем.

Но сейчас страсти, кажется, поутихли. Большинство философов-материалистов сумели понять физиков, большинство физиков согласилось с вдумчивыми философами.

Стало ясно, что физики, постигая структуру и историю мира, оперировали сугубо физическим пониманием пространства и времени, неразрывно связанным с системами отсчета механического движения. Потому-то выводы физиков относились лишь к одной «комнате» Вселенной — Метагалактике. А она, как выяснилось,

вправе быть и конечной и бесконечной, в зависимости от средней плотности вещества.

Причем, как доказал советский космолог А. Л. Зельманов, и бесконечный Мегамир совсем не обязательно покрывает всю Вселенную. Он может быть лишь частью мира другой системы отсчета. В этом смысле бесконечное вправе оказаться частичкой даже конечного. (Хочется вспомнить чеховскую шутку о бесконечном мире в дупле чьего-то зуба!)

Нам с вами известен пример явления, которому разрешено сразу быть вечным и мгновенным: уже говорилось, что сверхгигантское тяготение способно для удаленного наблюдателя растянуть секунду в вечность. Камень, падающий в таком тяготении, для удаленного наблюдателя сначала ускорялся бы, а потом *вечно* замедлялся (так как попадал бы в области все более замедленного времени). А для самого камня продолжалось бы ускоренное падение. Наша вечность соответствовала бы его мгновению!

Для кого-то моментально вспыхнувшая пылинка, для кого-то бесконечно долгий и безмерно огромный мир! Кое-кто даже допускает, что элементарные частицы — вроде «входов» в безграничные миры. Вот вам еще один вывод науки, который, пожалуй, фантастичнее профессиональной фантастики!..

Четкое понимание роли систем отсчета в оценке мироздания — это, видимо, главное, что помирило спорщиков.

Теперь философы признали за физиками право измерять и оценивать любые физические времена и пространства, от бесконечно малых до бесконечно больших. И судить о том, каковы длительности и размеры любых объектов — от электрона до Вселенной. Физики же, проникая в дали природы, согласились, что нет резона навязывать философии чисто физическое понимание систем отсчета. Идея неисчерпаемости мироздания ныне не оспаривается никем. Даже если наша Метагалактика окажется конечной, это отнюдь не подорвет утверждения о вечности, бесконечности, неисчерпаемости и безмерной сложности всей природы в целом. В обобщенном философском понимании этих слов.

О чем пришлось ужаснать

Вот так — торопливо, скомканно — я сообщил вам о начале Метагалактики и некоторых сопутствующих идеях. Достоверно, видимо, лишь то, что мир, ныне спокойный, около десяти — пятнадцати миллиардов лет тому назад был исполинским, практически мгновенным взрывом. Взрывом не разрушения, а созидания — созидания современной природы.

Этим, пожалуй, исчерпывается общепризнанное в создаваемой сейчас истории природы. Остальное — только предположения.

Метагалактическая космогония пока пробует силы. В арсенале ее еще много условного. Кое-кто из ученых считает ее поэтому спекулятивной, плохо обоснованной. Но фундамент ее надежен. Этот фундамент — космологические выводы теории относительности и физика микромира — поставлен на почву твердых фактов. Поэтому даже ворчуны и скептики из научного мира не отмахиваются от космогонических идей и серьезно их обсуждают. Поле же для дискуссий тут необозримо.

Многие из идей мне пришлось опустить. Например, не нашлось места рассказу о *сверхзвездах* — исполинских источниках лучистой энергии, которые находятся от нас в миллиардах световых лет. Быть может, некоторые сверхзвезды — это древнейшие сгустки «дозвездной» материи, «слепившиеся» из вещества, едва остывшего после первичного взрыва. Если так, то мы не только «слышим по радио», но и *видим* (разумеется, через хороший телескоп) величественную картину раннего детства Метагалактики.

Ни слова не сказано и о проблеме «устройства» пустоты, об античастицах и антимирах, ставших сегодня модной темой салонных разговоров и даже стихов. Оправдываюсь вескими причинами. Во-первых, для более или менее вразумительного рассказа тут понадобился бы тонкий разбор премудростей физики микромира, что поставило бы вдвое увеличить объем этой книжки (а редактор и так недоволен, что она вышла слишком толстой). Во-вторых, указанные идеи много раз описаны популяризаторами. В-третьих, уж слишком далеко ушли бы мы от исходного удивления падающему камню.

Ну, а теперь критически оглянемся назад.

Глава 28. ПОКАЯНИЕ И НАПУТСТВИЕ

Забывтое чудо

Это еще не очень огорчительно, что я не растолковал нечто уже описанное и объясненное в других книжках. Тревожнее нижеследующее.

Если мне, автору, послушаться голоса своей совести и быть до конца откровенным (что, конечно, необходимо при уважительном отношении к читателю), то придется объявить вам со смущением:

несмотря на то что мы с вами шумно ликовали, когда разгадали, следуя Эйнштейну, тайну падения жерновов и пушинок;

несмотря на то что от полноты чувств был даже включен духовой оркестр;

несмотря на то что из своей разгадки мы выудили любопытные известия о Вселенной — и о ее строении, и о ее истории...

Так вот, несмотря на все это, наше объяснение чуда падения тел было, строго говоря, неполным, неокончательным, половинчатым. Бегство от удивления камню, летящему с Пизанской башни, следует поэтому признать незаконченным. Вот в чем тут дело.

Суть разгадки, к которой мы в свое время добрались, заключалась в блистательной возможности свести тяготение к инерции. Это и было сделано. Но не было выяснено, что же такое сама инерция.

Может быть, кто-нибудь помнит, что в самом начале книжки, впервые произнеся слово «инерция», мы с вами согласились, что она — великое чудо природы. Тогда мы ничего в ней не объяснили, сказав только, что она определяется знаменитым первым законом Ньютона как способность тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Потом мы поняли, что измеряется инерция инертной массой, чуть-чуть коснулись сил инерции, а далее увлеклись явлением, которое показалось нам еще более странным, — тяготением, долго и подробно его разбирали, в конце концов свели его к инерции, позабыв (с моей стороны — умышленно), что и она все еще не объяснена, все еще остается чудом. И вот только теперь снова вспомнили о ней.

Вспомнили только затем, чтобы объявить: причины явления инерции до сих пор неизвестны науке.

Это надо немного пояснить.

Боготво не окончено

У Ньютона на свойстве инерции держалась «главная» мировая система отсчета (вспомните наш фантастический «аквариум»). Недаром она получила название *инерциальной*. Первый закон механики утвердил ее тем, что движение тел, не подверженных действию сил (то есть по инерции), признан прямолинейным (тут неявное узаконение евклидова абсолютного пространства) и равномерным (математическое время).

Эйнштейну единая инерциальная система отсчета не понадобилась. Вместо нее появился моллюск отсчета. Инерция же осталась и в основе моллюска. Правда, стала сложнее. Телу, свободно двигающемуся (а также падающему) по какой-то определенной геодезической линии, благодаря инерции предписывалось следовать далее только по этой линии. Так преобразился первый закон механики. Но и обновленный, он лишь признал существование инерции, не вскрыв ее причин.

Между тем физикам очень хочется понять наконец эти причины. Постичь, почему телу, находящемуся вдали от тяготеющих масс, в равной мере разрешено покоиться и двигаться прямо и равномерно. Почему, падая, оно может пребывать на любой геодезической линии, но ни на йоту не должно смещаться с нее.

Я уже сообщал вам: в прошлом веке некоторые физики думали, что в свойстве инерции заключена связь любого тела со всем миром, что даже на самое удаленное тело действует совокупность звезд—и это их совместное влияние есть инерция. Красивая, очень привлекательная идея.

Но когда пришел Эйнштейн и звездам, галактикам была отдана огромная роль в формировании мира (вспомните наши космологические экскурсы), инерция все равно осталась необъясненной. По очень простой причине: согласно общей теории относительности, она остается и в абсолютно пустом пространстве (ибо там не исчезает, а лишь выпрямляется моллюск отсчета).

«Захваты», запрещающие камню ускоряться или останавливаться, должны действовать и без звезд. Другими словами, и в идеально «выметенной» Вселенной мы будем чувствовать перегрузки в набирающем скорость звездолете.

Постичь инерцию призвана новая, еще не родившаяся теория, которая еще глубже проникнет в физическую суть вещей, чем гениальная общая теория относительности Эйнштейна.

Но пока неизбежно следующее резюме. Поскольку инерция, к которой у Эйнштейна сведено тяготение, осталась непонятой, от удивления падающему камню мы так-таки не убежали, несмотря на все старания.

Ничего не поделаешь, возле этого простейшего явления пока стоит в недоумении сама наука. И готовится к новому рывку в беге познания. Чтобы потом встали на очередь следующие удивления, следующие рывки...

Долго ли ей бежать?

Я думаю, всегда.

И это, пожалуй, совсем неплохо.

Бегство от удивлений — отличное занятие!



Оглавление

Приглашение к бегству	3
---------------------------------	---

Часть первая. УДИВЛЕНИЕ ПАДЕНИЮ

Глава 1. Камень и пушица	5
Глава 2. Что такое инерция	16
Глава 3. Что такое движение	33
Глава 4. Могущество механики	41
Глава 5. Зоркий маятник	55
Глава 6. Царица мира	63

Часть вторая. УДИВЛЕНИЕ БЫСТРОТЕ

Глава 7. Самый большой аквариум	75
Глава 8. Свет и эфир	84
Глава 9. Постулаты Эйнштейна	95
Глава 10. Следствия — после причин	104
Глава 11. Сверхбыстрые приключения	120
Глава 12. На языке графиков	133
Глава 13. Говорят диаграммы	146
Глава 14. В прошлое путь закрыт	155
Глава 15. Энергия, спрятанная в веществе	163
Глава 16. Сейфы энергии	172

Часть третья. УДИВЛЕНИЕ ТЯГОТЕНИЮ

Глава 17. Как изготовить тяжесть	180
Глава 18. Сомнения и возражения	187
Глава 19. На вращающемся стадо	198
Глава 20. Сюрпризы инерции	205
Глава 21. Вдоль поверхности	210
Глава 22. Вдоль пространства	219
Глава 23. Вдоль мира	226
Глава 24. Почему падает камень	234

Часть четвертая. УДИВЛЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Глава 25. Повиновение Эйнштейну	245
Глава 26. В поисках покоя	258
Глава 27. Мнр — взрыв	269
Глава 28. Покаяние и напутствие	285

Для старшего возраста

Глеб Борисович Анфилов. БЕГСТВО ОТ УДИВЛЕНИЯ

Научно-художественная литература

Ответственный редактор *В. С. Мальт*. Художественный редактор *Л. Д. Блюков*. Технический редактор *И. Л. Колодная*. Корректоры *Л. М. Дмитриков* и *В. И. Дод*. Сдано в набор 4/IX 1973 г. Подписано к печати 1/II 1974 г. Формат 84×108¹/₂. Бум. типогр. № 1. Печ. л. 9. Усл. печ. л. 15,12. Уч.-изд. л. 14,89. Тираж 100 000 экз. А03668. Заказ № 1293. Цена 61 коп. Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Детская литература». Москва, Центр, М. Черкасский пер. Издана Трудового Красного Знамени фабрика «Детская книга» № 1 Рославлополиграфпрома Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. Москва. Суэцкий вал, 49.