

530.1
С-516



Я. А. СМОРОДИНСКИЙ

ГЕОМЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

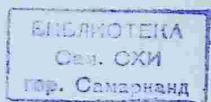


4 IX СЕРИЯ · ФИЗИКА И ХИМИЯ · 1963

Я. А. СМОРОДИНСКИЙ

530.1
С 516

ГЕОМЕТРИЯ
ВСЕЛЕННОЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Всесоюзного общества по распространению
политических и научных знаний

Москва 1963

бр 12.799

7

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Геометрия в физике	3
Расстояния и скорости	5
Опыт Майкельсона	6
Пространство и время	8
Геометрия Минковского	10
Парадоксы часов и волчка	14
Сила тяжести и тяготение	18
Физика невесомости	22
Кривизна пространства	26
Три опыта	31
Геометрия Вселенной	37
Разбегание туманностей	40
Плотность вещества во Вселенной	43
Нейтрино во Вселенной	44
Тяготение и элементарные частицы	45
Эволюция Вселенной	46

Автор
Яков Абрамович
Смородинский

Редактор И. Б. Файнбойм
Техн. редактор И. Т. Ракитин
Корректор В. Н. Никитина
Обложка А. Г. Кузнецова

Сдано в набор 23.I 1963 г. Подписано к печати 8.III 1963 г. Изд. № 68
 Формат бум. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,87.
 А 04048. Цена 9 коп. Тираж 47.000 экз. Заказ 239
 Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

«...Философия написана в той величественной книге, которая постоянно лежит у нас перед глазами, — я имею в виду вселенную, — но которую невозможно понять, если не научиться предварительно ее языку и не узнать те письмена, которыми она написана; ее язык — язык математики, и эти письмена суть треугольники, окружности, без помощи которых в ней невозможно понять хотя бы единое слово; без них мы можем только крутиться по темному лабиринту...»

Галилей, 1623 г.

ГЕОМЕТРИЯ В ФИЗИКЕ

В конце прошлого века люди поняли, что теоремы геометрии надо проверять на опыте, так же как проверяют любые законы физики — закон Ома, закон тяготения Ньютона, уравнения гидродинамики и многие другие.

Это было великим событием. Более двух тысяч лет назад Евклид построил систему геометрии. Ее стройность и неопровержимость составляли основу — «символ веры» многих поколений. Никто не сомневался в том, что геометрия Евклида есть единственно возможная система теорем, описывающих взаимные соотношения таких простых объектов, как точка, линия, фигура, тело. Понятия геометрии легко отождествлялись с наблюдаемыми объектами, и хотя уже геометрической точке лишь приближенно можно было сопоставить точку физическую, интуитивно казалось очевидным, что такая идеализация не нарушает основных соотношений геометрии.

Геометрические объекты, с которыми встречаются на практике, и те, с которыми имеет дело геометрия, казались тождественными. В этом смысле все считали само собой разумеющимся, что геометрия физическая и геометрия Евклида одинаковы по своей структуре (сейчас бы мы говорили — изоморфны).

Отождествление двух геометрий укрепило убеждение в том, что другой геометрии не может быть построено даже формально. Отсюда возникло и обратное утверждение, что геометрия физического мира и есть единственно возможная геометрия Евклида.

При таком положении не могло возникнуть даже желания проверить законы геометрии. Нечто похожее происходило когда-то и в механике. Нужно было родиться Галилею, чтобы возник вопрос об опытной проверке закона Аристотеля, схема которого казалась логически совершенной.

Лишь через 200 лет после Галилея великий казанец Николай Лобачевский обнаружил, что могут существовать многие

различные системы аксиом, приводящие к совершенно другим геометриям. Сходные идеи возникли у венгерского математика Больяи и особенно у немецкого математика Гаусса, идеи которого оставили глубокий след во всей математике XIX века.

Гаусс признавался, что он просто не решался публиковать свои исследования. Лобачевский был встречен насмешками. Полезно отметить, что основным аргументом против нового открытия была его непонятность. Один из математиков, весьма именитых, издававшихся над книгой Лобачевского, в журнале «Сын Отечества» в 1834 г. писал в свое оправдание: «Многие из первоклассных наших математиков читали ее и ничего не понимали. После сего уже не считаю нужным упоминать, что и я, продумав над сею книгой несколько времени, ничего не придумал, т. е. не понял почти ни одной мысли...» Отсюда делался общий в таких спорах вывод, что теория неверная. Но история делала свое дело: критики остались достоянием анекдотов, а великие открытия завоевывали мир.

После Лобачевского никто уже не мог остановить беспокойную мысль исследователя: вопрос о том, какая же из многих возможных геометрий есть геометрия реального мира, хотя и медленно, но все больше и больше овладевал умами естествоиспытателей. Гаусс даже пытался безуспешно найти отличие суммы углов большого треугольника (со сторонами в десятки километров) от 180° .

В 1854 г. в Геттингене (Германия) в зале университета, в котором присутствовал и Гаусс, прочел свою первую пробную лекцию Риман, лекцию, ставшую потом знаменитой. В ней уже с полной ясностью было сказано, что свойства пространства должны быть изучены на опыте. Но, заканчивая, Риман сказал: «Здесь мы стоим на пороге области, принадлежащей другой науке — физике, и переступать его не дает нам повода сегодняшний день...» В науке не было фактов, которые требовали новых взглядов, и граница между двумя науками оставалась непройденной.

Порог этот переступил через 50 лет Альберт Эйнштейн. Лишь после открытия в 1905 г. специального и особенно еще через 9 лет общего принципа относительности геометрия нашего окружения — геометрия Вселенной стала предметом физики. Сейчас физики и астрономы собрали уже много данных о геометрических свойствах Вселенной. Рассказать о них и ставит себе задачу эта книжка.

Но рассказывая о новых и непривычных даже современному читателю вещах, мы будем предполагать, что у него нет сомнений в справедливости специальной теории относительности, законов постоянства скорости света, и мы не будем тратить время на споры по этому поводу. До сих пор есть люди, не верящие в шарообразность Земли, еще есть люди, не принимающие теорию относительности. Не к ним адресована эта книга. Здесь

будет говорить уже о выводах теории относительности и о некоторых гипотезах, которые составляют сейчас содержание геометрических исследований в физике.

РАССТОЯНИЯ И СКОРОСТИ

Говоря об окружающей нас геометрии, мы обычно понимаем, что линии и фигуры, нарисованные в пространстве, обладают свойствами евклидовых линий и фигур. Так, мы считаем, что сумма углов треугольника равна 180° , что параллельные линии имеют общий перпендикуляр, что два треугольника с попарно равными углами подобны и т. д. Это все, конечно, верно, но мы все же должны задуматься над тем, что мы называем точкой и линией. С понятием точки кажется все простым; если размеры пятнышка очень малы по сравнению с другими размерами, которые встречаются в опыте, то можно считать пятнышко точкой, не имеющей размеров.

Труднее дело обстоит уже с прямой линией, отрезок которой определяет расстояние между двумя точками. Как провести прямую линию? Или как проверить, что нарисованная линия прямая? Сравнить ее с краем линейки? Но как убедиться, что линейка правильная?

Можно предложить три способа. Первый: сравнить прямую с лучом света — направить свет вдоль этой прямой и убедиться, что свет не отклонится от прямой. Этот способ однако предполагает, что свет распространяется по прямой линии, что само по себе правильно, если постулировать справедливость электродинамики. Можно назвать прямой линией путь тела, которое движется по инерции. Но как узнать, что на тело не действует никакая сила? Это можно установить только зная, что тело движется по прямой (и, кроме того, постулировав справедливость механики).

Можно, казалось бы, поступить совсем просто — построить прямую, натянув веревку между двумя точками, но и здесь надо быть уверенным, что никакая сила не оттягивает веревку в сторону. Какой бы способ мы ни предлагали, построить физическую прямую линию, не используя законов физики, невозможно!

Геометрия оказывается переплетенной с разными частями физики, и без их знания сам вопрос о том, какая из геометрических реальна, а какая нет, — теряет смысл. Геометрия, однако, сталкивается с механикой не только тогда, когда надо строить прямую линию. С геометрией приходится иметь дело и при определении правила, по которому надо складывать, например скорости. Если пароход идет по реке с некоторой скоростью вдоль берега, а по палубе бежит собака, то скорость собаки относительно берега определяется как вектор-

ная сумма скорости собаки и скорости парохода, т. е. эти две скорости складываются по правилу параллелограмма.

Возникает законный вопрос, откуда берется это правило? Мы знаем, что так надо складывать расстояния в евклидовой геометрии: расстояние между углами книги по диагонали равно векторной сумме ее ширины и высоты. Но допустив, что то же правило справедливо для векторов скоростей, мы уже делаем новое предположение о том, что скорости складываются также по законам евклидовой геометрии. Так мы приходим к тому, что существует еще одна геометрия — геометрия скоростей (или, как принято говорить, геометрия пространства скоростей) и у нас нет оснований считать ее евклидовой. Какая это геометрия, — должен решить опыт.

Первое противоречие со свойствами евклидовой геометрии обнаружилось именно в пространстве скоростей.

В обычном сложении векторов очевидны их свойства: если к одному вектору прибавить второй, ему параллельный (если собака бежит по ходу парохода), то сумма их будет больше каждого из слагаемых и равна просто их арифметической сумме. Если мы будем складывать много векторов, то суммарный вектор можно сделать сколько угодно большим: скорость в этом случае может быть сколь угодно велика.

Так думали много веков. Сейчас хорошо известно, что только скорости, по величине значительно меньшие скорости света, складываются по таким простым правилам и что в природе не существует скоростей больше скорости света. Но это значит, что геометрия пространства скоростей неевклидова. Вывод, нарушивший стройность тысячелетней науки, вытекает из результатов одного только опыта — опыта Майкельсона.

ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА

История этого опыта, проведенного Майкельсоном и Морли в 1877 г., который привел к перевороту в физике, достаточно интересна сама по себе.

Физики конца прошлого века изучали свойства эфира — выдуманной субстанции, заполняющей все пространство и единственной обязанностью которой было, колеблясь, проводить свет. Такова сила традиции; легче было предположить существование непонятого эфира с фантастическими свойствами, чем допустить, что электромагнитное поле, обладающее энергией и импульсом, вовсе не нуждается в каком-либо носителе, а существует само по себе как особый вид материи.

Самой важной задачей, решение которой обещало (как казалось тогда) сильно продвинуться в понимании свойств эфира, было выяснить, увлекает ли Земля при своем движении эфир или нет.

Создатель теории электромагнитного поля Максвелл в письме к Майкельсону в 1880 г. заметил, что увлечение эфира Землей должно изменить скорость света относительно прибора на Земле. Но экспериментальное наблюдение эффектов, которые могут отсюда произойти, представлялась Максвеллу невыполнимой задачей, так как эффекты очень малы.

Но как не один раз случалось впоследствии, хороший экспериментатор почти всегда находит пути сделать опыт, если только задача опыта четко определена. Так было и в этот раз: опыт Майкельсона был сделан. Не входя в его подробности, напомним, что в этом опыте сравнивалась скорость света в направлении вдоль движения Земли по ее орбите вокруг Солнца, вдоль линии восток—запад и в поперечном направлении, вдоль линии север—юг. Скорость света оказалась одинаковой в обоих случаях. Какими бы эффектами ни попытаться объяснить результат опыта, одно остается ясным: скорость Земли и скорость света не складываются по обычному закону.

Эйнштейн в 1905 г. опубликовал работу, в которой была изложена специальная теория относительности. В ней впервые был проанализирован вопрос о том, как измерить расстояние и время в физике. Обсуждение этого вопроса привело Эйнштейна к построению целой науки, лежащей сейчас в основе всей физики. Оказалось, что если обобщить результаты опыта Майкельсона—Морли и выбрать в качестве исходного постулата утверждение, что скорость света не зависит от скорости наблюдателя или источника света и всегда равна 300 тыс. км в секунду, то можно построить новую механику, свободную от противоречий.

Если бы скорость света была бесконечной, то результат был бы тривиальным: какую бы величину ни прибавлять к бесконечности, она всегда останется бесконечностью. Но то же самое выглядит крайне странным для скорости конечной. Казалось бы, такое нелепое предположение должно было бы привести к абсурду, как если бы было предположено, что вообще скорости всех тел в природе одинаковы.

Но противоречия не оказалось — механика Эйнштейна родилась столь же логически последовательной, как и старая механика Ньютона. Но она имела одно большое преимущество: механика Эйнштейна естественно объясняла результаты опыта Майкельсона, а механика Ньютона нет.

Читателю, конечно, бросается в глаза аналогия с историей открытия неевклидовой геометрии. Отрицание всеобщей справедливости постулата о параллельных Евклида и замена его новым не привело к противоречию (как это ожидали математики, менее проницательные, чем Лобачевский, Гаусс и Больяи), а, напротив, привело к открытию новой геометрии. Так и постулат о постоянстве скорости света привел к созда-

нию новой механики, отличной от механики Ньютона. Подобно тому как для очень маленьких расстояний геометрия Лобачевского мало чем отличается от геометрии Евклида, так и механика Эйнштейна практически не отличается от механики Ньютона для скоростей, много меньших скорости света. Рассказывать подробно о специальной теории относительно-сти мы здесь не будем, нас интересуют лишь те ее выводы, которые имеют отношение к геометрии; выбор материала в дальнейшем и будет подчинен этой теме.

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

«С этого времени уходит в тень пространство само по себе и время само по себе. Существует лишь некоторое их объединение», — так начал свою речь в 1908 г. Герман Минковский. Слова Минковского сделались крылатыми, и с этих пор возникло представление о четырехмерном пространстве и времени. Так в первый раз был объяснен геометрический смысл теорем механики Эйнштейна. Эти теоремы впервые иллюстрировались на доске. Механика Эйнштейна приобретала наглядность механики классической, свойства которой казались безвозвратно потерянными. Что же означают слова Минковского?

До Эйнштейна считалось, что можно определить время так, чтобы часы показывали одно и то же во всем пространстве. Для этого, например, нужно взять много одинаковых часов и развезти их, как почту, в разные города. Но у такого способа есть существенный недостаток: его нельзя проверить.

Как узнать, что перенесенные таким образом из Москвы в Казань часы идут так же, как часы, оставленные в Москве? Каким образом сравнить ход часов, расположенных в разных местах? Кроме того, как проверить, что во время перевозки часы шли так же, как часы, оставшиеся неподвижными? Если бы свет распространялся мгновенно, то можно было бы все время сообщать о показаниях часов по радио. Но свет распространяется со скоростью «только» 300 тыс. км в секунду, и поэтому в Москве будет получаться сообщение о показаниях часов все время с небольшим запаздыванием. Чтобы внести поправку на запаздывание, надо знать, в каком месте пути от Москвы до Казани находятся часы в тот момент, когда был послан сигнал, и надо измерить расстояние до этого места. Все это требует, кроме того, знания скорости света, который излучается не неподвижным, а движущимся источником.

Так, разбирая, казалось бы, простую задачу о том, как сверить часы в разных городах, мы возвращаемся к спорной задаче об опыте Майкельсона. Если скорость света не зави-

сит от скорости часов, то можно последовательно распутать задачу. Напомним, как это делается. Для того, чтобы измерить расстояние до движущихся часов, из Москвы посылается сигнал по радио, который принимается курьером, везущим часы. Курьер, получив сигнал, высылает сообщение об этом обратно в Москву. После этого в Москве по одним и тем же часам можно определить время, которое нужно сигналу, чтобы пройти путь до курьера и обратно. Зная скорость света, уже нетрудно найти и расстояние до курьера. Еще проще сравнивать показание часов в двух неподвижных городах, если известно (после обмена сигналами) расстояние между ними.

В описаниях схем проверки часов важно то, что пришлось использовать сведения о скорости света и что из-за конечности этой скорости измерения расстояния нельзя сделать мгновенно. В результате во всех опытах приходится пользоваться часами. Невозможно (из-за конечности скорости света) установить координатную систему без того, чтобы одновременно не производить измерение времени. Напротив, оказывается возможным, пользуясь только часами, измерить как интервалы времени, так и длины. Эта достаточно простая истина и составляет содержание теории четырехмерного пространства и времени.

Всякое физическое событие происходит в какой-то точке пространства и в какой-то момент времени. Поэтому для описания его геометрических свойств надо знать три координаты описываемых ею положений в пространстве и одно число — показание часов. Сравнивая два события, надо сравнить четверку чисел (откуда отправлен сигнал и когда — в задаче о проверке часов). Соотношения между двумя событиями описываются как соотношения между двумя четверками чисел. В вычислениях время и пространство выступают вместе — это и дало повод говорить о том, что они образуют четырехмерную геометрию.

В обычной ньютоновской геометрии время никак не связано с пространственными координатами. Считалось очевидным, что существует какое-то единое время, общее для всей Вселенной, которое течет одинаково для всех наблюдателей, покоящихся или движущихся. Но мы видим, что такое время может быть только в мире с бесконечной скоростью распространения радиоволн. В мире, где их скорость конечна, но не зависит от скорости наблюдателя, такие часы не могут существовать.

Таким образом возник вопрос: можно ли построить геометрию, которая бы описывала способы измерения расстояния и времени, так, чтобы существовала постоянная скорость света, и так, чтобы различные следствия такой геометрии не приходили бы в противоречие одно с другим. Основной

вывод специальной теории относительности и состоит в том, что такая геометрия существует. Она называется геометрией Минковского, по имени математика, первого увидевшего связь идей теории относительности с геометрией четырехмерного мира.

ГЕОМЕТРИЯ МИНКОВСКОГО

Представим себе, что в разных точках мира стоят столбы, на которых написаны координаты точек и лежат часы, показывающие время. С помощью радио все расстояния были определены и все часы были сверены друг с другом. При этом все отмеченные точки относительно друг друга должны быть, конечно, неподвижными. Движущийся наблюдатель при проверке правильности наших координат и часов обнаружил бы новые геометрические свойства. Наблюдатель, летящий на самолете из Москвы в Казань, обмениваясь радиосигналом с двумя аэропортами, обнаружит, что расстояние между этими двумя городами несколько меньше того, которое указано в справочнике (если, конечно, в справочнике расстояния были бы указаны с точностью до нескольких микрон).

Известно, что длина, измеренная нашим пассажиром из самолета, который летит со скоростью v , равная примерно 1000 км в час, будет меньше, чем расстояние, измеренное по

карте в $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ раз, где $\frac{v}{c}$ отношение скорости самолета к

скорости света. При $v = 1000 \text{ км/час} = \frac{1}{3} \text{ км/сек}$ $\frac{v}{c}$ равно примерно 10^{-6} , и длины будут отличаться лишь на долю несколько большую, чем 10^{-12} от самого расстояния. Но если бы самолет летел с такой же скоростью, как протон из ускорителя в Дубне, то для него расстояние до Казани было бы короче процентов на 10.

Для самой быстрой из частиц, наблюдавшейся в космических лучах, нуклона с энергией около 10^{20} электроновольт это расстояние сократилось бы примерно в 10^{11} раз и составляло бы всего сотую долю миллиметра. Нуклон пролетел бы расстояние по своим часам за время меньшее 10^{-13} секунды (мы считаем это расстояние, равное 1000 км), так как он летел со скоростью света. Неподвижный наблюдатель в Москве также считал, что протон летит со скоростью света. По его наблюдениям протон провел в пути $1000 : 300\,000 = 1/300$ секунды. Таким образом он обнаружил бы, что время на летящем протоне идет медленнее. Если бы летел не протон, а, например, π -мезон, то он успел бы долететь до Казани, не распавшись, хотя в покое он распадается за время около 10^{-8} секунды.

Неподвижный наблюдатель сказал бы, что жизнь протона удлинилась.

Так обнаруживается факт, что с точки зрения разных наблюдателей расстояния и промежутки времени оказываются разными. Однако вместо них в физике появляется новая величина — интервал, которая имеет абсолютный характер и не зависит от того, покоится ли наблюдатель или движется с постоянной скоростью. Если два события происходят в двух точках, расстояние между которыми, измеренное в некоторой системе координат, равно l , а время, прошедшее между двумя событиями в той же системе, равно t , то величина

$$s^2 = c^2 t^2 - l^2,$$

которую обозначают через s^2 и называют интервалом, не зависит от того, в какой системе ее измеряют. Легче всего понять это, рассмотрев два события: отправление радиосигнала из одной точки и излучение его в другой на расстояние l от первой.

В этом случае время между двумя событиями равно $\frac{l}{c}$ и s^2 обращается в нуль. Этот результат не должен зависеть от системы координат. Оказывается, что такая независимость выполняется для любых двух событий и характеризует в наиболее кратком виде геометрию Минковского.

Нас не должно смущать то обстоятельство, что квадрат интервала может оказаться отрицательным, а сам интервал мнимым. Такая запись имеет условный характер. Если, например, измерить длину, отмечая положение концов линейки в один и тот же момент времени, то для таких двух событий $t=0$ и $s^2 = -l^2$ интервал оказывается мнимым, но измеряемая величина — квадрат длины — равна s^2 .

То, что через s^2 обозначена величина, которая может быть отрицательной, не приведет к трудностям. Нам не придется извлекать из нее квадратного корня, и такая запись удобна из-за сходства с квадратом расстояния в евклидовой геометрии.

Таким образом, если в одной системе $l=l'$, а $t=t'$, а в другой $l=l''$, а $t=t''$, то

$$c^2 t'^2 - l'^2 = c^2 t''^2 - l''^2.$$

Предположим, что ровно в полдень часы на самолете и на аэродроме были поставлены на 12. Когда часы на аэродроме покажут 1 час, то часы в самолете покажут меньшее время с точки зрения наблюдателя на аэродроме. Проверим это по формуле. Часы на аэродроме неподвижны, значит для них $l'=0$. Часы на самолете движутся со скоростью v км/час, поэтому если в полдень самолет был над аэродромом, то в момент второго отсчета он будет находиться от аэродрома на расстоя-

нии $l'' = vt''$. Следовательно, мы можем написать $l'^2 = 1$, $l'^2 = 0$ и

$$c^2 t''^2 - l''^2 = t''^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) c^2 = c^2,$$

т. е. часы на самолете покажут время меньше чем 1 час дня.

Часы покоящиеся и часы движущиеся показывают разное время, поэтому существует бесконечно много способов определять время, подобно тому как существует бесконечное число способов определять систему координат в пространстве. Выбор способа измерения времени находится в руках экспериментатора и может оказаться различным в разных случаях. Скорости частицы — пиона и его энергии удобно задавать в системе лаборатории.

Когда мы говорим, что ускоритель ускоряет протоны до 10 миллиардов электроновольт, то мы измеряем энергии в системе лаборатории. Напротив, время жизни пиона удобно измерять в системе, где он покоится, так как время жизни его в лаборатории зависит не только от его внутренних свойств, но и от его скорости.

В геометрии Минковского, о нескольких свойствах которой было сейчас рассказано, координатное трехмерное пространство оказывается обычным евклидовым. Специальная теория относительности не изменяет в покоящейся системе ничего по сравнению с классической физикой. Отличие возникает при переходе к движущимся телам и измерениям, требующим конечного времени.

Очень важную роль играет знак минус в формуле для интервала. Благодаря этому существуют два типа интервалов: интервал, квадрат которого положителен, и интервал, квадрат которого отрицателен. Так как величина интервала одна и та же для разных наблюдателей, то тип интервала во всех системах один и тот же.

Если квадрат интервала отрицателен, то всегда можно найти такую скорость системы координат, чтобы t^2 обратилось в ноль. В такой системе интервал сводится к обычному расстоянию между двумя точками. Такие интервалы называют пространственно подобными.

Если, напротив, квадрат интервала положителен, то ни для какого наблюдателя нельзя обратить в ноль промежуток времени между событиями, т. е. нельзя сделать события одновременными.

Можно, однако, найти такого наблюдателя, для которого события происходят в одной точке, так что $l=0$. Для такого наблюдателя два события могут быть использованы как показания часов. Поэтому такие интервалы называются временем подобными. Если события происходят с одним и тем же телом, то интервал между такими событиями всегда времени подобный, так как в системе координат, в которой это тело не движется, меняется только время. Отсюда следует,

что если из двух событий, которые происходят с одним телом, одно предшествует другому — отъезд поезда из Москвы и прибытие его в Казань, то ни в какой другой системе их порядок не может перепутаться. Ни в одной системе оба эти события не могут стать даже одновременными. Такое свойство интервала обеспечивает существование причинности, без которой не может существовать никакая физическая система.

Очевидно и другое свойство интервала: два события, разделенные пространственно подобным интервалом, не могут происходить с одним и тем же телом. Ракета, вылетевшая в полдень с Земли, и ракета, попавшая на Луну через 10^{-6} секунд, не могут быть одной и той же ракетой, так как для них $l = 380\,000$ км, $t = 10^{-6}$ секунд, $ct = 3 \cdot 10^4$ км, так что ct меньше, чем l . Последний вывод связан, конечно, с тем, что, даже ничего не зная о конструкции ракеты, мы можем утверждать, что она летит со скоростью, меньшей скорости света. Таким образом, неизменность интервала, или, как говорят, его инвариантность, отражает существование причинности физических явлений.

Покинем теперь на время координатное пространство и займемся векторной алгеброй скоростей. Мы уже говорили, что когда скорости становятся велики, то законы их сложения меняются и что геометрия векторов скоростей оказывается неевклидовой.

Еще в 1908 г. немецкий математик Клейн обнаружил, что геометрия скоростей в точности совпадает с той геометрией, которую придумал Лобачевский и сам вначале назвал «воображаемой геометрией». Из всех неевклидовых геометрий геометрия Лобачевского оказалась самой реальной, в то время как «реальная» евклидова оказалась лишь приближенной моделью.

Скорость есть величина, определяющая взаимное движение двух тел (или двух систем координат). В системе, где одно из тел покоится, скорость, как и в обычной механике, определит, как меняется координата тела со временем. Скорость тела всегда меньше скорости света, поэтому ее отношение к скорости света всегда меньше единицы.

Скорость $\vec{v}$ задается тремя компонентами в системе, где одно из тел покоится. Если $\vec{u}$ есть скорость парохода относительно берега, а $\vec{u}$ скорость собаки на палубе относительно парохода, то скорость собаки относительно берега надо определять как векторную сумму $\vec{v} + \vec{u}$. Удивительным образом закон сложения двух векторов в механике Эйнштейна совпал с законом сложения в геометрии трехмерного пространства

Лобачевского. Аксиомы геометрии Лобачевского оказались теми же, что и аксиомы механики Эйнштейна. Но мы уйдем слишком далеко от темы, если будем дальше углубляться в этом направлении.

ПАРАДОКСЫ ЧАСОВ И ВОЛЧКА

Один из самых удивительных парадоксов, связанных с геометрией четырехмерного пространства и времени, возникает из-за изменения хода часов в движущейся системе координат.

Обычно история рассказывается примерно так.

Предположим, что с земного космодрома ушла в путешествие ракета.

Наблюдатель на космодроме, обмениваясь сигналами по радио, все время сверяет часы с космонавтом. Старт произошел точно в полночь. Если скорость ракеты велика, то оператор обнаружит, что часы в ракете идут медленнее. К прямо противоположному выводу придет космонавт. Он, наблюдая за часами на космодроме, обнаружит, что идут медленнее не его часы, а земные, о чем он и сообщит на Землю.

Хотя такой обмен впечатлениями и может показаться странным, но в нем нет логического противоречия. Каждый может быть прав со своей точки зрения. Нет же ничего невероятного в том, что люди на улице кажутся маленькими, если смстреть на них из окна высокого здания. Для людей на улице будет казаться маленьким человек в окне. Как надо узнать, кто из них меньше? Самое простое — спуститься вниз и померяться ростом. Когда оба человека будут стоять рядом, вопрос и будет решен. Примем этот способ за правило: сравнивать какие-либо объекты можно, только поставив их одно-временно рядом.

Пока космонавт летит, а оператор сидит на Земле, нет никакого противоречия в том, что каждый из них остается при своем мнении. Это только подтверждает, что «время само по себе» не существует. Чтобы проверить, нет ли все же опасности для теории, космонавт должен повернуть ракету на Землю и вернуться на космодром; приехав на космодром, он придет к наблюдателю, достанет из кармана часы и положит их рядом с часами оператора.

Оператор будет ожидать, что, поскольку космонавт все время двигался, часы космонавта должны отставать¹. Если, например, космонавт летел со скоростью 30 000 км/сек ($\frac{1}{10}$ скорости света) и вернулся обратно через 10 часов, то

¹ Напомним, что отставание часов определяется квадратом скорости, а потому часы будут отставать и тогда, когда ракета летела от Земли, и тогда, когда ракета летела к Земле.

его часы будут показывать меньше, чем часы оператора в

$$\sqrt{1 - \left(\frac{1}{10}\right)^2} \approx 1,005 \text{ раза, т. е. примерно на 3 минуты} \\ (10 \cdot 60 \cdot 0,005 = 3).$$

Космонавт должен, казалось бы, утверждать, что, наоборот, на 18 секунд должны отстать часы оператора. Однако если он посмотрит на свои часы, то увидит, что прав оператор. — отстали его часы, в то время как он «своими глазами» видел, как во время всего его полета отставали часы оператора. Вот, казалось бы, и противоречие. Оно было обнаружено противниками Эйнштейна много лет назад. Если бы это противоречие было действительно реально, то неверным оказалась бы не только теория относительности Эйнштейна, но и геометрия Лобачевского. Это было бы, наверно, аргументом против всей неевклидовой геометрии, а заодно опровержением независимости постулата о параллельных Евклида.

В действительности парадокса вовсе нет. Механика специальной теории относительности говорит только о наблюдателях, движущихся прямолинейно и равномерно, т. е. двигающихся по прямой в пустом пространстве.

До тех пор пока космонавт удалялся от Земли, все шло хорошо. Но когда он принял решение проверить, что происходит с часами оператора, и повернул ракету, он перестал двигаться по инерции, и в этом случае уже нельзя просто использовать формулы специальной теории относительности. За время поворота часы на Земле, с точки зрения космонавта, уйдут вперед как раз на 6 минут, так что, отстав еще на 3, пока космонавт возвращался на Землю, часы оператора все же будут показывать больше на 3 минуты в согласии с наблюдениями оператора, который не менял своего состояния движения.

Можно даже сказать, как космонавт потратил энергию (горючее во время поворота), а оператор не тратил ничего — значит их истории не одинаковы и не следует удивляться, что показания часов не совпали.

Возникает естественный вопрос о том, стал ли космонавт моложе оператора. Этот вопрос умудрились запутать так, что он еще несколько лет назад опять проник на страницы научных журналов. Прежде чем отвечать на него, надо более внимательно посмотреть, как надо понимать утверждение о том, что часы космонавта идут медленнее. Если космонавт любитель старины и взял с собой столовые часы с маятником, то они вовсе остановятся, когда ракета пойдет по инерции, и никто теперь не удивится, что они покажут меньше время, включаясь только в периоды ускорения. Если он взял обычные часы с пружинным заводом, то кто знает, как они будут идти в периоды ускорения.

Ясно, что надо взять часы, на которые не действуют силы

ускорения. Идеальных часов не существует, но если использовать для измерения времени, например, молекулярный генератор или радиоактивный распад, то влиянием сил ускорения на ход часов можно пренебречь, и вся схема рассуждения будет правильной.

Возраст космонавта также может служить показанием времени. Биеение его сердца, ритм дыхания, ритм других физиологических процессов представляет собой то, что часто называют биологическими часами. Но биологические часы не совершенны и не пригодны для точного измерения времени. Их ритм зависит от температуры, состояния организма, даже настроения. Вряд ли можно считать, что единственным фактором, влияющим на ритм биологических процессов в ракете, будут эффекты теории относительности.

Возраст космонавта или, например, количество книг, которые он прочитал (в конце концов реальный возраст человека определяется количеством информации, которую человек переработал), будет в большей степени определяться его физическим состоянием, чем календарем, и вся проблема имеет большее отношение к физиологии, чем к физике. Известно, что лягушку можно просто заморозить на время, вообще остановив ее биологические часы без всякого участия теории относительности. Мореплаватель, пересекая Тихий океан с запада на восток, видит на один восход солнца больше, чем неподвижный наблюдатель, который поэтому становится на сутки старше.

Если же оставаться в реальных рамках явлений физических, а не биологических, то замедление часов совсем не есть только космическое происшествие, а его можно увидеть в современной лаборатории, наблюдая, например, как увеличивается время жизни пиона с энергией 15 000 миллионов электронвольт. Такой пион живет в 100 раз дольше неподвижного.

Чтобы не запутывать задачу поворотом ракеты, можно рассмотреть более простой опыт с двумя ракетами. Предположим, что имеются две ракеты — одна летит от Земли вверх, а другая движется в это время к Земле. В момент вылета первой ракеты оператор сверил часы с часами космонавта. Когда космонавт встретил своего товарища, он сверил часы с ним. Второй космонавт, прилетев на Землю, обнаружит, что его часы показывают меньше, чем часы оператора. В таком опыте участвуют трое часов, и видимого парадокса не возникает.

Кроме известного парадокса часов, существует еще похожий на него, но менее известный парадокс волчка или гирокомпаса.

Если космонавт в своем путешествии пользуется для ориентировки гирокомпасом, то он встретится с новой загадкой.

Чтобы не обсуждать действие ускорения (которое будет влиять на гироскоп), рассмотрим опять встречу двух космонавтов. Если при вылете первый космонавт сверит не только часы, но и направление гироскопа, а при встрече также сверит гироскоп с гироскопом космонавта, возвращающегося на Землю, то при встрече на Земле гироскопы будут показывать одно и то же направление.

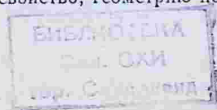
Положение, однако, изменится, если космонавты будут двигаться не навстречу друг к другу, а под углом. Если, например, вылет произошел 1 января, а прилет второго космонавта через месяц в другом месте земной орбиты, то гироскопы разойдутся: гироскоп вернувшегося на землю отклонится на восток, в сторону, обратную движению Земли по орбите, на угол, равный половине произведения скоростей космонавтов и умноженный на синус угла между скоростями (эта величина есть не что иное, как площадь треугольника со сторонами из векторов скорости космонавтов).

Таким образом путешествие по замкнутым путям с большими скоростями приведет к эффектам, не известным классической механике. Если бы скорость света не была столь велика, то именно эти эффекты послужили бы наиболее яркими примерами новых законов.

Отвлечемся немного в сторону. Рассмотрим задачу, которая может показаться не имеющей никакого отношения к нашему изложению.

Представим себе, что не было путешествия Магеллана. Как можно было, не совершая кругосветного путешествия, узнать, что Земля шар? Возьмем глобус и нарисуем на нем треугольник с одной вершиной на полюсе и двумя на экваторе, около западного берега Африки на долготе 0° и на островах Галапагос на 90° западной долготы. Этот треугольник обладает удивительным свойством: все его три угла прямые, но их сумма равна не 180° , как это полагалось бы для плоского треугольника, а 270° . Если такой опыт был бы сделан, то все сразу узнали бы, что треугольник нарисован не на плоскости, а на выпуклом теле. Если строить треугольники в разных местах — производить триангуляцию, то окажется, что все треугольники будут иметь сумму углов большую 180° . Можно из таких измерений определить даже и радиус шара. Площадь нашего треугольника равна $\frac{1}{8}$ площади всей поверхности шара, т. е. равна $\pi R^2/2$. С другой стороны, сумма его углов превышает 180° на $\pi/2$. Отсюда вытекает, что площадь треугольника, нарисованного на сфере, равна $R^2\delta$, где δ — избыток суммы углов треугольника над 180° (в радианной мере). Оказывается, что такая формула справедлива для любого треугольника. Это значит, что с помощью измерения треугольника можно, не уходя с поверхности Земли, узнать ее радиус. Это тоже важное свойство; геометрию поверхности можно ис-

8p 12799



следовать с помощью измерений, не выходящих в пространство. Для двумерной поверхности такой вывод вполне нагляден, обобщение позволяет построить методы исследования геометрии нашего четырехмерного мира без необходимости выхода в пятое или шестое измерения. Ясно только, что для этого надо производить исследования, охватывающие некоторую конечную область, и, в частности, путешествие с возвратом.

В опыте с космонавтами, на первый взгляд, никаких площадей не исследовалось, путешествие происходило по прямой. Однако если строить график путей космонавтов как функцию от времени, то на таком графике будут изображены три точки, которые отвечают трем событиям: вылет космонавта, встреча космонавтов, прилет космонавта на Землю. Эти три точки будут соединены прямыми — графиками путей космонавтов и покоящегося оператора (прямая $x=const$). Соотношения между сторонами такого треугольника окажутся отличными от тех, которые даются формулами евклидовой тригонометрии и которые не дают разницы в показаниях часов.

Не случайно и то, что поворот гирокомпаса (явление, которое называют Томасовской прецессией) происходит на угол, равный площади треугольника. Это явление имеет прямую аналогию с избытком δ на поверхности Земли и связано с аналогичной теоремой в геометрии Лобачевского.

Рисуя на поверхности Земли реальные треугольники, можно увидеть, что Земля искривлена в координатном пространстве. Неевклидовы треугольники возникают на графиках пути в координатах путь—время. Треугольники, нарисованные в обычном пространстве, остаются евклидовыми и в специальной теории относительности.

Такой вывод подтверждает полезность рассмотрения пространства и времени в единой геометрии и одновременно еще раз подчеркивает глубокую разницу, существующую между ними.

Следующий шаг уже неизбежен. Надо теперь выяснить, какие эффекты можно было наблюдать, если бы и пространство само по себе также не описывалось геометрией Евклида. Здесь мы входим в новую область — теорию тяготения, которой занимается общая теория относительности, открытая Эйнштейном.

СИЛА ТЯЖЕСТИ И ТЯГОТЕНИЕ

Один из способов построения прямой линии, который мы обсуждали, был связан с движением тела по инерции. Согласно закону механики, тело движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют никакие силы. «Равномер-

но» означает, что график пути как функция времени представляет собой прямую линию, и поэтому можно говорить, что тело движется прямолинейно и в четырехмерном мире Минковского.

Но как добиться, чтобы на тело не действовали никакие силы, а самое главное, как проверить, что это действительно так?

Чтобы на тело не действовало электрическое поле, тело должно быть нейтральным; сопротивление воздуха можно уменьшить, проводя опыт в вакууме. Но существует сила, от которой защититься невозможно. Это сила тяжести. Нет никаких экранов, которые ее могут уменьшить; ее величина пропорциональна полной массе тела. Природа сил тяготения уже давно была предметом размышлений.

Древние, следуя Аристотелю, думали, что чем тяжелее тело, тем с большей скоростью оно падает. Галилей усомнился в этом. Рассуждения Галилея поражают своей красотой и сейчас. Если тяжелое тело падает быстрее, чем легкое, говорил Галилей, то привяжем маленький камень к большому и посмотрим, как будут они падать вместе. С одной стороны, маленький камень должен тормозить большой и надо ожидать, что связанные камни будут падать медленнее одного большого, хотя и быстрее одного маленького. С другой же стороны, связанные камни вместе тяжелее каждого из них, а потому они должны падать быстрее, чем даже тяжелый камень. Чтобы избежать противоречия, приходится признать, что скорость падения тела (вернее, его ускорение) не может зависеть от его массы.

В этом доказательстве не все безупречно, хотя, на первый взгляд, оно и кажется абсолютно убедительным.

Если повторить его, например, для частиц в электрическом поле, то можно прийти к явно неверному выводу, что ускорение не зависит от массы, в то время как оно пропорционально отношению заряда частицы к ее массе.

Рассуждения Галилея содержат в действительности одно совсем не очевидное предположение: в нем принято заранее, что ускорение падающего тела зависит только от массы тела и ни от чего больше. Например, ускорение в воде может зависеть от формы тела, ускорение в электрическом поле — от электрического заряда, сила же тяжести зависит только от массы.

Но если это так, то рассуждения правильны и ускорение должно быть постоянным, т. е. сила должна быть пропорциональна массе.

Таким образом, вывод Галилея основан не на логике, а на физическом предположении, и его надо было проверять опытом. Галилей так и сделал. Он бросал камни разной величины с башни в Пизе (знаменитой падающей башни) и уста-

новил, что время падения разных шариков совпадает. Точность опытов Галилея была довольно велика. Стофунтовая бомба при падении с башни в 200 футов высотой опережала полуфунтовую не более чем на ширину ладони. Это значит, что ускорения могли отличаться не более чем на одну тридцатую процента.

Таким образом был установлен первый закон действия поля на тела. Это было сделано около 1590 г.

Но опыты Галилея относились к полю тяжести вблизи Земли. Следующий шаг к пониманию законов тяготения сделал Ньютон (он родился в год смерти Галилея, в 1636 г.).

Великое открытие обычно состоит в том, что неожиданно открывается связь между далекими и очень непохожими явлениями. Открытие Ньютона и было открытием связи между законом падения яблока на землю и движением планет вокруг Солнца. Ньютон понял, что тяготение есть общее свойство всех тел и что величина силы притяжения может быть выражена математически простой формулой. Именно: сила притяжения пропорциональна массам притягивающихся тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Формула тяготения была проверена Ньютоном анализом движения планет, законы которого были найдены лет за 70 до Ньютона Кеплером.

Кеплер нашел простые численные соотношения между величинами, описывающими орбиты планет, Ньютон обнаружил, что законы Кеплера вытекают из закона всемирного тяготения.

С законом Ньютона связано еще одно важное событие. В формулу входит, кроме масс и расстояния, численная постоянная G — постоянное тяготения. Именно сила тяготения, действующая между двумя телами с массами m_1 и m_2 и находящимися на расстоянии r одно от другого, равна

$$G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Постоянная тяготения, равная $6,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г сек}^2$, была первой мировой постоянной, вошедшей в физику. Лишь в XIX веке к ней прибавились одна за другой еще три: скорость света $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$, заряд электрона $e = 4,80 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц и постоянная Планка $h = 1,06 \cdot 10^{-27} \text{ эрг/сек}$.

Может быть, Ньютон был первым, кто понял соотношение между геометрией и механикой. В его книге написано: «Однако само проведение прямых линий и кругов, служащее основанием геометрии, в сущности относится к механике. Геометрия не учит тому, как проводить эти линии, но предполагает (постулирует) выполнимость этих построений... Само по себе черчение прямой и круга составляет также задачу, но

только не геометрическую». Может быть даже не отдавая себе отчета, Ньютон высказал глубокую мысль, которую можно было понять лишь в наше время!

История открытия закона тяготения Ньютона прошла несколько этапов. Древние пытались найти в движении планет, казавшемся случайным, законы гармонии. Небесные круги и сферы, придуманные Птоломеем и символизирующие мировую гармонию, как нельзя лучше отвечали их мировоззрению. Только Кеплер увидел в небесных явлениях простые математические соотношения, но и ему была чужда сама мысль об объяснении движения едиными силами.

Этот перелом Кеплер описывал так: «Первая моя ошибка состояла в том, что я считал орбиту планеты совершенной окружностью, и эта ошибка оказалась тем более зловещим воров моего времени, что она была основана на авторитете всех философов и в своем роде наиболее соответствовала метафизике». Причины, по которым планеты движутся, подчинялись открытым им законам, он искал, приписывая планетам способность ощущать углы и даже иметь «душу». Откуда же планета знает, спрашивал Кеплер себя, с какой скоростью ей двигаться? Что заставляет их вообще двигаться, ведь по воззрению того времени всякое движение должно угаснуть само по себе, а для того, чтобы его поддерживать, нужна какая-то причина.

Галилей, постигнув законы падения тел, не смог принять законов Кеплера, которые казались ему фантастическими из-за порой мистической оболочки, в которую Кеплер облек свои идеи. Этих гигантов разделяла пропасть.

Не такая ли пропасть разделяла Бора и Эйнштейна в начале нашего века от физиков прошлого? Похожие мотивы звучали в знаменитом вопросе о том, откуда электрон знает, на какую орбиту в атоме попадет, когда он испускает квант определенной частоты? И здесь нужна была либо «душа», либо новые идеи.

В те времена новые идеи пришли с Ньютоном. Закон всемирного тяготения, объединивший силу тяжести на Земле с тяготением небесных тел, простой по форме оказался всеобъемлющим. В работах Ньютона миру открылись фундаментальные законы Вселенной.

Триумф теории всемирного тяготения пришел в 1759 г., когда Галилей предсказал возвращение кометы, путь которой он рассчитал по законам Ньютона. В апреле 1759 г. комета вернулась! А за несколько лет до этого Академией наук в Петербурге в 1750 г. (через 60 лет после открытия закона тяготения и через 20 после смерти Ньютона) был объявлен конкурс на работу, в которой было бы выяснено, достаточно ли теории Ньютона, для того чтобы объяснить все закономерности в движении Луны. Это было очень важно, так как споры

далеко не утихли. И, наконец, в 1752 г. в трудах Академии вышла работа Клеро «Теория Луны, выведенная из единственного начала притяжения, обратно пропорционального квадратам расстояний». Это и был конец истории.

Распространив закон тяготения на все тела в природе, Ньютон еще больше обострил вопрос о природе этих сил.

Что мог физик того времени (или даже XIX века) понимать под природой сил? Глубокая уверенность в всеобщности законов механики привела к вере, что все взаимодействия должны быть сведены к механическим. Так всю вторую половину XIX века физики искали мировой эфир — среду, в которой распространяются световые колебания. Так в первой половине века физики искали флогистон — жидкость, передающую тепло. По этому же пути искали объяснения и силам тяготения.

Инерция мышления была так велика, что даже сам Эйлер высмеивал возможность взаимодействия тел на расстоянии. Как может «существование одного тела стать заметным для другого при их огромном удалении?» — спрашивал Эйлер. Понадобилось еще 150 лет, чтобы появилась теория электромагнитного поля, чтобы механический эфир из догмы превратился в курьез, а представление специальной теории относительности о пространстве и времени сменили бы ньютоновское абсолютное время и абсолютное пространство. Только тогда созрела почва для появления революционной идеи Эйнштейна, о кривых пространствах.

ФИЗИКА НЕВЕСОМОСТИ

После полета Юрия Гагарина состояние невесомости знакомо по рассказам и кинофильмам практически каждому человеку. И говоря о теории относительности, сейчас уже не нужно вспоминать воображаемый опыт с лифтом, свободно падающим в шахте, который еще несколько лет назад казался самой наглядной иллюстрацией законов тяготения.

Разберемся в том, что происходит в маленькой кабине ракеты, когда она с выключенными моторами совершает свой полет вокруг Земли.

Все предметы в кабине и сам космонавт потеряли вес, на них перестало действовать поле тяготения Земли. Но это значит, что существование самих сил тяготения не есть абсолютное понятие. Для человека на Земле они есть, а для космонавта в кабине их нет.

Такое поведение поля тяготения совсем не похоже на поведение других полей, например электрического. Так, если мы измеряем поле покоящегося электрона, то его поле определяется по закону Кулона и будет чисто электростати-

ческим; если электрон будет двигаться (или же будет двигаться наблюдатель), то у электрона возникает, кроме электрического, еще и магнитное поле.

Таким образом, в одной системе координат у электрона есть электрическое поле, а в другой и электрическое и магнитное.

Однако ни для какого наблюдателя нельзя найти такую систему координат, чтобы поле исчезло совсем. А для поля тяготения такая система существует — это космический корабль.

Для того чтобы внутри кабины космонавт никаким способом не мог установить существование силы тяжести Земли, надо, чтобы сила тяжести действовала на все тела одинаково. Но еще Галилей знал, что все тела падают на Землю с одинаковой скоростью и ускорением.

Мы знаем теперь, что сила, с которой тело притягивается к Земле, пропорциональна массе тела; с другой стороны, известно, что ускорение, которое получает тело, обратно пропорционально его массе.

Опыты Галилея и, конечно, значительно более точные опыты, проведенные в наше время, показали, что обе массы — одна, определяющая силу тяжести, а другая ускорения — пропорциональны друг другу. Это ни в какой мере не очевидно. Например, в электрическом поле сила определяется электрическим зарядом e , а ускорение массой m ; поэтому движение заряда в поле определяется отношением заряда к массе e/m . Изучая движение заряженной частицы, можно измерить e/m , как это и было сделано в 1897 г. Дж. Томсоном для электрона.

Странным образом похожий опыт в поле тяжести — опыт Галилея не приводит к определению новых характеристик тела — дело обстоит так, как было бы в теории электричества, если все тела имели бы одинаковое отношение заряда к массе. Пользуясь таким же языком, можно сказать, что гравитационный заряд пропорционален инертной, механической массе тела. В этом случае можно измерять массу в одних и тех же единицах и говорить кратко, что масса тяготеющая равна массе инертной.

Так мы приходим к принципу эквивалентности обеих масс. Из принципа эквивалентности сразу следует, что в свободно летящей кабине все физические явления будут происходить так, как будто бы никакого поля тяжести не было вовсе.

Можно повторить все рассуждения для лифта, свободно падающего в шахте¹. В таком лифте также действие тяжести будет нейтрализовано ускорением свободного падения.

¹ Из-за очень малого, но все же существующего трения об атмосферу остатки тяжести в кабине будут, но от этого эффекта можно отвлечься.

Очень похожее явление встречается в значительно более простой форме, например на «колесе смеха» в каком-нибудь парке культуры и отдыха. Для любителей, забравшихся на вертящийся диск, существует центробежная сила, которая их стремится сбросить (и сбрасывает) с диска. Сбрасывающая сила и в этом случае пропорциональна массе тела, и все участники, и маленькие и большие, сбрасываются с одинаковым ускорением. Для зрителей никаких сил нет, и с их точки зрения люди на диске движутся прямолинейно по инерции, а диск уходит из-под них.

По сравнению с космонавтом в этом опыте картина в некотором смысле обратная — сила тяжести (направленная от оси диска наружу) существует для людей на диске и не существует для зрителей. Но суть дела остается той же: то, что для одних наблюдателей представляется как сила тяжести, для других выступает как ускорение системы координат.

Нужно еще несколько уточнить сказанное. Нельзя построить такую систему координат, внутри которой исчезло поле тяжести на всех расстояниях от наблюдателя. Так как ускорение на разных расстояниях от Земли падает пропорционально квадрату расстояния, то и скорости кабины, если бы она имела размеры очень большие (сотни километров), должны были быть в разных точках разные, так что только в маленькой лаборатории можно строго говорить об эквивалентности полей тяготения и ускорения.

Обратим внимание на разный смысл относительности специальной теории и эквивалентности в теории тяготения. Первый принцип утверждает, что в равномерно движущихся лабораториях все физические явления протекают одинаково и что никакими опытами внутри лаборатории нельзя измерить скорости самой системы.

Принцип эквивалентности утверждает, что внутри лаборатории нельзя выяснить, движется ли лаборатория в поле тяжести или же движется с ускорением в пустом пространстве. Система, движущаяся с ускорением, ни в каком смысле не эквивалентна системе покоящейся. Когда неожиданно тормозит троллейбус, то пассажиры летят вперед, так, как будто их толкнула какая-то сила. Пострадавший пассажир мог бы удивиться, почему люди на внезапно затормозившейся улице (которую он видит из окна) не падают, но результат собственного опыта убедит его, что их системы не эквивалентны.

Вернемся еще раз к задаче о построении прямой линии. Один из способов ее построения использует тело, движущееся по инерции. Такой способ мог быть хорош, если бы не было полей тяготения. Но мы видели, что поле тяготения нельзя уничтожить во всем пространстве переходом в движущуюся систему, а потому им нельзя пренебречь, если мы хотим рассматривать геометрию больших областей пространств.

По тем же причинам нельзя воспользоваться натянутой веревкой и еще в меньшей степени лучом света, так как о законах распространения света в полях тяготения мы вообще ничего еще не знаем.

Возникает знакомый порочный круг. Чтобы изучить геометрию, нам надо знать физические свойства пространства: их же нельзя превратить в форму математических законов, не зная заранее геометрию Вселенной.

Для того чтобы выйти из создавшегося тупика, надо было наконец полностью отказаться от идеи использовать геометрию в уже «заготовленном» виде и попытаться построить ее из наблюдаемых объектов. Для этого надо было завершить дело, начатое в специальной теории относительности.

Опыт Майкельсона заставил рассматривать единое пространство — время и описывать физические явления в терминах геометрий Минковского и Лобачевского. Но при всем значении происшедшей революции наше представление о свойствах пространства изменилось мало — трехмерное пространство оставалось евклидовым, и его свойства никак не изменялись со временем. Более того, свойства пространства одинаковы вдали от небесных тел и вблизи от них. Пространство продолжало играть роль некоторой арены, на которой происходят физические явления; само же пространство — время в физических процессах не участвует и не развивается.

Великим открытием Эйнштейна было, что геометрические свойства пространства и времени значительно сложнее, чем свойства пространства Минковского. Они меняются во времени, зависят от физических процессов и проявляются в наших опытах как явления тяготения.

Вместо того чтобы заниматься проблемой учета воздействия поля тяжести на прямую линию, новая геометрия строится так, что прямой линией называется линия, по которой движется тело в отсутствии каких бы то ни было сил, кроме сил тяготения. Таким образом Эйнштейн смог построить геометрию, также свободную от противоречий, как это было с геометрией Лобачевского.

Мы попробуем рассказать об основных чертах геометрии Эйнштейна в той степени, в которой можно обойтись без формул. Для этого надо преодолеть две трудности.

Прежде всего это геометрия четырехмерного мира, одно из измерений которого есть время. Мы уже знаем, что таким весьма формальным способом описывается тот факт, что геометрия оказывается различной для наблюдателей, движущихся с разными скоростями, — от скорости зависит как ход часов, так и длины отрезков. Таким свойством, очевидно, должна обладать любая геометрия реального мира.

С другой трудностью мы встретимся, когда придется рассматривать свойства обычного трехмерного пространства. В

этом случае придется дать работу воображению, чтобы перенести на трехмерный мир те свойства, которые легко описываются для поверхности Земли. Эти свойства кратко называют кривизной пространства.

КРИВИЗНА ПРОСТРАНСТВА

Из трех способов проведения прямой один не был связан с движением — этим способом пользуются маляры, когда им надо провести прямую по стене: они берут веревку и натягивают ее между двумя точками. Способ кажется простым.

Попробуем воспользоваться этим способом, но в больших масштабах — на поверхности Земли и протянем нитку через всю страну от Бреста до Владивостока. Прделав эту операцию на глобусе, мы увидим, что форма нитки заметно отличается от прямой, она изогнется по кривой поверхности глобуса.

Но, несмотря на то, что кривых линий на поверхности глобуса провести можно много, тем не менее нитка протянется по вполне определенному пути и будет ложиться на то же самое место, сколько бы раз мы ни повторяли простой опыт. Это значит, что линия, по которой ложится нитка, хотя и перестала быть прямой в пространстве, сохранила от прямой важное свойство: между любыми двумя точками можно провести только одну такую линию. Небольшое исследование покажет, что эта линия, есть большой круг — окружность, лежащая в плоскости, проходящей через центр шара.

Большими кругами являются, в частности, меридианы. Большие круги отличаются от других линий на поверхности тем, что их дуги есть кратчайшие линии между своими концами; именно поэтому натянутая веревка ложится по дуге большого круга. Это добавляет еще одну общую черту с прямой линией. Но сходство кончается, если направить из Бреста на восток луч прожектора (после изобретения квантовых генераторов света лазеров такой опыт скоро может стать не только воображаемым). Луч прожектора не будет изгибаться вдоль поверхности Земли, а направится по «настоящей» прямой в пространство и во Владивосток не попадет.

Испробуем третий способ — используем траекторию ракеты. В этом случае результат будет, как известно, зависеть от величины скорости и угла, под которым ракета была выпущена. В то же время вагон по совершенно гладким рельсам медленно катился бы по поверхности Земли (если бы не было трения), строго следуя натянутой нити. Все это, вместе взятое, означает, что понятие прямой линии, форма которой зависит от способа ее построения, не так уж чужда нашим чувствам, как это казалось вначале. И мы можем спокойно строить геометрию, положив в ее основу принцип механики—

прямая есть линия, которую описывает тело, движущееся по инерции.

Предельный случай траектории бесконечно медленно движущегося тела реализуется натянутой веревкой. Отклонение его траектории от евклидовой прямой общая теория относительности (так назвал Эйнштейн науку о геометрии Вселенной) относит за счет изменения геометрии.

Еще раз повторим, что зависимость формы «прямой» от скорости описывается как связь пространства и времени. В этой части геометрии общий принцип относительности добавим к тому, что было известно из специальной теории, что такая связь может быть разной в разных точках пространства. Наблюдатель на Земле обнаружит, что скорость света в разных точках может оказаться различной, так что вблизи тяжелых тел свет распространяется с меньшей скоростью, чем вдали от них.

Пространство вблизи небесных тел оказывается обладающим показателем преломления, который отличается от показателя преломления пустого пространства (равного, как известно, единице). На обычном языке можно отнести это явление за счет того, что квант света, обладая энергией $h\nu$, обладает и массой $h\nu/c^2$. Согласно принципу эквивалентности квант и должен притягиваться к Солнцу с силой, определяемой произведением массы Солнца и массы кванта, что и приведет к исправлению луча. (Отметим сразу, что здесь описана только часть эффекта, о чем будет подробно рассказано дальше). Наблюдатель, пользуясь нормальной оптической терминологией, должен будет сказать, что свет преломился, и приписать среде показатель преломления, равный единице.

Так, на поверхности Солнца ускорение силы тяжести в 27 раз больше, чем на поверхности Земли; можно вычислить, что показатель преломления, отвечающий такому полю, превышает единицу на $4 \cdot 10^{-6}$; на такую же долю скорость света около Солнца меньше скорости света вдали от него. Вблизи поверхности Земли отклонение показателя преломления от единицы в 3 тысячи раз меньше и составляет всего около 10^{-9} . Напротив, для белых карликов эффект больше, чем для Солнца, и составляет около 10^{-4} , что уже близко к показателю преломления воздуха при нормальных температуре и давлении (для воздуха $= 1 + 3 \cdot 10^{-4}$).

Искривления путей тел, движущихся со скоростью, меньшей скорости света, будут зависеть от скорости тел, и привыкнуть думать о их траекториях так же легко (или так же трудно), как и привыкнуть к тому, что длина предмета представляется разной для наблюдателей, движущихся с разной скоростью. Изменение длины отрезка и изменение формы прямой настолько близкие явления, что, привыкнув к одному, можно уже без большого труда приучить себя и к другому.

Остановим теперь часы и разберемся, что происходит в пространстве тогда, когда все часы показывают одно и то же время. Другими словами, рассмотрим свойства пространства самого по себе, выбрав в качестве инструмента исследования (воображаемого, конечно) длинные веревки, и постараемся выяснить, как будет выглядеть веревочный треугольник, натянутый между тремя далекими точками в пространстве.

Эйнштейном были написаны уравнения, которые позволяют ответить на этот вопрос. Бессмысленно пытаться восстановить вывод решения этих уравнений.

В то время как идеи, положенные в основу общего принципа относительности, могут быть сравнительно легко поняты, математические выкладки, напротив, очень сложны, и можно рассказывать лишь результаты. Результаты же таковы.

Как оказывается, пространство около больших небесных тел не плоское, а искривлено. Нитка, протянутая около Солнца, изогнется так, будто она была натянута на невидимой сфере. Радиус такой сферы в 700 раз больше, чем радиус Солнца, и равен $5 \cdot 10^8$ км.

Если мы построим треугольник, например, со сторонами в 1 км, то сумма углов такого треугольника оказалась бы меньше 180° , она была бы меньше 180° на ничтожную величину — около 10^{-16}° .

Если рисовать не треугольник, а окружность, то обнаружится, что отношение ее длины к диаметру не будет равно 3,14, а будет немного отличаться от π . Для окружности радиусом в 1 км это отношение будет отличаться от π примерно на 10^{-16} радиана.

Эффект, конечно, ничтожный. Он еще меньше на Земле. Причину малости эффекта можно понять, не решая уравнений, а пользуясь просто соображениями размерности. Из постоянного закона тяготения $G = 6,7 \cdot 10^{-8}$, массы Солнца $M = 2 \cdot 10^{33}$ г и скорости света c можно составить величину размерности длины. Обозначим ее через q :

$$q = \frac{GM}{c^2}$$

Величина q носит название гравитационного радиуса тела с массой M . Она играет роль масштаба в теории тяготения. Если бы размеры тела были очень малы (меньше q), то на расстоянии q от центра тела потенциальная энергия другого тела с массой m (которая вычисляется по формуле $V = -GM/r = -qc^2/r$) равнялась бы $V = -mc^2$, это значит, что полная энергия тела обратилась бы в ноль! Но q очень мало, так как размеры всех тел намного превышают q . Так, для Солнца $q = 1,5$ км, для Земли 0,43 см. Поэтому все свойства реального пространства мало отклоняются от свойств плотно-

го мира. Отклонение суммы углов треугольника от 180° должно быть тем больше, чем больше площадь треугольника S , и тем больше, чем больше ρ . Кроме того, это отклонение должно убывать с расстоянием от Солнца r . Отсюда из соображений размерности можно определить, что эта разность должна определяться по порядку величины формулой

$$\delta \sim \frac{\rho S}{r^2}$$

Эта формула и дает оценку для суммы углов треугольника. Для радиуса кривизны мира R на расстоянии r от Солнца теория дает по порядку величины

$$R \sim \sqrt{\frac{r}{\rho}} \cdot r$$

Эти оценки дают общее представление о степени малости эффектов, которые могут быть предсказаны теорией относительности.

Повторим еще раз цепь рассуждений. Исходным пунктом послужило утверждение, что за прямые линии в четырехмерном пространстве — времени следует принять пути тел, которые движутся по инерции. При этом поля тяготения уже не считались полями. Это предположение накладывало определенные связи на пространство и время, поскольку для наблюдателей, движущихся с разными скоростями, прямые линии оказывались различными. До этого момента общая теория относительности практически не вносила ничего нового — почти все содержалось уже в исходной гипотезе.

Однако дальнейшее последовательное развитие исходных идей приводит к заключению, что для того, чтобы геометрия была непротиворечива, необходимо предположить, что само трехмерное пространство перестает быть плоским евклидовым.

Вернемся опять на поверхность Земли. Ее кривизна обнаруживается в том, что нарисованный треугольник на ней имеет сумму углов, не равную 180° .

Двумерный житель на сфере узнал бы о кривизне собственного мира, измерив углы треугольника или же проверив какую-либо другую геометрическую теорему, связанную с постулатом о параллельных.

В трехмерном пространстве происходит нечто подобное: мы не можем выйти в какое-то четвертое измерение и посмотреть на наш мир «снаружи». Для того чтобы обнаружить кривизну, следует поступить так, как «двумерец»: провести плоскости, нарисовать на них геометрические фигуры и исследовать их свойства.

Общая теория относительности утверждает, что фигуры окажутся неевклидовыми. Более того, свойство плоскостей

будет разным в разных местах пространства (например, на разных расстояниях от Солнца) и от их расположения (например, геометрия плоскости, проходящей через Солнце, будет отличаться от геометрии плоскостей, через Солнце не проходящих).

Связь между изменением масштабов для движущегося наблюдателя и искривлением пространства можно было бы обнаружить, если, находясь на вращающемся диске, очень точно измерять длины в окружающем пространстве. Если диск помещен в круглом зале, то для человека на диске стены зала движутся относительно него, и поэтому их длина сокращается. В то же время диаметр зала остается неизменным, так как он все время расположен перпендикулярно скорости движения. Наш экспериментатор должен будет прийти к заключению, что отношение длины окружности к радиусу диаметра стало меньше π , и он вынужден будет отнести это удивительное явление к тому, что в его лаборатории действует поле центробежных сил. Величину эффекта нетрудно даже вычислить. Если диск вращается со скоростью n оборотов в секунду, то скорость стены относительно диска будет равна $2\pi na$, где a — радиус зала. Согласно формулам специальной теории относительности, окружность зала сократится в $\sqrt{1 - \frac{1}{c^2}(2\pi nR)^2}$ раз. Во столько же раз уменьшится и отношение длины окружности к диаметру.

Хотя пример с вращающимся диском и хорошо иллюстрирует связь геометрии с движением, но он обладает одной неприятной особенностью. Если зал был бы очень большой, то в принципе скорости его стены могли бы стать тоже очень большими и даже большими, чем скорость света; тогда на некотором расстоянии все длины бы обратились в ноль. Таких эффектов с обычными полями тяготения не бывает.

Похожую картину можно обнаружить на поверхности Земли. Длина окружности-параллели на поверхности Земли равна, как это нетрудно вычислить, $2\pi a \sin \theta$, где a — теперь радиус Земли, а θ — угловое расстояние до полюса в радианной мере (т. е. $\pi/2$ минус широта места). Расстояние от полюса до окружности по меридиану — «радиус» окружности — равно $a\theta$. Поэтому отношение длины окружности к диаметру равно $\pi \frac{\sin \theta}{\theta}$. Вблизи от полюса это отношение

близко к π , при удалении окружности от полюса оно уменьшается, достигая на экваторе значения 2.

В реальной геометрии пространства все эффекты очень малы, но все же существуют способы их обнаружить.

Еще в своей первой работе Эйнштейн указал на то, что,

несмотря на малую величину возможных эффектов, существует по крайней мере три явления, на которых можно проверить предсказания общей теории относительности.

ТРИ ОПЫТА

Все три опыта, предложенные Эйнштейном, относятся к астрономическим наблюдениям и в конце концов сводятся к измерению кривизны пространств вблизи Солнца. Малость эффекта здесь компенсируется огромной величиной расстояний. Рассмотрим все три эффекта по порядку.

Первый эффект: отклонение луча света при прохождении вблизи Солнца.

Об этом эффекте мы уже упоминали. О нем рассуждал еще Ньютон, который спрашивал: «Не действуют ли тела на свет на расстоянии и не изгибают ли этим действием его лучей; и не будет ли это действие сильнее всего на наименьшем расстоянии?» Ясно, что Ньютон не имел в виду ничего похожего на то, о чем мы говорили сейчас, но все же сама возможность такого размышления заслуживает упоминания. Только в современной физике можно решить эту задачу и теоретически и экспериментально.

Когда луч от далекой звезды проходит близко от Солнца, то он отклоняется в сторону Солнца. Это отклонение обуславливается двумя причинами. Первая связана с притяжением к Солнцу кванта, который имеет массу, равную его энергии, деленной на квадрат скорости света; вторая связана с кривизной пространства. Обе причины, как показывает теория, дают одинаковый вклад. В результате получается, что для луча света, проходящего на расстоянии r от центра Солнца, его отклонение составляет угол α (в секундах дуги).

$$\alpha = \frac{r_{\text{солнца}}}{r} \cdot 1,75,$$

где r Солнца — радиус Солнца, равный $7 \cdot 10^5$ километра. Эту формулу можно получить и из соображений размерности, заметив, что α безразмерная величина, а потому $\alpha = q$ Солнца, где q Солнца — гравитационный радиус Солнца, равный 1,5 км, и α измеряется в радианах¹.

Для того чтобы наблюдать описанное отклонение, надо сравнить положение звезд на небе, когда на пути луча находится Солнце (это можно сделать во время солнечного затмения или в будущем со спутника) и когда Солнца нет на пути. Для этой цели измеряется относительное расстояние (углы) звезд вблизи закрытого луной солнечного диска во

¹ При выводах с помощью теории размерности надо знать, в какой степени входит гравитационный радиус.

время затмения и сравнивают измеренные положения с картой этого участка неба.

Несмотря на кажущуюся простоту опыта, на самом деле такие измерения провести крайне трудно, так как даже на краю диска Солнца отклонение составляет менее 2 секунд дуги (сам диск Солнца виден под углом 30 секунд). Так как видимое положение звезды зависит от свойств атмосферы, то измерить его с нужной точностью трудно.

Первый раз эффект был измерен во время солнечного затмения в 1919 г. Обработка фотографий обнаружила¹ отклонение в 2 секунды дуги. Объяснить такое отклонение только тем, что квант имеет массу (равную энергии, деленной на квадрат скорости света), а потому должен притягиваться к Солнцу, нельзя. Простой учет массы кванта объясняет только половину теоретического эффекта и дает для него величину $\frac{1}{2} \cdot 1,75 \approx 0,8$ секунды. Поэтому существует заметный эффект, не связанный с простым притяжением кванта к Солнцу.

С тех пор измерения производились еще несколько раз во время затмений 1922, 1929, 1936, 1947 и 1952 годов. Все они давали похожие результаты, все числа были несколько больше, чем 1,75 секунды, предсказываемой теорией. Почти все числа лежали в интервале от 1,4 секунды (почему-то измерения 1952 г. дали самое низкое значение) до 2,7 секунды (измерения 1936 г.). Среднее значение из всех наблюдений составляет 2,03 секунды. Ошибки измерений еще слишком велики, чтобы можно было утверждать, что опыт дает значение большее, чем требует теория; но точность данных все же достаточна, чтобы можно было говорить об экспериментальном подтверждении кривизны пространства.

Правда, результаты опыта можно описать и другим способом, о котором мы также говорили. Искривление луча можно приписать изменению скорости света вблизи Солнца, предположив, что гравитационное поле увеличивает показатель преломления от значения 1 для пустоты до немного большей величины, равной (как показывает расчет)

$$n = 1 + \frac{\rho_{\text{солнца}}}{r}$$

В этой картине все действие поля тяготения сводится не к изменению геометрических свойств пространств, а к изменению их оптических свойств. Однако такое объяснение оказывается несостоятельным для описания результатов второго опыта.

Второй эффект: движение перигелия² Меркурия.

Движение планет по орбите происходит со скоростью,

¹ Все результаты старых измерений были заново проанализированы несколько лет назад А. Михайловым.

² Перигелием называется точка орбиты, находящаяся ближе всего к Солнцу.

значительно меньшей скорости света. Эта скорость наибольшая для самой близкой к Солнцу планеты — Меркурия и, уменьшаясь с ростом расстояния до Солнца, становится самой малой для Урана и Плутона. Скорость планеты (отношение ее к скорости света) можно грубо оценивать по формуле:

$$\frac{v^2}{c^2} \sim \frac{r_{\text{солнца}}}{r},$$

где опять r — гравитационный радиус Солнца (1,5 км), а r расстояние до него. Для Меркурия $r=58$ млн. км, и следовательно, $v/c \sim 1,6 \cdot 10^{-4}$; для Венеры $r=108$ млн. км и $v/c \sim 1,4 \cdot 10^{-4}$; для Земли $r=250$ млн. км и $v/c \sim 10^{-4}$; для Плутона $r \sim 5900$ млн. км и $v/c \sim 1,6 \cdot 10^{-5}$.

Из-за сравнительно малой скорости планет возрастание их массы со скоростью не очень велико, а потому оно не очень сильно изменит формулу закона тяготения Ньютона (в которой масса считается постоянной). Поэтому на движение планет будет сказываться в большей степени кривизна трехмерного пространства.

Такое влияние эффектов общей теорией относительности было бы невозможным наблюдать, если бы не удивительные свойства законов движения планет вокруг Солнца, выведенных еще Кеплером.

Когда пифагорейцы искали гармонии во Вселенной, они приписывали планетам движение по кругу: это удовлетворяло их эстетическим чувствам. Кеплер, заметив, что планеты движутся по эллипсам, а не по окружностям, также не удивлялся, что они движутся по замкнутым кривым. А этому следовало бы удивиться! Не зная закона Ньютона, нельзя понять, каким образом планета возвращается в ту же самую точку пространства, в которой она уже один раз побывала, и причем точно через один оборот.

Механика объясняет, почему орбита планеты лежит в одной плоскости.

Как оказывается, закон сохранения момента количества движения требует, чтобы планеты двигались в одной и той же плоскости. Но то, что планета движется в плоскости по замкнутой кривой, оказывается следствием не общих законов механики, а связано только с законом тяготения. Согласно этому закону сила притяжения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Как только сила притяжения изменится, благодаря ли действию других планет или еще по каким-либо причинам, эллипс разомкнется: планета не вернется в то же самое место, где она была год (по планетному исчислению) назад.

Поэтому любые возмущения движения планеты можно измерить, наблюдая, как изменяется ее орбита за многие годы.

Конечно, если орбита строго круговая, то заметить размыкание нельзя — все точки окружности симметричны. Но если орбита эллиптическая, а возмущение мало, то движение планеты будет представляться, как движение по эллипсу, точка перигелия которого (точка орбиты, ближайшая к Солнцу) перемещается (для планет перемещение происходит в действительности в направлении движения планеты по орбите). Перемещение перигелия происходит все время в одну сторону; поэтому эффект накапливается и, наблюдая его достаточно долго, можно в принципе измерить эффект любой малости.

Общая теория относительности позволяет вычислить величину смещения перигелия. За 100 лет смещение перигелия должно составлять 43,03 секунды для Меркурия, 8,63 секунды для Венеры, 3,84 секунды для Земли и 1,63 секунды для Марса. Для остальных планет смещение очень мало даже за 100 лет.

Как мы видим, перигелий смещается на вполне заметную величину, и его можно было легко наблюдать, если бы на движение планет не влияли другие планеты и они бы двигались, подчиняясь строго законам Кеплера. В действительности же из-за возмущения движения другими планетами перигелий Меркурия смещается в столетия на 534 секунды, величину, более чем в 10 раз превышающую эффект, который надо обнаружить. Из-за наличия у Земли большого спутника — Луны смещение перигелия Земли, связанное с другими небесными телами, даже еще больше, чем у Меркурия, и достигает до 1154 секунд за столетие.

Интересно, что хорошим объектом исследования могла бы быть малая планета Икар, обращающаяся среди других малых планет между Землей и Марсом, который имеет очень вытянутую орбиту, позволяющую более точно измерять движение перигелия. Считается, что наблюдения движения Икара могут увеличить точность измерений в несколько раз.

Сейчас накоплены данные, касающиеся движения трех планет: Меркурия, Венеры и Земли. Для Меркурия величина смещения перигелия за 100 лет, которая не может быть объяснена влиянием планет, составляет 43 секунды, для Венеры 8,2 секунды и для Земли около 5 секунд (для Земли данные очень грубые). Сравнивая эти значения с теоретическими, мы видим превосходное согласие.

Движение перигелия планет уже нельзя свести к изменению скорости света, и экспериментальное подтверждение этого эффекта оказывается очень важным (вероятно, самым важным) подтверждением идей общей теории относительности.

За прошедшие более полувека было сделано очень много попыток опровергнуть теорию и найти другие объяснения наблюдаемым эффектам. При этом обычно придавалось очень большое значение небольшим расхождениям, все еще существующим между теорией и опытом. Все такие попытки оказались неудачными. Сила аргументов общей теории относительности состоит в том, что путь объяснения эффектов очень естественный. И если бы были найдены какие-либо другие объяснения опытов, то физика оказалась бы в тяжелом положении, так как пришлось бы искать объяснения, почему исчезли эффекты теории относительности, какие другие эффекты их компенсировали.

Именно поэтому кажутся столь естественными неудачи множества попыток низвергнуть теорию относительности. Отсюда и возникло глубокое убеждение физиков, что общие представления о геометрии Вселенной основываются сейчас на незыблемом фундаменте.

Перейдем теперь к третьему опыту.

Третий эффект: красное смещение спектральных линий.

Очень убедительно демонстрируется действие тяготения на свет в эффекте изменения частоты света в поле тяжести. Спектральная линия, излученная атомом на Солнце, имеет меньшую частоту, чем та же линия, излученная таким же атомом на Земле. Так как меньшей частоте в видимом спектре соответствует его красная часть, то эффект получил название красного смещения. Его величина опять определяется отношением гравитационного радиуса Солнца к геометрическому радиусу и равна

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \sim \frac{r_{\text{солнца}}}{r}.$$

$\Delta\omega$ и есть красное смещение — разность частот одной и той же спектральной линии на Земле и на Солнце.

Эксперимент, который оказался очень трудным, дал значение, очень близкое к теоретическому. Трудности опыта связаны с тем, что атомы на Солнце находятся при высокой температуре, а потому имеют большие скорости — около 1 км в секунду. Излучение движущегося атома уже само по себе имеет частоту, отличающуюся от частоты света, излученного неподвижным атомом. Это изменение для Солнца оказывается того же порядка, что и гравитационное.

На звездах красное смещение должно быть больше, достигая для очень плотных и маленьких звезд — белых карликов значений, в 100 раз больших, чем для Солнца. К сожалению, для таких звезд плохо известны их геометрические размеры, так что трудно сравнить наблюдавшийся эффект с теорией.

Предлагалось много разных способов проверки теории

красного смещения с помощью спутников (для них смещение будет в обратную голубую сторону, так как поле Земли, действующее на спутник, меньше поля, действующего на поверхность Земли), эффект наблюдался несколько лет на Земле в лаборатории. Однако в действительности красное смещение дает очень мало сведений о теории относительности. Дело в том, что красное смещение не зависит от кривизны пространства, и формула для него может быть получена из закона сохранения энергии, примененного к кванту. Действительно, если считать, что потенциальная энергия кванта в поле тяжести на Земле очень мала по сравнению с его энергией на поверхности Солнца, то собственная энергия кванта на Земле должна быть меньше энергии кванта на Солнце, на величину его потенциальной энергии.

Энергия кванта, по формулам квантовой механики, равна $\hbar\omega$, его масса тогда будет равна $\hbar\omega/c^2$, а следовательно потенциальная энергия $\hbar\omega (q/r)$. Следовательно, надо ожидать изменение частоты, равное q/r , как это и было сказано.

Несколько лет назад изменение частоты света в поле тяжести наблюдалось в земных условиях английскими физиками Паундом и Ребкой.

Благодаря очень чувствительному методу измерений, связанному с так называемым эффектом Мессбауэра, сейчас можно обнаруживать ничтожные сдвиги частот. Опыт был поставлен так. На высоте около 20 м помещался источник квантов — возбужденное ядро железа. Квант регистрировался на поверхности Земли поглощением обычными ядрами железа. Если бы и источник и регистрирующая аппаратура помещались на одной высоте, то квант поглотился бы невозбужденным ядром, и результат опыта свелся бы просто к тому, что возбужденное ядро исчезло в одном месте и появилось в другом (то, что такой процесс поглощения одним из образцов кванта, излученного другим, возможен, было впервые открыто Мессбауэром).

Но если ядро излучает на некоторой высоте, то частота кванта, когда квант приходит на Землю, увеличивается на ту же относительную величину, на которую увеличилась бы кинетическая энергия тела, упавшего с этой высоты на Землю. Очевидно, что увеличение энергии тела с массой в 1 г равно gh , где g ускорение силы тяжести, а h высота. Поэтому относительное изменение частоты кванта с «массой» $\hbar\omega/c^2$ будет равно gh/c^2 , при $h=20$ м эта величина равна примерно $2,5 \cdot 10^{-15}$. Такое незначительное изменение частоты оказалось достаточно, чтобы ядра железа в детекторе уже не поглощали кванта. Для того чтобы восстановить поглощение, детектор приводился в движение. Тогда из-за изменения частоты со скоростью, которая называется эффектом Доплера, при скорости $v=gh/c$, смещение частоты компенсировалось и

ядра железа поглощали пришедшие кванты. При всей красоте опыта и удивительной чувствительности метода его результат не очень интересен. Опыт фактически сводится к измерению потенциала поля тяжести Земли, величины, которую измерил еще Галилей, когда бросал камни с высокой башни в Пизе.

ГЕОМЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Таким образом, уже через несколько лет после открытия общего принципа относительности, ее выводы были подтверждены опытом. Проблема тяготения наконец была решена. Но еще задолго до всеобщего признания справедливости этой теории Эйнштейн выдвинул новую идею, смелость которой может быть превосходит все то, что читали до этого времени физики в своих журналах. В первых работах соображения общего принципа относительности были использованы для изучения геометрии вблизи Солнца — весьма малого участка нашей Вселенной. Через 3 года (в 1917 г.) Эйнштейн ставит вопрос уже о применимости общей теории относительности к изучению Вселенной в целом. Это был вопрос о геометрии тех областей пространства, которые находятся вдали от больших небесных тел, где существуют лишь слабые постоянные поля, созданные удаленными мирами.

Надо было выяснить, можно ли считать, что удаленные миры не оказывают практически никакого влияния на геометрию, остается ли вдали от звезд геометрия евклидовой или нет. Вопрос был смел и отнюдь не празден.

Если в движении планет классическая физика не могла объяснить сравнительно малые отклонения от теоретических предсказаний, то ее применение к звездным мирам и галактикам приводило к тяжелейшему противоречию. Классическая физика не могла объяснить само существование Вселенной. Наиболее ярко ее беспомощность проявлялась в двух парадоксах, обнаруженных еще в прошлом веке. Если считать Вселенную бесконечной, то надо признать, что она более или менее равномерно заполняется звездами. Вряд ли можно сколько-нибудь серьезно предполагать, что звезды составляют лишь остров в бесконечной пустой Вселенной. Но если звезд бесконечное количество и они распределены равномерно, то куда бы мы ни посмотрели, луч зрения должен упереться рано или поздно в звезду. Если теперь сосчитать поток энергии, который посылают все звезды на Землю, то мы обнаружим, что он равен бесконечности! Это можно увидеть более строго. Рассмотрим поток энергии от какого-либо шарового слоя с центром на Земле. Число звезд (при равномерной плотности) в шаровом слое пропорционально квадрату расстоя-

ния, количество энергии, попадающей от одной звезды на Землю, обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому полное количество энергии, которое посылают все звезды выбранного шарового слоя на Землю, не зависит от расстояния. Отсюда уже прямо следует, что энергия, посылаемая на Землю от всех звезд, находящихся внутри шара с центром на Земле, будет пропорциональна радиусу шара и будет неограниченно расти, когда мы будем увеличивать этот радиус.

Может показаться, что положение спасет поглощение света в межзвездном пространстве, однако этот вывод только кажущийся. Поглощение приведет лишь к тому, что энергия будет приходить на Землю в другой форме, скажем, в виде тепла. Ничто не может спасти бесконечную Вселенную от неограниченного нагревания, если она подчиняется законам классической физики.

Второй парадокс возникает, если предположить всеобщую справедливость закона тяготения Ньютона. Так как ньютоновская сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния, то сила притяжения между Землей и всеми звездами в шаровом слое, так же как поток энергии, окажется бесконечной, и все звезды должны были бы либо слипнуться в большой комок, либо же приобрести бесконечно большие скорости. Обе возможности нелепы. Парадоксы свидетельствовали о катастрофическом неблагополучии классической физики: ей противоречило существование Вселенной!

Противоречия исчезли, как только для изучения законов Вселенной были использованы методы общей теории относительности.

Задача была поставлена Эйнштейном в таком виде.

Судя по нашим наблюдениям над постоянными звездами, писал он, мы в достаточной степени уверены, что систему постоянных звезд, вообще говоря, нельзя рассматривать как некий остров, плавающий в бесконечно пустом пространстве, и что нет чего-либо подобного центру тяжести всего существующего вещества. Более того, мы склоняемся к убеждению, что средняя плотность вещества не равна нулю.

Следовательно, возникает вопрос: можно ли эту подсказываемую опытом гипотезу согласовать с общей теорией относительности? Два человека доказали, что на этот вопрос существует утвердительный ответ: сам Эйнштейн и русский математик А. А. Фридман¹. Открытые ими закономерности оказались справедливыми в огромных областях Вселенной,

¹ Имя Александра Александровича Фридмана не пользуется, к сожалению, той известностью, которую он заслужил. Он умер 16 сентября 1925 г. в возрасте 37 лет. Ему принадлежат замечательные работы по математике, гидродинамике, метеорологии. Но самым крупным его достижением было открытие законов расширяющейся Вселенной, которое поставило Фридмана в один ряд с крупнейшими физиками всех времен.

простирающейся на миллиарды световых лет. (1 световой год $= 9 \cdot 10^{27}$ см $= 9 \cdot 10^{22}$ км). Нельзя не восхищаться дерзостью исследователей.

Путь исследований Эйнштейна был таков. С самого начала надо, очевидно, отказаться от того, чтобы учитывать реальное неравномерное распределение вещества во Вселенной (по крайней мере в виде звезд). Хотя земному наблюдателю мир представляется заполненным сгустками вещества, галактиками и их скоплениями, разбросанными на больших расстояниях друг от друга, расстояние между галактиками превышает собственные их размеры раз в 100. Но даже эти расстояния еще очень малы по сравнению с размерами видимой Вселенной. Не будет поэтому большой нелепостью считать, что вещество Вселенной распределено более или менее однородно. После этого уже можно записать уравнения и искать их решения. Исследованию модели однородной Вселенной и были посвящены первые работы.

Результат Эйнштейна сначала был обескураживающий — уравнения не имели решений. Силы притяжения, действующие между частицами вещества, равномерно заполняющими Вселенную, заставляли их сближаться совсем так, как это было в рассмотренном классическом парадоксе.

Для того чтобы избежать сбегания частиц, Эйнштейн предложил, что во всем пространстве существует еще некоторая сила отталкивания, которая и уравнивает силы притяжения. В уравнения было добавлено слагаемое, которое получило название космологического члена, создававшего равномерное «отрицательное давление» во всем пространстве. Такое решение проблемы казалось крайне искусственным. Можно даже утверждать, что с введением космологического члена сама задача была уничтожена, так как вопрос был перенесен на природу «отрицательного давления». Ясно, что такой способ существовал и в классической теории, и если бы он был единственным, работа Эйнштейна знаменовала бы поражение теории, а не ее триумф.

Ко всему этому Вселенная с космологическим членом оказалась еще и неустойчивой. Если в каком-нибудь месте плотность вещества оказалась бы меньше средней, то отрицательное давление в этой точке, не будучи уравновешенной силами притяжения, еще уменьшило бы плотность и равновесие нарушилось бы. Если, напротив, плотность оказалась несколько выше средней, то неуравновешенными оказались силы притяжения и вещество стало бы сжиматься.

Истинную причину неудачи понял в 1922 г. Фридман. Фридман заметил, что нет никаких оснований считать, что геометрия даже однородной Вселенной не изменяется со временем. Напротив, более естественно предположить, что эволюция Вселенной происходит так, что геометрия ее меняется

и состояние Вселенной сейчас и миллиарды лет назад должно быть разным.

Отбросив требования статичности решения, Фридман сразу же получил решения уравнения без каких-либо их исправлений. Для этого не пришлось прибегать к услугам космологического члена.

Даже Эйнштейн не поверил сначала в правильность решения, найденного Фридманом. Известны две его напечатанные заметки, в одной из которых он утверждает, что Фридман ошибся, а в другой соглашается, что ошибся он сам.

Решение Фридмана содержало новый вывод, казавшийся уже совсем невероятным. Так как решение не было статическим, то это значило, что все расстояния во Вселенной, если Вселенная действительно описывается решением Фридмана, должны меняться со временем. Этот маловероятный вывод получил неожиданное подтверждение. В 1929 г., через 7 лет после появления работы Фридмана, американский астроном Хэббл, работавший в обсерватории Маунт-Вильсон, обрабатывая наблюдения над далекими туманностями, обнаружил, что они разбегаются от земного наблюдателя. Скорость разбегания подчиняется удивительно простому закону. Если измерять расстояния D в парсеках (1 парсек = $3,26 \cdot 10^{13}$ км, это расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в 1 секунду), то для скорости удаления туманности V Хэббл нашел формулу

$$V = \frac{D}{1790}$$

Согласно этой формуле на каждый миллион парсек, т. е. на каждые $3 \cdot 10^{19}$ км, скорость возрастает на 560 км/сек. Хотя сама численная величина в этой формуле изменялась (увеличение скорости, по современным данным, составляет всего 75 км/сек на каждый миллион парсек), сам закон Хэббла подтвержден новейшими исследованиями.

Хэббл сам не знал работ Фридмана, но установленный им закон разбегания туманностей замечательным образом совпал с формулами теории Фридмана. Это и был величайший триумф науки.

РАЗБЕГАНИЕ ТУМАННОСТЕЙ

Очень нелегко было получить опытные данные о законе Хэббла. Исследование каждой туманности должно было включать в себя измерение ее скорости и расстояния. Скорость с давних пор измеряется по доплеровскому смещению. Когда светящийся объект удаляется от нас, то длинные волны испускаемого им света увеличиваются (волна «вытягивается»), частота соответственно падает. Наоборот, у налетаю-

щего источника длина волны уменьшается (волна «сплющивается»), а частота увеличивается.

Все далекие туманности имеют спектры, смещенные к красному концу. Это значит, что они удаляются. Величина смещения, как показывают простые расчеты, равна отношению скорости источника к скорости света

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{v}{c}$$

Таким образом, с измерением скорости вопрос решается сравнительно просто. Можно ли вообще измерять скорости на больших расстояниях, для которых еще надо определить, что мы примем за масштаб длины и времени? Самое разумное, что можно сделать в таком положении, это принять способ измерения скорости тела по изменению частоты излучаемого им света. После этого нам не надо связывать скорость с другими величинами, а, наоборот, выбирать ее, а не масштаб, за исходную.

Значительно сложнее обстоит дело с измерением расстояния. При расстояниях, которые свет проходит лишь за миллиарды лет, способ измерения расстояний путем обмена радиосигналами теряет всякий смысл.

Здесь на помощь астроному приходят сами галактики. Многие годы исследований привели астрономов к убеждению, что звезды, галактики и их скопления разделяются на сравнительно небольшое число типов, которые можно отличить, одни от других по характеру их спектров. Если это правда, то галактики одного и того же типа будут видны тем более яркими, чем ближе они находятся к нам. Тщательная обработка накопленных снимков неба позволила отобрать таким образом пару десятков галактик, для которых можно было определить их относительные расстояния. При обработке нельзя было, конечно, пользоваться формулами классической оптики, согласно которой светимость падает обратно пропорционально квадрату расстояния. Такое предположение, как мы знаем, приводит к парадоксу бесконечной светимости неба. Обработка производилась с помощью формул теории Фридмана.

Для того чтобы узнать расстояния до туманностей не в относительных величинах, а в парсеках, надо было знать абсолютное расстояние хотя бы для одной сравнительно близкой туманности. Именно эта последняя операция внесла наибольшую путаницу. Несколько раз астрономы пересматривали «масштаб» Вселенной и меняли тем самым расстояния до туманностей и в результате изменяли постоянную в законе Хэббла. Кто знает, окончательно ли установилась шкала расстояний сейчас; скорее всего она уже не изменится слишком сильно. Сейчас закон Хэббла записывают так:

$$v = hD.$$

h называют постоянной Хаббла и считают равной $\frac{1}{h} = 13 \cdot 10^9$ лет.

Мы написали величину, обратную h , чтобы получить число с обычной размерностью времени, которое принято измерять в годах (напомним, 1 год $= 3,15 \cdot 10^7$ сек. $\approx \pi 10^7$ сек!).

Хаббл удалось измерить скорости туманностей, доходящие до 1000 км/сек, что отвечает расстоянию $(D=v/h) 4 \cdot 10^7$ световых лет $\approx 4 \cdot 10^{25}$ см. Смещение частоты для таких туманностей было очень мало, составляя лишь 0,3%. С помощью современных телескопов, проникающих далеко в глубь Вселенной, были измерены скорости скоплений галактик, доходящие до 140 000 км/сек (0,45 от скорости света), что отвечает поистине астрономическим расстояниям в 6 млрд. световых лет. Наблюдавшееся смещение частот равно 45%. Это значит, что голубой конец спектра оказался смещенным на его красный край, и все, что видит глаз, лежит у близких галактик в ультрафиолетовой части спектра. Если бы на такой галактике горел зеленый светофор, то для земного шофера он настолько «покраснеет», что исчезнет в инфракрасной части спектра.

В результате многолетних наблюдений астрономы таким образом установили связь между смещением частоты и звездной величиной галактик (их светимостью). Полученное соотношение хорошо совпало с тем, которое получается из теории Фридмана.

Так было окончательно установлено, что общая теория относительности правильно описывает основные черты геометрии Вселенной.

После этого можно уже было посмотреть и некоторые детали.

Геометрия в теории Фридмана характеризуется тремя физическими постоянными: постоянной тяготения G , постоянной Хаббла h и средней плотности вещества во Вселенной ρ . Из этих трех величин можно составить безразмерную постоянную

$$\frac{h^2}{G\rho}$$

Она играет основную роль, определяя характер изменения геометрии во времени.

Если эта величина равна $\frac{4\pi}{3}$, то кривизна Вселенной всегда равна нулю — Вселенная плоская, но расстояния все время неограниченно растут.

Если эта величина меньше $\frac{4\pi}{3}$, то расстояния сначала растут, доходят до некоторого максимального значения, а потом убывают. Наконец, если они больше, чем $4\pi/3$, то расстояния все время убывают. В обоих случаях геометрия неевклидова.

ва, и радиус кривизны ее при современном значении постоянной Хаббла, грубо говоря, равен $c/h \sim 10$ млрд. световых лет. Из трех величин наименее известно значение плотности вещества ρ . Поэтому удобно ввести новую величину, имеющую размерность плотности, и назвать ее критической плотностью.

$$\rho_{кр} = \frac{3h^2}{4\pi G} = 2 \cdot 10^{-29} \frac{г}{см^3}$$

Сказанное выше можно повторить так: если окажется, что истинная плотность $\rho > \rho_{кр}$, то расширение Вселенной должно в принципе смениться сжатием, если $\rho < \rho_{кр}$, то расширение будет происходить неограниченно долго. Граничный случай $\rho = \rho_{кр}$ отвечает плоской расширяющейся Вселенной. Таким образом, дальнейшие выводы зависят от того, какой окажется средняя плотность вещества во Вселенной.

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Измерить плотность вещества во Вселенной очень трудно. Вещество звезд составляет лишь небольшую долю всего запаса вещества. Принято считать, что внутри нашей галактики, членом которой является солнечная система, в среднем приходится по одному протону на 1 см^3 , т. е. плотность внутри галактики составляет примерно $1,6 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$.

Совсем неопределенными оказываются оценки плотности вещества в пространстве между галактиками. Эти разные, но не очень достоверные оценки колеблются между 10^{-30} г/см^3 и 10^{-29} г/см^3 . Из этих оценок следовало бы, что Вселенная будет расширяться неограниченно, если бы в плотность и вносили вклад какие-либо невидимые частицы типа квантов и нейтрино.

Предположим пока, что их нет. Числа, приведенные выше, показывают удивительное совпадение. Оценка плотности оказывается очень близкой к критическому значению, так что с хорошей точностью ρ оказывается равной h^2/G . Возможное расхождение в 10 раз не очень существенно при таких абсолютных значениях; ведь ρ могло отличаться от полученного значения сколь угодно сильно. Удивительное соотношение $\rho \approx h^2/G$ без всяких тонкостей теории указывает на глубокую связь разбегания галактик с общими геометрическими свойствами пространства и законами тяготения. В любой другой теории такое соотношение будет носить мистический характер.

Оглянемся еще раз в историю, на путь, который прошла наука о тяготении от камней, сброшенных Галилеем с Пизанской башни, до открытия расширения Вселенной.

Нельзя не преклониться перед могуществом человеческого разума, сумевшего обнаружить в падении яблока на голо-

ву Ньютона и в расширении Вселенной одну и ту же причину. Познавание геометрии Вселенной надо считать самым смелым подвигом естествознания.

НЕЙТРИНО ВО ВСЕЛЕННОЙ

Теперь мы отойдем от установленных фактов и уйдем немного в область, близкую к научной фантастике. Многих давно занимал вопрос: что делают во Вселенной нейтрино¹. Семейство нейтрино, а их сейчас известно целых четыре сорта, обладают удивительными свойствами. Они почти не взаимодействуют с веществом. Для того чтобы задержать нейтрино, например, с энергией 1 млн. электроновольт, нужна железная стена толщиной 10^{13} км. Нейтрино свободно пролетают через земной шар и при малой средней плотности Вселенной проходят ее насквозь. Нейтрино должны поэтому накапливаться во Вселенной. Естественно спросить, не может ли быть, что нейтрино во Вселенной так много, что именно они и определяют всю геометрию.

Происхождение нейтрино может быть разное. В мировом пространстве все время происходят распады элементарных частиц мюонов, пионов и каонов. При их распаде вылетают нейтрино и антинейтрино обоих типов. Одни сопровождают родившиеся электроны, другие родившиеся мюоны. В звездах непрерывно происходят бета-распады, при которых вылетают электронные нейтрино. Только на поверхность Земли от Солнца ежесекундно попадает более 10^{11} нейтрино на каждый квадратный сантиметр.

Но кроме того, нейтрино могут иметь и не вторичное происхождение. Не исключена возможность, что на такой стадии эволюции Вселенной нейтрино и антинейтрино составляли вообще основную часть вещества, и мир не выглядел тогда таким несимметричным, как сейчас, когда он в основном состоит из положительно укрепленных тяжелых протонов и отрицательно укрепленных электронов.

Интересно, что нейтрино, имеющие такой солидный возраст, дойдут до нее существенно измененными. Мы видели, что свет, покинув много лет назад звезду или галактику, приходит к земному наблюдателю «покрасневшим», с уменьшенной энергией. Точно такое же «красное смещение» должно испытывать и нейтрино. Энергия нейтрино, так же как и энергия кванта, падает с расширением Вселенной пропорционально уменьшению ее кривизны. Такого рода соображения заставляют подозревать, что в нашей Вселенной может суще-

¹ Связь нейтрино с космологией обсуждалась Я. Б. Зельдовичем, Б. М. Понтекерво, Я. А. Смородинским, а также Уиллером (США).

ствовать очень большое количество нейтрино с малой энергией.

На первый взгляд казалось бы, что такой путь рассуждения может привести нас к утверждению, что нейтрино в природе содержат энергию, во сколько угодно раз большую массы видимого вещества. Однако это не так. Если бы энергия нейтрино была бы действительно такой, то кривизна мира стала бы также большой. Это, однако (как будет видно дальше), привело бы нас к противоречию с другими известными фактами. Таким образом, самые общие соображения позволяют все же ограничить возможную энергию нейтрино величинной порядка несколько единиц на 10^{-29} г/см³.

Все же не исключено, что нейтрино в мире много, так что их плотность доходит до $\rho_{кр} = 2 \cdot 10^{-29}$ г/см³. Такая возможность очень заманчива, так как нейтрино отводилась бы вся почтенная роль в системе мира. Они определяли бы геометрию мира и ее эволюцию во времени.

К сожалению, нейтрино слишком трудно наблюдать, и может пройти еще очень много лет, пока можно будет сказать что-либо более определенное.

ТЯГОТЕНИЕ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Вопрос о нейтрино составляет только часть общей проблемы о связях между геометрией Вселенной и элементарными частицами. Другая часть той же проблемы возникает при обсуждении пространства в структуре элементарных частиц.

Из постоянной теории относительности и постоянной Планка можно составить величину имеющую размерность длины и равную примерно 10^{-32} см (квадрат ее есть hG/c^3). Означает ли существование такой величины, что границы теории простираются столь далеко в глубь вещества или нет, неизвестно. В теории элементарных частиц существуют еще две длины, играющие фундаментальную роль. Одна из них есть радиус действия ядерных сил около $1,5 \cdot 10^{-13}$ см, другая определяет вероятности бета-распадов, она равна 10^{-16} сек. Физики недавно перешли первую границу и могут проникать в глубь вещества до расстояний около 10^{-14} см. Что ждет их дальше? На этот вопрос ни теория, ни тем более эксперимент ответить сейчас не в состоянии. Но так же, как в масштабах Вселенной начинает выступать нейтрино, так, может быть, и с другой стороны Вселенной, в микромире, должно произойти объединение двух пока еще не перекрещивающихся наук.

Можно прийти к странным выводам, если пытаться фантазировать на тему о том, какие свойства должна иметь геометрия очень малых расстояний. Прежде всего мы столкнемся с тем, что в нашем распоряжении нет масштабов, нет твердой линейки, которой можно измерять длины. Что же касается

времени, то атомные системы с их угловыми энергиями могут служить хорошими часами. Поэтому в микромире все геометрические измерения придется описывать как измерения времени. Измерение времени квантовыми часами играет фундаментальную роль в определении геометрии даже в макроскопических явлениях. Когда мы обсуждали парадокс часов, нам надо было выбрать такой способ измерения времени, который не зависел бы от ускорений. Никакой способ, основанный на классических явлениях, не может гарантировать этого. Часы, которыми пользовался Галилей (он пользовался также и «биологическими часами» — счетом собственного пульса), или песочные часы, нарисованные на обложке книги, вообще останутся в летящей ракете. Только переходы в атомах будут сохранять свой ритм.

Точно так же изменение частоты света на Солнце можно было измерить только потому, что мы уверены в неизменности устройств атома на Земле и Солнце.

Так возникает неожиданная связь между квантами и гравитацией, если продолжить рассуждения на один шаг дальше и спросить, как должны быть устроены приборы, измеряющие время и расстояние, чтобы они могли служить поставленной цели.

Другая область, где гравитация соприкасается с квантами, связана с потерей энергии на излучение гравитационных волн. Однако эффекты такого рода очень малы и нельзя ничего сказать о том, играют ли они хоть какую-нибудь роль в процессах, происходящих во Вселенной.

Следует добавить еще несколько слов о так называемой антигравитации. Изредка появляются утверждения, что античастицы, может быть, обладают отрицательной гравитационной массой (подобно тому, как они обладают противоположным зарядом) и должны отталкиваться от земли, а не падать на землю.

Такая возможность в действительности противоречит не только принципу эквивалентности (Галилей, конечно, не проверял свои выводы на античастицах!), но и прямому опыту. Если бы это было так, то истинно нейтральные частицы, не имеющие античастиц, вовсе не взаимодействовали бы с полем тяжести (были бы нейтральными и в гравитационном отношении). Но фотон притягивается к Солнцу! Вот и все!

ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Мы подходим к концу рассказа, а к концу всегда возникает желание спросить о том, что же можно сказать теперь, узнав так много о геометрии Вселенной, о ее дальнейшей судьбе и о ее истории. Хотя масштабы времени, за которое могут

происходить какие-либо изменения, фантастически велики — это миллиарды лет, но они не так уж непривычны, например геологам, изучающим старую Землю, родившуюся 5 млрд. лет назад. Человеку свойственна любознательность!

Вопреки обычному мнению, предсказывать в науке будущее несравненно проще, чем восстанавливать историю.

Уже из имеющихся данных ясно, что Вселенная будет продолжать расширяться еще очень долго (по крайней мере, еще десятки миллиардов лет). К сожалению, сейчас еще не хватает данных о плотности вещества, чтобы можно было сказать, сменится ли когда-либо процесс расширения на сжатие или нет.

Последние теоретические работы Е. М. Лифшица, И. М. Халатникова и В. В. Судакова дают основание считать, что если период сжатия и наступит, то сжатие не будет слишком сильным и сменится опять новым периодом расширения. Так что у нас нет никаких оснований ожидать в будущем каких-либо катастрофических происшествий с геометрией.

Несравненно более неопределенным выглядит прошлое геометрии. Если мир расширяется и расширялся раньше, то где-то в прошлом он должен был быть совсем маленьким, и плотность вещества в нем должна была быть чудовищно велика. Это то, что часто называют «началом мира». Время, когда такая плотность должна была существовать, зависит опять от неизвестной нам величины: современной плотности вещества ρ . Если ρ составляет около 10^{-29} г/см³, то «начало мира» отстоит от наших дней примерно на 10 млрд. лет. Эта цифра во всяком случае не противоречит геологическим и астрономическим данным о возрасте Земли и звезд. Правда, некоторые астрономы считают, что существуют галактики, возраст которых доходит до 20—25 млрд. лет, но кто может поручиться за то, что в какой-либо из оценок просто сделана ошибка в 2—3 раза.

Однако если плотность ρ была бы в несколько раз больше, то оценка «возраста мира» привела бы к столь малым значениям (2—3 млрд. лет), что она вступила бы в резкое противоречие со всеми другими данными. Именно это обстоятельство ограничивает большие плотности нейтринно во Вселенной. (Это само по себе интересное следствие общей теории относительности.)

Если мы согласились, по крайней мере условно, на возрасте Вселенной в 10 млрд. лет, то естественно спросить, а что было 10 млрд. лет назад? И здесь теория (по крайней мере) сейчас бессильна сказать что-либо определенное.

Можно представить себе, что это был период, когда происходил процесс образования галактик. При очень больших плотностях могли протекать интенсивные ядерные процессы, которые уже не могут быть описаны одними только уравне-

ниями теории относительности. Может быть, никаких больших плотностей никогда и не было, а нашему периоду расширения предшествовал период сжатия. В таком мире звезды и элементы рождались бы непрерывно, подобно тому, как это происходит и сейчас в глубинах галактик. Здесь мы стоим у границы, до которой дошла современная наука. Трудно представить себе, что еще лежит за этой границей. Ясно только одно: предстоят трудные опыты и трудные теоретические исследования, которые должны помочь человеку проникнуть дальше в тайны природы.