

В. ЗАХАРОВ

ТЯГОТЕНИЕ

ОТ
АРИСТОТЕЛЯ
ДО
ЭЙНШТЕЙНА



Лаборатория
ЗНАНИЙ

В. ЗАХАРОВ

ТЯГОТЕНИЕ

ОТ
АРИСТОТЕЛЯ
ДО
ЭЙНШТЕЙНА

4-е издание, электронное



Москва
Лаборатория знаний
2020

УДК 530.1
ББК 22.3
3-38

Захаров В. Д.

З-38 Тяготение: от Аристотеля до Эйнштейна / В. Д. Захаров. — 4-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 281 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-816-2

В данном учебном пособии излагается релятивистская (т. е. основанная на теории относительности) механика. Основное внимание уделяется теории тяготения и космологии.

Книга рассчитана на преподавателей и студентов вузов; также будет полезна учителям и учащимся старших классов.

**УДК 530.1
ББК 22.3**

Деривативное издание на основе печатного аналога: Тяготение: от Аристотеля до Эйнштейна / В. Д. Захаров. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. — 278 с. : ил. — ISBN 5-94774-040-0.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

ISBN 978-5-00101-816-2

© Лаборатория знаний, 2015

Оглавление



Предисловие	5
Глава 1. Загадка тяготения	7
Глава 2. Обращаемся к Аристотелю	13
Глава 3. Еще глубже, к истокам	15
Глава 4. Все движется. Но почему?	18
Глава 5. Физика есть противоречие	20
Глава 6. Физика невозможна без метафизики	24
Глава 7. Почему Аристотелю не понадобилась «сила тяжести»?	27
Глава 8. Первое учение о тяжести. Галилей	32
Глава 9. Принцип относительности и гелиоцентрическая система мира	38
Глава 10. Какая система мира истинна?	46
Глава 11. Каково же истинное движение планет? Кеплер	51
Глава 12. Мир протяженностей, или бегство от мистики. Декарт	57
Глава 13. Ньютон. Завершение классической механики	65
Глава 14. Всемирное тяготение	73
Глава 15. Закон Ньютона и космонавтика	79
Глава 16. Что является теорией тяготения с XX века?	84
Глава 17. Истина гелиоцентрической системы	87
Глава 18. Метафизика в физике Ньютона	92
Глава 19. Эйнштейн. Закон равенства инертной и гравитационной масс	102
Глава 20. Парадигма Ньютона и концепция поля	108
Глава 21. Предпосылки и принципы частной теории относительности	110
Глава 22. Элементы релятивистской кинематики	121
Глава 23. Элементы релятивистской динамики	128
Глава 24. Ускоренная система отсчета и гравитационное поле ..	142
Глава 25. Гравитационное поле – не скалярное	150
Глава 26. Гравитация и инерция. Принцип Маха	152
Глава 27. Эрнст Мах	159

Глава 28. На пути к теории: новые проблемы	166
Глава 29. Гравитация и геометрия	170
Глава 30. Понятие о многообразии. Риманова геометрия	177
Глава 31. Пространства общей теории относительности	180
Глава 32. Уравнения гравитационного поля	189
Глава 33. Движение в гравитационном поле	200
Глава 34. Эффекты ОТО. Гравитационные волны	208
Глава 35. Эффекты ОТО. Черные дыры	213
Глава 36. Эффекты ОТО. Космология	224
Глава 37. Экспериментальные подтверждения ОТО	250
Глава 38. ОТО: итоги и перспективы	260
Глава 39. Альберт Эйнштейн: личность и судьба	267
Литература	277

Предисловие



Посвящается моему учителю
Абраму Леонидовичу Зельманову

Цель данного учебного пособия — приблизить широкий круг студентов вузов и университетов к пониманию основ современной релятивистской механики — «специальной» (частной) и общей теории относительности. Выпускник вуза — и не только теоретик — должен ориентироваться в теоретических вопросах современного естествознания, которые расширяют его общий мировоззренческий кругозор. Именно такая цель ставилась автором в читаемом им курсе для студентов Университета печати. Посвященная сложным вопросам современной теоретической физики, эта книга, однако, требует лишь минимальной теоретической подготовки в области классической механики и математического анализа.

Смысловой стержень книги составляет последовательное изложение теории тяготения, как ньютоновской, так и современной — теории тяготения Эйнштейна с ее многочисленными астрофизическими выводами, касающимися существования черных дыр, гравитационных волн, эволюции Вселенной и др.

Чтобы дать студенту представление об этих вопросах, не слишком отягощенное сухим математическим формализмом, автор в изложении материала избирает путь исторической ретроспективы: он хочет показать, каким путем человеческая мысль пришла к формированию современной полевой теории тяготения. Для этого в книге пришлось уделить достаточное внимание доэйнштейновским концепциям тяготения. Речь идет не об одной лишь ньютоновой теории тяготения, хотя и ее последовательного изложения нет ни в одном вузовском курсе физики. Чтобы выдержать последовательно-исторический угол зрения, автору

пришлось начать книгу с изложения античных физических концепций.

Подобное изложение физических проблем в учебном пособии для вузов весьма ново и нетрадиционно. Но автор сознательно избрал этот путь, чтобы сделать изложение живым и интересным для читателя. Этой же цели подчинена и другая особенность книги: внесение в нее персоналий — очерков, характеризующих творческую сторону жизни таких ученых, как Ньютон, Мах, Эйнштейн.

Загадка тяготения



Что такое сила тяжести? Спросим себя: почему камень, брошенный вверх, начинает падать вниз? Ответ как будто простой, он известен из школьной физики: потому что на камень со стороны Земли действует сила, называемая нами силой тяжести. А что это такое, сила тяжести? И тут ответ кажется простым: это — та причина, которая вызывает падение камня и других тел на Землю. Эти два ответа содержат так называемый логический порочный круг: одно явление объясняется через какое-то другое — его причину, а эта причина сама объясняется лишь через то явление, которое требовалось объяснить. В данном случае падение тел на землю объясняется некоторой причиной — силой тяжести, а сила тяжести сама объясняется лишь через падение тел на Землю. Другого определения силы тяжести мы дать не можем, мы говорим только: сила тяжести — это то, что вызывает падение тел.

В результате никакого объяснения падения тел мы, в сущности, не имеем. Вот почему один знаменитый философ (Артур Шопенгауэр) на вопрос, отчего камень падает, ответил: потому что так хочет камень. Этот ответ также ставит нас в тупик, он кажется ненаучным: это только в древних мифах неодушевленные предметы наделяются сознанием или чувствами, но мы-то знаем, что камень не может ничего хотеть. Но Шопенгауэр неспроста дал такой ответ. Он этим хотел сказать, что другое объяснение — «камень падает в силу закона тяготения» — ничуть не менее чудесно, чем объяснение, которое можно встретить в мифах. «Закон тяготения» — это тоже некое чудо, до тех пор пока мы его не разгадаем.

Да и всегда ли тело, находящееся над Землей и предоставленное само себе, падает? Не может ли случиться, что оно зависнет в воздухе и не захочет падать? В древнем греческом мифе и это возможно. Правда, миф считает, что камень всегда «хочет» только падать и потому сам по себе никогда не зависает. Но есть воля более могущественная, чем у камня, — это воля богов. Боги могут заставить камень зависнуть в воздухе. В одном мифе камень, повисающий в пустоте над головой Тантала, только грозит упасть, но не может. Почему? Потому что так хочет Зевс, главный Бог, отвечает миф. Это он заставил камень остановиться.

Древние греки не знали, что это чудо — зависание тела в пустоте над Землей — возможно и без воли Зевса. Если мы находимся в космическом корабле (спутнике), свободно обращающемся вокруг Земли, то заметим, что мы потеряли свой вес: мы свободно парим в пустоте и не падаем на дно спутника. Да и сам спутник, масса которого даже значительно превосходит нашу, тоже ведь не падает на Землю. Отчего это так? Разве его и нас более не притягивает Земля? Разве она куда-то исчезла? Нет, вот она — наша планета, видна во всей космической красе из иллюминатора спутника. И она вовсе не лишилась своей способности притягивать: ее *поле тяготения* никуда не делось, оно присутствует в любой точке над нашей планетой. Свяжитесь по радио с Землей — вам скажут, что там по-прежнему любое тело, практически как угодно высоко подброшенное, падает вниз. И даже если его подбросить до той высоты, на которой находится ваш спутник, оно все же начнет падать на Землю.

Значит, в любой точке над Землей, даже очень от нее удаленной, присутствует «тяжесть». Она может стать значительно слабее, чем на поверхности Земли, но нигде не исчезает совершенно. Так что ни в коем случае нельзя думать, что где-то очень далеко от Земли царит невесомость — отсутствует тяжесть.

Вездесущность тяготения. Это свойство тяготения — присутствовать всюду — называют его *универсальностью*. Тяготение не только всегда и всюду есть, но от него нигде и никогда невозможно хотя бы на время отгородиться, чем-либо от него

заслониться. Мы знаем, что свет — электромагнитные волны — можно погасить. Из школьной физики известно, что электромагнитное поле можно «экранировать», т. е. уничтожить его в некоторой области пространства, заслонившись от него металлическим экраном. Никакого подобного «экрана», которым можно было бы убрать поле сил тяготения, не существует, хотя, может быть, об этом стоило бы пожалеть.

Здесь уместно вспомнить фантастический роман Герберта Уэллса «Первые люди на Луне». Там один ученый, Кейвор, изобрел необыкновенный материал, названный по его имени «кейворит». Из него можно было изготавливать экран, за которым пропадала земная тяжесть. Поместившись внутри оболочки, сделанной из кейворита, люди становились недоступны тяжести и могли, оттолкнувшись от Земли хоть соломинкой, свободно улететь от нее, не нуждаясь ни в каком двигателе. Так люди (в романе Уэллса) смогли улететь с Земли на Луну.

Сколь бы нам ни нравилась такая фантастическая возможность, увы, она так и остается не больше чем фантазией. Первые люди оказались на Луне (21 июля 1969 г., это были американцы Н. Армстронг и Э. Олдрин) не благодаря кейвориту. Силу тяжести убрать невозможно — ее можно только преодолеть с помощью ракетного двигателя и таким образом улететь сколь угодно далеко от Земли.

Со времен Ньютона мы знаем, что силы тяготения не только всюду есть вокруг Земли, но они есть и вообще всюду в Космосе. Ньютон показал, что планеты, обращающиеся вокруг Солнца, движутся той же силой, которая заставляет камень падать на Землю. Ибо закон действия силы тяжести, притягивающей камень к Земле, и силы, вынуждающей планеты вращаться вокруг Солнца, оказался один и тот же.

Вот он, единый, или универсальный закон действия этой силы, открытый Ньютоном: сила, притягивающая тела друг к другу, прямо пропорциональна произведению их масс m_1 и m_2 , и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} ,$$

где k — постоянный коэффициент. Поэтому Ньютон и назвал тяготение *всемирным*.

Почему же, находясь в спутнике, мы вдруг потеряли свой вес? Поле сил тяготения Земли не исчезло — дело, значит, не в Земле, а в нас: выходит, тела могут быть поставлены в такие условия, при которых они становятся недоступны даже вседущему притягательному действию Земли — в том смысле, что оно не может изменить их движение: оно не может заставить нас падать на Землю, как в обычных условиях оно заставляет падать камень.

Итак, «сила тяготения» присутствует всюду, но не все тела и не всегда ей подчиняются: одни падают на Землю, другие ведут себя так, *как будто* земной тяжести не существует. В одних случаях Земля оказывает влияние на движение тела (тогда мы говорим: она есть причина изменения его движения), в других случаях та же сила тяжести Земли никак не может повлиять на движение тела.

Сила и движение. Так что же такое вообще сила и как она связана с движением тел? Оба вопроса, на первый взгляд столь простые, на самом деле не просты. Может быть, сила не связана с движением, и движение вообще возможно без силы? И в самом деле: движущиеся тела мы видим, наблюдаем. А наблюдаем ли мы когда-нибудь силу?

Можно подумать: да, наблюдаем. Потому что мы наблюдаем тела, оказывающие силовое воздействие одно на другое. Когда сталкиваются два тела, мы знаем, что каждое из них действует на другое с равными и противоположно направленными силами (третий закон Ньютона). Тело действует на другое тело, изменяя его движение, — разве это не есть наблюдаемое действие силы? Причем явно наблюдается и сам носитель силы: на каждое из двух тел действует сила со стороны другого тела.

Но и на это сразу можно возразить: мы и здесь познаем действие силы только через изменение движения, вызванное этой силой. Сила опять объясняется через движение. Но что она такое сама по себе — это остается непонятным.

Может показаться странным: почему это мы не знаем, что такое сама по себе сила, без вызываемого ею движения? Все мы знаем понятия «сила», «усилие», которые мы употребляем с самого детства. И с самого детства знаем, что сила познается и измеряется через усилие, т. е. через напряжение наших собственных мышц. Можно даже вспомнить то, что объяснялось в школе про прибор для измерения силы, называемый динамометром. Он измеряет *силу* упругости пружины (силу!), и возрастание этой силы мы непосредственно ощущаем по возрастанию нашего мускульного усилия при растягивании пружины. Чего же более?

На это можно ответить словами великого математика и механика Анри Пуанкаре (1854–1912). Он сказал: определять силу, основываясь на нашей интуиции усилия — значит давать плохое (можно сказать — не научное) определение, потому что эта интуиция субъективна и не переводима на язык чисел. Это во-первых. Во-вторых, в разобранных нами примерах — натяжение пружины и столкновение тел — мы могли наблюдать или ощущать прямое действие силы: либо в виде удара, либо в форме собственного мускульного ощущения. Однако прямое действие силы, реализованное телами, мы наблюдаем только при прямом контакте тел друг с другом. Но далеко не все силы в природе контактные. Есть такие силовые действия тел, которые осуществляются без их контакта — на расстоянии. Именно к ним относятся силы, которые мы называем силами тяжести. Солнце притягивает Землю на расстоянии, без какого-либо контакта с нею. Пуанкаре заметил по этому поводу, что сводить определение и измерение силы к нашим мускульным ощущениям (как при растягивании пружины динамометра) — значит утверждать, что и Солнце, притягивая Землю, испытывает мускульное ощущение. Не смешно ли?

Итак, мы снова убедились, что мы не можем непосредственно наблюдать на опыте действие силы тяжести. Все, что мы наблюдаем, — это изменение состояния движения тела (например, падение камня) под действием «силы тяжести». Снова объясняем движение через силу, а силу, в свою очередь, через движение. Снова порочный круг.

Если разделить все действующие в природе силы на контактные и неконтактные, то мы можем сказать, что неконтактные силы как таковые, сами по себе, без вызываемого ими изменения движения, мы никогда не наблюдаем. Что же заставляет нас говорить о силе как о *причине* движения? Раз мы не знаем, что такое сама по себе сила, говорит Пуанкаре, то мы имеем столько же оснований утверждать, что сила — не причина, а следствие движения.

Обращаемся к Аристотелю



Почему столь важен вопрос о причине движения? Потому что это — самый основной вопрос физики. Можно сказать, физика возникла как ответ на этот вопрос. И далее физика развивалась в течение тысячелетий в новых попытках найти ответ на этот же самый вопрос: почему тела движутся?

Что такое знание? Движения тел — факт нашего чувственного опыта. Он требовал объяснения. Человеческая же потребность в познании проявляется в преимущественной потребности отыскивать причины. Познание — это не есть просто знание каких-то фактов. Знание отдельных разрозненных фактов, не связанных между собой причинно-следственными связями, — это еще не научное, это — *эмпирическое* знание.

Герой одной пьесы А. Чехова открыл, например, удививший его факт — что французский писатель О. Бальзак венчался в украинском городе Бердичеве. Так вот, знание этого факта нельзя признать научным, пока герой не выяснил связь его с другими фактами, иными словами, не установил непосредственной его причины. Иначе этот факт окажется чисто случайным, а значит бессмысленным. Такие чисто случайные факты греческий философ Аристотель не признавал научными. Недаром этому великому философу принадлежит определение того, какое знание следует признавать научным. И недаром имя Аристотеля, жившего в 384–322 годах до нашей эры, стоит у истока столь многих наук о природе. Именно он первый понял, что, не отыскивая причин, мы никогда не объясним явлений.

Аристотель написал два основных сочинения, касающиеся изучения природы: «Физику» и «Метафизику». Под «метафизикой» до сих пор понимается то, что под ней понимал Аристотель:

учение о сверхчувственных принципах и началах мира, т. е. обо всем том, что не может быть воспринято в нашем чувственном опыте, нашими органами чувств.

Зачем заниматься тем, что не воспринимается чувствами? Да и существует ли оно? Казалось бы, если мы не можем видеть или осязать, взвешивать или измерять какую-либо вещь, то мы не можем иметь и никакой гарантии, что эта вещь существует.

Архэ — сущность вещей. Правильно ли такое рассуждение? Нет, неправильно. Когда человечество поняло это, возникло философское понимание природы. Оно так и называлось у древних греков — «натурфилософия». Натурфилософия возникла задолго до Аристотеля, на рубеже VII–VI веков до н.э. Аристотель написал первую историю древней греческой философии и объяснил в ней, откуда и каким образом эта философия могла возникнуть. Она возникла, когда люди впервые догадались, что окружающий их мир в действительности совсем не таков, каким он кажется. Не таков, каким он представляется нашим чувствам и нашим восприятиям. Когда люди осознали это, возникло первое научное понимание природы. И тут выяснилось, что «физическое» — то, что мы воспринимаем чувствами и называем *явлениями*, — нельзя понять и осмыслить без «метафизического», без того, что лежит за пределами наших восприятий. Или, говоря проще: чтобы объяснить мир, какой мы воспринимаем, надо было допустить существование того, что мы не воспринимаем. Это невоспринимаемое, лежащее в основе всех видимых явлений мира, было названо «началом», или первоначалом мира: по-гречески — *«архэ»*.

Что же такое было греческое «архэ»? Если оно само по себе невидимо и не воспринимаемо, то как определить его свойства? Обладает ли невидимое хотя бы какими-то свойствами видимого и осязаемого? Обладает ли нематериальное первоначало мира какими-либо свойствами материи? Свойства материи, например, движение тел, нами познаваемо и даже измеряемо: мы, например, измеряем скорости движения тел и их ускорения. Если «архэ» не имеет никаких свойств материального, то как оно может быть познано?

Еще глубже, к истокам



Греки не только верили в скрытое первоначало мира, но и считали, что оно может быть познано разумом. Этим объясняется, почему в самой древней философской школе греков — ионийской (Фалес, Анаксимандр, Гераклит) — первоначало, лежащее за обманчивым фасадом явлений, не отделялось от материального. Это означало, что физика не отделялась еще от метафизики: первосущность мира, «архэ», рассматривалась как некая первоначальная материя. Иными словами, сущность вещей, скрытая за материальными явлениями, сама обладает свойствами материи: например, воды (Фалес) или огня (Гераклит). Однако и «вода», и «огонь» понимались как *невидимые первосущности*, т. е. рассматривались метафизически: это — скрытая основа вещей, а не сами вещи.

Бытие. Так у греков возникло понятие «бытие» — неизменная основа вещей, отличающаяся от переменчивых образов видимого мира, всегда преходящих, всегда уничтожающихся.

«Все течет, все изменяется», — говорил Гераклит. Это значило: в видимом мире нет ничего устойчивого, постоянного, абсолютного. Как можно познать то, что всегда изменяется, что всегда преходит, но никогда не есть? Как установить нечто закономерное, постоянное в том, что все — непостоянство, все — изменчивость? По представлениям греков, мир доступен разуму потому, что в скрытой своей сущности он сам устроен разумно. Это скрытое первоначало мира есть бытие — то, что никогда не уничтожается и не преходит, но то, что всегда *есть*.

Все было бы загадочно, непостижимо, если бы в основе изменяющегося не лежало неизменное, если бы в основе непонят-

ного и неразумного не лежала высшая разумная связь мирового целого, некий объективный закон, сообщающий смысл вечному мировому процессу. Этот всеобщий внутренний смысл, по Гераклиту, есть *Логос*, всеобщий закон причинности. Если есть Логос, разумный смысл бытия, то бытие познаваемо разумом.

Впоследствии другая натурфилософская школа греков — элейская (Парменид, Зенон) — даже отождествила бытие с разумом. Согласно Пармениду, истинно мыслимое, познаваемое, есть вместе с тем и истинно сущее. Ложного, неразумного бытия нет вовсе: оно потому и ложно, что его нет, что оно — лишь обманчивая видимость. Ложное — это все то, что у нас перед глазами, все то, о чем говорят нам наши обманчивые чувства, все вечно изменяющееся и преходящее. Истинное (оно же есть бытие) есть вечное, ни из чего не происходящее, не уничтожающееся, неизменное и потому совершенное. Парменид, тоже не отделявший еще физическое от метафизического, представлял себе вечно сущее архэ в виде неподвижной однородной сферы.

Два воззрения. Мы видим как сходство, так и различие между двумя школами натурфилософии — ионийской и элейской. И в той, и в другой из этих натурфилософий метафизическое — архэ — принципиально не отделяется от физического. (Так, «огонь» Гераклита вполне материален, хотя он образует метафизический состав богов и духов. Архэ Парменида — это материальная, хотя и метафизическая — неосязаемая и невидимая — оболочка Космоса). И ионийцы, и элеаты одинаково признают познаваемость бытия, а следовательно и его мировой, всеединый смысл, постигаемый одним только *умозрением*.

Но есть между ними и различие. Ионийцы признавали сами изменчивые явления опыта реальными, элеаты — нет. Для Гераклита само абсолютное, т. е. бытие, есть изменение, становление, переход из небывшего в существующее. Не будет изменений — не будет бытия. Бытие есть *процесс*, развитие. Оно абсолютно, потому что есть закон этого развития — Логос, скрытый разум вещей. Наоборот, для Парменида абсолютно лишь неизменное:

всякий генезис, становление — это химера, порождаемая обманом наших чувств.

Как видим, смысл вещей, «физис», понимались ионийцами и элеатами противоположным образом. Для первых наука о природе была наукой о явлениях, т. е. о видимом, для вторых это была наука о скрытой сущности явлений, т. е. невидимом. Ни та, ни другая школы не могли соединить противоположности — объяснить видимое через невидимое. А без этого невозможна была физика как наука, предмет которой — наблюдаемый мир. Физика не выделилась еще из натурфилософии.

Все движется. Но почему?



Как объяснить видимое с помощью невидимого? Вопрос этот принципиально для нас важен в связи с вопросом о причине движения: какой невидимой причиной объяснить видимое движение тел?

Ионийцы, не отделявшие метафизическое от материального, считали, что причина движения содержится в самой материи. Поэтому они считали материальные стихии одушевленными: они сами себя движут. Такое представление подвергалось сокрушительной критике со стороны элеатов, считавших основой мира разумное начало.

Их последователь Анаксагор сказал даже: «Разум правит миром». Если начало мира — Разум, то его никак нельзя отождествить с косной, неопределенной, слепой и неразумной стихией. Анаксагор ясно выразил дуализм (двойственность), к которому пришла древнегреческая мысль: с одной стороны, природа есть материя (стихия), с другой — дух (разум). Материя косна, пассивна; то, что ее движет, так или иначе должно отличаться от того, что движется, т. е. от самой материи. Причина движения материи — назовем ее силой — должна иметь иную природу, нематериальную.

Правда, параллельно с ионийцами и элеатами в Древней Греции существовала еще школа атомистов (Левкипп, Демокрит), которые стали мыслить вещество чисто материально, изгоняя из него всякое духовное или психическое начало. Демокрит провозгласил, что в мире нет ничего, кроме мельчайших, однородных по своему составу тел — атомов — и пустоты, в которую они погружены и стихийно в ней движутся. Сама пустота, наряду с атомами признаваемая как реальность, позволяла объяснить факт движения, но не его причину. Законы движения не выводились

мы из концепции атомизма, которая не признает ни одушевляющей, ни даже движущей вещь силы. Движение обусловлено лишь случайными столкновениями атомов — неким слепым роком. Русский философ С. Трубецкой так охарактеризовал греческий атомизм: «В системе Демокрита обнаруживается основной абсурд материализма — признание случайного, как случайного, за абсолютное».

Ясно, что в атомизме физика никак не выделилась еще из метафизики: в ней отсутствует причинное объяснение движения. Между тем, физика как самостоятельная наука, отличная от метафизики, должна была стать наукой о причинах движения: без причинного объяснения, как мы видели, нет науки. С другой стороны, физика не отличалась бы от метафизики, если бы ее предметом не были предметы материального мира — видимые тела. Требовалось найти нематериальную причину движения материальных тел.

Аристотелю, чтобы создать физику, приходилось соединять, казалось бы, несоединимые противоположности: материальное и нематериальное, видимое и невидимое. Или, выражаясь иначе, единичное и общее. Платон, учитель Аристотеля, считал общее, или общие понятия единственной реальностью, или, если говорить на философском языке, *субстанциями*. По Платону, субстанциальны, т. е. истинно реальны, так называемые «эйдосы», или общие идеи, имеющие, как считал Платон, самостоятельное бытие. Эйдосы и бытие — для Платона одно и то же; единичные же вещи — предметы видимого мира — не субстанциальны, стало быть, не реальны. Предмет физики — видимая природа — был для Платона иллюзией.

Чтобы создать физику, Аристотель должен был отвергнуть субстанциальность платоновых эйдосов. Он объявил истинно реальным, действительным, единичные вещи. Знаменитая фреска Рафаэля в Ватикане изображает Платона и Аристотеля стоящими рядом: Платон указывает вверх, в небо, Аристотель показывает на здешний, окружающий нас земной мир. Это — символ их различия в понимании бытия. Для Платона бытие потусторонне: истина принадлежит миру иному. Аристотель видит бытие в мире здешнем: изучайте мир видимых вещей, истина содержится в нем.

Физика есть противоречие



Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить —
Сильнее бы не мог он возразить . . .

А. С. Пушкин

Но если считать реальностью одни только единичные предметы, то следовало признать, что общие понятия, отныне лишенные реальности, не могут быть причиной движения материальных тел. Каким образом реальное может приводиться в движение чем-то нереальным, лишенным подлинного бытия?

Аристотелю пришлось отказаться от мысли, что причина наблюдаемых явлений есть что-то отличное от них. Только такой ценой можно было сформулировать науку о наблюдаемых явлениях природы — физику. В соответствии с этим был сформулирован и предмет науки физика — природа. По Аристотелю, предметы, существующие по природе, имеют в самих себе причину движения или покоя. Вот его буквальное определение:

«Природа, или естество, в первичном и собственном смысле есть сущность, а именно сущность того, что имеет начало движения в самом себе как таковом» («Метафизика», книга V, глава 4, 1015a, 13–15).

Такое определение вполне соответствовало греческому пониманию движения: движение понималось греками не просто как перемещение в пространстве, а в более широком смысле — как порождение или возникновение, т. е. вообще любое изменение вещей (существительное *physis* — «природа» — происходит от глагола *phuo* — «порождаю», «возникаю»). Таким образом, природа понималась Аристотелем как деятельная сила, вызывающая изменение и рождение всех единичных вещей, и эта деятельная сила *присуща самим вещам как самостоятельное их свойство*.

В таком определении было гораздо более уступки ионийцам, чем элеатам. По существу, Аристотель полностью признал тезис Гераклита, что мир в основе своей есть изменение и развитие,

и создавал физику как систему развития. Но можно ли было создать систему без общих понятий? Можно ли вообще создавать науку о единичных предметах?

Мы знаем, что нельзя. Научное знание начинается там, где формулируются всеобщие и обязательные принципы (а в наше время мы еще говорим: законы; «законы природы»). Но где живут принципы? В каком мире живут «законы»? Разве в материальном, осязаемом и видимом мире? Допустив, что причины явлений находятся в самом мире явлений, Аристотель приходил к противоречию с им же самым данным определением научного знания. Чтобы создать физику как науку, требовалось сделать уступку и элеатам — привлечь общие понятия, которые требовалось каким-то образом приспособить для описания мира единичных вещей.

Итак, с одной стороны, Аристотель отвергал реальность и самостоятельное существование потусторонних вечных идей, а с другой — никак не мог обойтись без этих платоновых «эйдосов». Он вместе с Платоном утверждал, что предметом знания может быть только, во-первых, необходимое, во-вторых, неизменное. Он признавал, что все, воспринимаемое чувствами в видимом мире, случайно и изменчиво: оно одинаково может быть и не быть. Лишь нечувственное, но мыслимое в понятиях столь же неизменно, как и сами понятия, и только оно может быть предметом науки. Аристотель все это понимал и в этом соглашался с Платоном. Он даже создал науку формальной логики — системы оперирования с отвлеченными понятиями, и на ее основе построил логическую теорию доказательств, безупречно действующую и используемую при любом научном выводе и по сей день. В этом была его уступка противоположной школе — элеатам, для которых познавать мир и логически мыслить было одно и то же (и даже мысль и бытие было одно и то же). Но стоило только помыслить мир как неизменное и вечное бытие (неподвижная сфера Парменида), как возникал вопрос: каким образом вечно неподвижное может сообщать предметам движение?

В муках такого внутреннего противоречия рождалась у Аристотеля физика. Противоречие здесь явное, и оно никогда не

было устранено Аристотелем окончательно. «Это есть противоречие, последствия которого проходят через всю систему Аристотеля», — пишет известный историк философии Э. Целлер.

Движения нет? Таким образом, физика возникла из противоречия и существует лишь в виде указанного выше противоречия. В самой крайней форме оно проявилось в виде знаменитых *апорий* Зенона Элейского, с помощью которых этот философ-элеат стремился доказать, что движение вообще невозможно.

Если мы не знаем источника движения, рассуждал Зенон, то, стало быть, не понимаем, что такое само движение. Нельзя ли тогда предположить, что движение не существует? Зенон берется легко доказать, что летящая стрела — иллюзия, обман зрения. Летящая стрела в каждый момент времени покоится, так как занимает определенное положение в пространстве. А раз она покоится в любой момент времени своего полета, то она покоится и во все время полета: бесконечная совокупность нулей не может дать ничего, кроме нуля, и стрела не должна сдвинуться с места.

Точно так же Ахилл, как бы ни быстро он бежал, не догонит черепаху: когда он достигнет места А, в котором она находилась, она успеет дойти до другой точки В, а когда Ахилл добежит до точки В, черепаха переместится в другую точку С, и т. д. Когда же кончится этот процесс? Никогда. Никогда Ахилл не догонит черепаху, если только пространство до бесконечности делимо, т. е. каждый раз расстояние, оставшееся между Ахиллом и черепахой, можно разделить на части.

Казалось бы, Зенон неправ. Он доказывает невозможность того, что бесспорно есть: ведь мы же видим полет стрелы; видим и знаем, что Ахилл, и не только он — любой из нас быстро догонит черепаху. Если Зенон доказывает то, чего никогда не бывает, то, значит, в его рассуждениях кроется ошибка, не так ли?

Нет, не так. Человечество не вспоминало бы спустя тысячелетия про Зенона, если бы он просто-напросто ошибался, т. е. если бы кто-то нашел изъян в его суждениях. Никто не нашел. Более всего разоблачить Зенона хотел Аристотель. Парадоксы Зенона подрывали основания создаваемой Аристотелем физики. «Апо-

рия» по-гречески означала «нелепость», «бессмыслицу». Что-то одно следовало признать бессмысленным: либо рассуждения Зенона, либо физику Аристотеля. Если Зенон не ошибается, то сам видимый мир вещей, изучаемый физикой, т. е. движение тел и пространство, в котором оно осуществляется, — призрачны, бессмысленны. Сама «природа», т. е. данные в чувствах явления материи, есть ложное порождение наших чувств. Мы видим полет стрелы, но это — не реальность, не субстанция, а только видимость. Чувства говорят нам: стрела движется по отношению к Земле. Но Зенон уже тогда, почти 2500 лет назад, постигал относительность движения: а почему нельзя считать, что стрела покоится, а движется Земля? Тогда что же *реально* движется, стрела или Земля? Ничто реально не движется, отвечал Зенон, если, выпустив из лука стрелу, можно заставить всю Землю полететь как стрела.

Дорого бы дал Аристотель, чтобы логически опровергнуть Зенона. Чтобы отстоять физику, Аристотель создал принципы логики. Но опровергнуть Зенона формально логически не удалось, его суждения оказались неуязвимыми. Оказалось, что апории Зенона доказывают не призрачность наших суждений, а призрачность видимого мира.

Физика невозможна без метафизики



Из этого ясно, что физика в совершенно отвлеченном от метафизики виде невозможна: она оказывается противоречием и не могла бы существовать. И когда мы говорим, что Аристотель отделил физику от метафизики, то это надо понимать так: Аристотель дал физике самостоятельное существование как науки, построив ее, как здание на фундаменте, на своей собственной, новой метафизике. Новая аристотелева метафизика, можно сказать, и была им для этой цели создана — как фундамент физики. Недаром фундаментальные принципы своей физики Аристотель формулирует в своей «Метафизике». Ибо метафизика, как пишет Целлер, «занимается исследованием высших причин, т. е. того вечного, бестелесного и неподвижного начала, которое есть причина всякого движения и развития в мире, поэтому она — самая обширная и ценная из всех наук».

Отсюда становится ясно: чтобы объяснить явление через сущность, видимый и чувственно осязаемый мир — через невидимое бытие, движимое — через движущее, Аристотель не мог обойтись без метафизики.

«Мудрость есть наука об определенных причинах и началах, — объясняет свою цель сам Аристотель. — Имеющие опыт знают ‘что’, но не знают ‘почему’; владеющие же искусством знают ‘почему’, т. е. знают причину» («Метафизика»).

«Имеющие опыт» — это эмпирики, те, кто имеет лишь знание фактов. «Владеющие искусством» — это те, кто владеют мудростью, т. е. находят причины.

Система развития. Как реализует Аристотель свою систему причинности? Она зиждется на двух его основных метафизических понятиях — материи и форме. Заметим, что «материя»

(*hyle*) введена Аристотелем в натурфилософию как понятие метафизическое: это то же, что «архэ» у Анаксимандра, только оно теперь приспособлено к физическому объяснению явлений с помощью причинности. «Форма» (*morphe*) — другая метафизическая сущность, это то же самое, что платонов «эйдос», с тем различием, что эйдосы теперь не замкнуты в себе, но воздействуют на материю.

Как осуществляется причинное действие эйдосов на материю? Для ответа на этот вопрос Аристотель создает свое учение о потенции и акте, ключевое в его системе развития. Именно оно позволило ему соединить, казалось бы, несоединимое — бытие и явление, общее и единичное. Материя (*hyle*) как таковая не есть еще бытие: она не есть единичное, не есть вещь. По своим исконным свойствам она напоминает более древнее понятие греческой метафизики — *хаос*, т. е. беспредельные, неоформленные стихии. Само слово *hyle* означает неоформленный материал (собственно — «древесина»). Не обладая изначально бытием, материя обладает потенцией (возможностью) бытия. Возможность переходит в действительность, когда материя приобретает оформленность — *morphe*. Воздействие *morphe* превращает потенциально существующее в действительно существующее — в бытие; сам же процесс оформления бытия носит название *гилеморфизм* (*hyle+morphe*)¹.

Такова метафизика причинности Аристотеля. Самое существенное в ней то, что материя обретает бытие в виде *явлений*, т. е. единичных вещей чувственного опыта. Сущность вещей не имеет, кроме явлений, никакой иной, высшей реальности: бытие и есть явления. Сущность — это то, что является; бытие есть то, что реализуется (актуализируется) в смене явлений. Явления в самой их естественной последовательности осуществляют действительность бытия. Никакого иного бытия нет. Это осуществление сущности в явлениях называется у Аристотеля именем *энтелехия*.

¹ Для сравнения: учение ионийцев, наделявших духовностью саму стихию, получил название *гилозоизм* (*hyle* и *zoe* — жизнь)

Что же такое движение? Отсюда получает свое объяснение движение. Движение (в более общем смысле — изменение, становление) есть реализация возможного под причинным воздействием формы. Другими словами: это есть претворение потенциального в актуальное. Так Аристотель обосновывает свое определение природы, которое мы уже приводили: природа — это подвижное и телесное, имеющее причину своих изменений в самом себе. Природа, как предмет физики, состоит из движущего и движимого, причем то и другое дано нам в смене явлений: движущее само становится движимым под воздействием энтелехии. Природный мир есть совокупность вещей и их энтелехий. Энтелехии, по Аристотелю, столь же принадлежат природе, как и вещи: это оформляющие начала, которые из материи (хаоса) создают оформленный предмет — вещь. Совокупность энтелехий, как оформленная и организованная природа, теряет свойства стихий хаоса: она называется гармония, или *Космос*.

Таково было аристотелево разрешение апорий Зенона. Оно оказалось возможным благодаря метафизике. С помощью своей метафизики Аристотель попытался доказать то, что опровергал Зенон, — реальность чувственного явления материи. Реальность движения. Реальность, наконец, видимого мира. Да, мир не то, чем он кажется. Но следует ли из этого, что то, чем мир кажется, есть иллюзия и лишено разумного смысла? Аристотель отвечал: нет, не следует, потому что можно мыслить невидимое бытие так, чтобы оно объясняло видимые явления. Это было его решение основной проблемы греческой натурфилософии. Оно было им дано в виде новой науки — физики. Физика возникла как решение этой основной проблемы.

Почему Аристотелю не понадобилась «сила тяжести»?



Обыкновенно полагают, что физика нуждалась в метафизике только при своем возникновении и лишь в начальный период своего существования. Считают, что метафизика Аристотеля — это как бы повивальная бабка физики. Она помогла ей появиться на свет, после чего стало возможно с почестями отпустить бабку. Она более не нужна: ребенок живет и развивается без нее.

Это мнение неправильно. И мы уже видели: если отпустить «повивальную бабку» — метафизику, то физика станет невозможной; она станет противоречием. Далее мы увидим, что теория тяготения Ньютона, возникшая почти через 2000 лет после Аристотеля, никак не могла бы возникнуть и существовать без новой, уже ньютоновой метафизики. Если мы отвергнем эту ньютонову метафизику, то придется признать то, о чем говорил остроумный Шопенгауэр: что сам закон тяготения столь же чудесен, как и слова «камень падает потому, что он этого хочет». Действительно, этот закон станет чудом, потому что он потеряет свой научный смысл, тот, который имел в виду Аристотель: наука должна отвечать не только на вопрос «как», но и главным образом на вопрос «почему». Между тем ньютонов «закон тяготения» лишь описывает, как притягиваются тела, но не дает ответа, почему они притягиваются. Иными словами, он не отвечает на вопрос о причине явления тяготения.

А при рассмотрении теории тяготения XX века — общей теории относительности — мы убедимся, что и она, как наука, была бы невозможна без своей, эйнштейновой метафизики.

Естественное движение. Но не будем забегать вперед. Сейчас посмотрим, в чем заключалась аристотелева энтелехия дви-

жения тел в пространстве. Чем Аристотель объяснял падение тел на Землю? Что такое была для него «сила тяжести», если под нею понимать причину падения тел и движения планет по Небу?

Самым удивительным оказалось то, что для объяснения и падения тел, и движения планет Аристотелю не понадобилось вообще силы тяжести, потому что не понадобилась совсем никакая сила.

Означало ли это, что Аристотель отказался искать причину падения тел? Нисколько. Без причин для него не было научного объяснения, но мы уже знаем, что объяснять падение тел «силой тяжести» — значит никак не объяснять его. Нельзя ли обойтись для объяснения падения без какой-либо силы, такой, с которой Земля *на расстоянии* притягивает тела?

В космографии (науке о Космосе) Аристотеля это оказалось возможным. Мы видели: для построения физики — науки о движении — он прямо привлек метафизику. (И не забудем, что «сила тяжести» у Ньютона — метафизическое понятие). Сделать это заставили Аристотеля апории Зенона: иначе выходило бы, что движения нет (это была бы тоже метафизика, но она Аристотеля не устраивала). Метафизическая суть аристотелевой энтелехии движения заключалась во введенном им понятии естественного движения. Это как раз то движение, которое не нуждается ни в какой силе — ни в силе, действующей со стороны других тел, ни в силе, действующей на расстоянии (эти последние силы Аристотель отвергал вовсе). Естественными для Аристотеля являются два вида движений:

- 1) движение вверх и вниз;
- 2) движение планет по круговым орбитам вокруг центра мира.

Первый род движения тел происходит в результате стремления тела занять свое естественное место. Не напоминает ли это вам «желание» камня все время падать? Камень и у Аристотеля тоже всегда хочет падать вниз. Но не все тела хотят у него падать: элементы некоторых стихий, например, «огня», больше любят подниматься вверх — как будто считают, что там,

наверху, в свойственном им месте, им находится естественное. Смысл слов «тяжелый» и «легкий» связаны у Аристотеля вовсе не с каким-либо притягательным действием Земли, но лишь с существованием естественных местоположений тел по отношению к центру Земли. «Тяжелое» тело — это то, которому свойственно занимать более близкое к Земле положение. В нашем представлении все свободные тела падают, потому что на все тела действует тяготение Земли. У Аристотеля некоторые тела сами по себе поднимаются — значит, никакого «тяготения» Земли для него нет. В этом смысле иногда говорят, что у Аристотеля нет проблемы тяготения.

Как видим, Аристотель из всех возможных местоположений тел выделяет особые — естественные, свойственные каждому телу. Это означает, что не все точки пространства равноправны: пространство не является однородным. Это существенно отличает пространство Аристотеля от полностью однородного пространства Галилея–Ньютона. Структура же этого неоднородного мира определяет Космос, который, во-первых, конечен, и, во-вторых, имеет Центр. Движение планет вокруг Центра присуще только небесному миру, оно

- 1) вечно,
- 2) неизменно,
- 3) происходит в соответствии с вечной структурой Космоса и потому также не вызывается никакой внешней силой.

Небесные тела естественным образом, без принуждающей внешней силы движутся вместе с теми сферами, на которых им положено находиться в соответствии с космической иерархией — структурой Космоса.

Все остальные земные движения тел, кроме естественных движений по прямым линиям, являются вынужденными, т. е. происходят только под воздействием сил. Прямолинейное равномерное движение тоже требует внешней силы — это второе существенное отличие механики Аристотеля от механики Галилея–Ньютона. Оно означает отрицание закона инерции Галилея–Декарта, который гласит: в отсутствие сил *все* тела сами по себе

движутся равномерно и прямолинейно. Сила, требующаяся для приведения тела в движение, прямо пропорциональна скорости тела (а не его ускорения) — это было отрицание будущего второго закона Ньютона.

Как видим, у Аристотеля появляется понятие «сила», хотя она требуется не для всех видов движения. Что он под нею понимал? Исключительно контактное воздействие одних тел на другие, иных сил для него не было. Так, выпущенная из лука стрела во время полета движется не по инерции (как сказали бы мы сейчас), но потому, что ей непрерывно передается сила от лука *через* последовательные воздушные слои. Стрела не могла бы двигаться, если бы пространство было пустым. Это еще одно, уже четвертое принципиальное отличие физики Аристотеля от классической физики XVII–XIX веков: по Аристотелю, никакое физическое воздействие одних тел на другие не может передаваться через пустоту, потому что *пустоты вообще не существуют*. Пустота означала бы однородность пространства, а это нарушило бы иерархию (т. е. последовательную совокупность) естественных местоположений в Космосе по отношению к Центру.

Аристотель, следовательно, для любых движений находит причину, но только этой причиной нигде не является «тяготение» — способность одного тела (Земли) притягивать другое на расстоянии и через пустоту. Причина вынужденных земных движений — прямое воздействие других тел. Причина естественных движений земных тел — свойственное им стремление занять правильное, по природе им присущее положение в Космосе.

Перводвигатель. Наконец, что движет небесные сферы, вместе с прикрепленными к ним небесными телами, вокруг центра мира?

«Система развития» Аристотеля есть система последовательных причинных воздействий одних явлений на другие, или *закон причинности*: каждое явление природы имеет свою непосредственную причину, также принадлежащую к миру природных явлений. Но если причина данного явления есть другое явление, а его причина — третье явление и т. д., то, очевидно, причинный

ряд явлений будет бесконечным. Как можно что-либо познать тогда в природе? Тогда ведь для объяснения какого-либо одного явления придется находить нескончаемый ряд причин. Выходит, отыскивая причины явлений, мы никогда не сможем объяснить ни одного явления.

Аристотель знал эту проблему и разрешил ее введением некоторой первоначальной причины, такой, которая сама причины не имеет. Это Первопричина, или Перводвигатель (*primum moven*), сообщивший вечное и неизменное движение Космосу. Он и движет небесные сферы. Перводвигатель — это Бог. Физика Аристотеля нуждалась не только в метафизике, но и в Боге (по-гречески — Демиург).

Как мы увидим, Ньютону для создания новой, неаристотелевой физики снова понадобится Бог и своя, новая метафизика. Но, хотя физика Аристотеля была отвергнута, его научная методология (а это и есть метафизические основания физики) легла в основу всего дальнейшего развития естествознания. Правда, галилеево-ньютоновская механика возродила не метафизику Аристотеля (отрицавшую пустое пространство), а метафизику атомистов, категорически Аристотелем отвергнутую. Однако метафизика Аристотеля, пережив в Новое время как бы свой скрытый, «инкубационный» период, возродилась потом в физике XX века: в общей теории относительности (представление о неразрывной связи материи и пространства) и в квантовой механике (понятие *S*-матрицы воплощало аристотелеву энтелехию перехода материи из начального состояния в конечное).

Отсюда можно даже сделать парадоксальный вывод: метафизика важнее и потому долговечнее основанной на ней физики. Физика может умереть, а метафизика остается. Физика Аристотеля в XVII веке умерла навсегда, чтобы больше никогда не возродиться. Но метафизика Аристотеля, пережив его физику, возродилась вновь.

Первое учение о тяжести. Галилей



Аристотелева физика не только противоречит современной механике, но и очень легко ею опровергается. Сейчас не много требуется труда, чтобы понять, каким образом Галилей (1564–1642) в конце XVI века опроверг основные положения этой древней физики. И в первую очередь учение Аристотеля о тяжести и легкости тел.

Все тела — тяжелые. Вообразим, что тела движутся не в воздухе, а в воде. Можно даже вообразить, что среда, окружающая Землю, — не воздух, а вода. Тогда кусок дерева, который в воздухе стал бы падать вниз, теперь, находясь в воде, станет подниматься вверх. Каким же назвать кусок дерева — тяжелым или легким? Он движется вниз или вверх в зависимости от того, больше ли его удельный вес по сравнению с плотностью среды или меньше. Значит, быть «тяжелым» или «легким» зависит не от местоположения тела по отношению центру Земли, а от окружающей среды.

Теперь мысленно представим себе, что плотность окружающей Землю среды становится все меньше и меньше. Тогда тот же кусок дерева, который вначале, в плотной среде, поднимался вверх, начиная с какого-то момента станет опускаться вниз. Наконец, можно представить себе предельный случай, когда плотность среды упала до нуля. Тогда любое тело, не только дерево, но и легчайшая пушинка никогда не станут подниматься — всегда будут падать вниз. Все, даже самые «легкие» тела станут «тяжелыми».

Среда, плотность которой равна нулю, — это то, что мы называем пустотой. Ее, оказывается, легко представить себе: например, можно, выкачивая воздух из баллона, все более приближать

область пространства внутри баллона к состоянию пустоты. И там, внутри баллона, все тела станут тяжелыми.

Отсюда легко заключить: все вообще тела — тяжелые, если только они находятся в пустоте. Тогда их падение вниз обусловлено внешней силой, с которой Земля действует на них *через пустоту*.

Конечно, ни из какого баллона нельзя выкачать воздух полностью, т. е. настолько, чтобы в нем не осталось ни одной молекулы воздуха. Идеальной пустоты практически достигнуть невозможно, так что «среда» присутствует всегда и всюду. Но она лишь сопротивляется падению тел, т. е. порождает иной вид силы — силу сопротивления, существование которой никак не отменяет существование неконтактной, действующей на расстоянии силы — «силы тяжести».

Нужна ли сила для движения? Если возможно мыслить пустоту, то возможно мыслить и движение в пустоте; а это значит, что далеко не всякое движение тела можно объяснить тем, что оно поддерживается воздухом, как то полагал Аристотель. Галилей приводит пример движения, которое никак не может поддерживаться средой. Представьте сферу, вращающуюся вокруг своего диаметра. Каким образом в этом движении ее подталкивает воздух? Это представить невозможно.

Тогда можно предположить, что и стрела, выпущенная из лука, продолжает лететь не потому, что ее подталкивает воздух. А что же движет стрелу? Очевидно, ее движет в горизонтальном направлении не сила тяжести, которая заставляет стрелу лишь падать вниз, и не сила сопротивления воздуха, которая напротив, лишь препятствует движению стрелы. Вполне можно представить себе, что на стрелу не действуют ни та, ни другая силы. Например, пусть стрела движется в пустоте и находится в состоянии невесомости. И то и другое для нас теперь не новость и может быть реализовано в действительности. (А что касается состояния «невесомости», то мы даже частично его ощущаем, находясь в лифте, падающем вниз, или летя на «американских горках» по самой крутой горе; вспомните, у вас как бы замирает сердце). Стрела движется, хотя на нее не действует никакая

сила. Движение возможно без сил, такое движение и называется движением по инерции. Для Аристотеля движение по инерции невозможно: горизонтальное движение стрелы никак не относится к тем движениям, которые у него «естественные». Это движение вынужденное — по Аристотелю, оно может вызываться только внешней силой.

Роль умозрительных принципов. Можно было заметить, что во всех этих своих рассуждениях Галилей опирался не на опытные факты, а на одно только умозрение. Он не пользовался ничем, кроме *мысленных экспериментов* (и Галилей был первым, кто ввел в науку этот мощнейший инструмент умозрения). Так и должно быть: теория, хотя исходит из фактов и должна согласовываться с ними, строится не на одном только обобщении фактов. Физика Аристотеля тоже долгое время объясняла наблюдаемые факты, и если мы предпочитаем ей сейчас физику Галилея–Ньютона, то не потому, что эта последняя лучше объясняет факты. *Все* факты не объясняет ни одна теория: потом появятся факты, которые не сможет объяснить механика Галилея–Ньютона. Но главное в том, что одна и та же совокупность наблюдаемых фактов может описываться различными теориями, так что путь от фактов к теории — неоднозначный путь. Мы вскоре увидим, что теория гравитации (тяготения) Декарта так же хорошо объясняла все наблюдаемые факты притяжения тел, как и теория гравитации Ньютона, хотя сами эти две теории были принципиально различны по заложенным в их основе общим принципам. Главное, на чем строится теория, — это общие *умозрительные* (т. е. от опыта не зависящие) принципы. При объяснении одних и тех же наблюдаемых фактов (например, падение тел, полет стрелы) Галилей использовал иные принципы, нежели Аристотель (а Ньютон — иные принципы, нежели Декарт).

Так, обыкновенно считают, что, наблюдая падение тел с высокой Пизанской башни, Галилей установил свой закон падения тел: все тела, независимо от их веса (массы), падают с одинаковым ускорением. На самом деле Галилей и даже некоторые ученые до него пришли к этому закону умозрительно, и лишь после этого Галилей проверил эту догадку на наблюдениях за

падением тел. Если предполагать, что тела падают в пустоте под действием силы, исходящей от Земли, то это находится в противоречии с утверждением Аристотеля, что скорость падающих тел пропорциональна их весу. Противоречие исчезает, если предположить, что скорость падающих тел одна и та же для всех тел независимо от их веса.

Чтобы убедиться в этом, проведем такое чисто умозрительное рассуждение. Допустим, что ускорение падения тела пропорционально его массе. Представим себе тяжелое пушечное ядро и привязанную к нему пулю. Так как ядро вместе с пулей имеет массу большую, чем ядро без пули, то, в соответствии с исходной предпосылкой, ядро с пулей приобретет большую скорость. С другой стороны, так как масса пули меньше массы ядра, пуля сама по себе ускоряется медленнее, чем ядро. Следовательно, пуля, отставая от ядра, должна тормозить его движение, и ядро с привязанной пулей должно падать медленнее, чем оно падало бы само по себе. Таким образом, мы одновременно доказали, что ядро с пулей за время падения приобретет и большую, и меньшую скорость, чем ядро без пули. Это противоречие доказывает, что исходная предпосылка неверна. А это значит, что ускорения падающих тел не зависят от их массы. Это потом и было подтверждено Галилеем в опытах на Пизанской башне. Оказалось, что при падении тел с одной и той же высоты они за одно и то же время успевают к моменту падения на Землю набрать одну и ту же скорость.

Объяснение падения. Галилею принадлежит, таким образом, первое учение о тяжести, вошедшее в фонд современной науки. Его основные положения следующие:

- 1) материя (Земля) вызывает ускорение свободно падающих тел у поверхности Земли по направлению к ее центру,
- 2) действующая на тело сила тяжести измеряется вызываемым ею ускорением тела,
- 3) действие силы тяжести на тела проявляется в постоянстве их ускорений в вертикальном направлении,
- 4) пройденный падающим телом путь пропорционален квадрату времени падения.

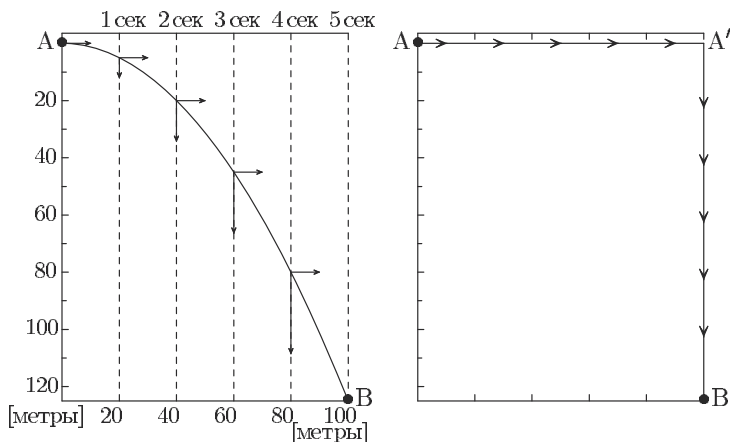


Рис. 8.1. *Движение снаряда.* Галилей показал, как тело может одновременно осуществлять два движения. На рисунке рассмотрен пример падения камня при следующих условиях: горизонтальная скорость — 20 м/с; высота падения — 125 м; за 5 с камень пролетает 125 м в вертикальном направлении (цифры округлены). На схеме справа изображено, как подобное событие представлял себе Аристотель: вначале камень должен лететь строго по горизонтали — параллельно поверхности Земли — до точки A' , а затем начать отвесное падение вниз.

Свой закон падения тел Галилей сумел соединить с другим открытым им принципом — принципом сложения двух движений. Последний принцип есть одно из фундаментальных положений механики Нового времени, находящееся в прямом противоречии с физикой Аристотеля. Закон движения тел в поле тяжести Земли, открытый Галилеем, можно объяснить следующим образом. Рассмотрим, к примеру, движение выпущенной из лука стрелы. Стрела, пущенная горизонтально из лука, должна двигаться вперед, проходя за равные отрезки времени равные расстояния, и, кроме того, она должна падать по направлению к Земле в соответствии с установленным Галилеем законом падения тел. Поскольку оба эти различные виды движения стрелы должны совершаться одновременно, стрела будет двигаться по кривой линии, называемой параболой. А по Аристотелю стрела должна двигаться только по прямой до тех пор, пока это

движение не прекратится, после чего стрела совершает другое прямолинейное движение — падает вертикально вниз на землю. Наглядная иллюстрация представлений о падении тел Галилея и Аристотеля дана на рис. 8.1.

Правда, Галилей не распространил еще свое учение о тяжести на Солнце и не применял его к планетам. Это потом сделал И. Ньютон. Галилей не установил еще закона, по которому любые тела (а не только тела, падающие на Землю вблизи ее поверхности) притягиваются друг к другу. Иными словами, для Галилея еще не было *всемирного* тяготения.

Принцип относительности и гелиоцентрическая система мира



... Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

А. С. Пушкин

Хотя Галилей и не открыл закона движения планет вокруг Солнца, он нашел принцип, без которого это открытие было бы невозможно. Это — *принципом относительности движения*.

В 1543 году, в год смерти Коперника (1473–1543) вышла его книга, содержащая изложение новой, *гелиоцентрической* системы мира, утверждавшей то, что знает сейчас каждый школьник: планеты, в том числе Земля, обращаются вокруг Солнца.

Этому нас учили с детства. И учили как будто правильно — так же, как древние греки: не верьте вашим чувствам, они обманчивы. Не верьте вашим глазам, которые говорят вам, что Солнце и в суточном, и в годичном цикле обращается вокруг Земли: то и другое — лишь видимость, происходящая от действительного вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Но нас не доучили до конца: не объяснили, а почему, собственно, наши глаза нас обманывают. Может быть, наши глаза нам врут, и Земля движется вокруг Солнца; а почему не может быть наоборот?

Что движется — Земля или Солнце? Многое представляется нам ясным и само собой разумеющимся только потому, что мы затвердили это с детства: мы много раз видели цветную картинку, изображающую планеты Меркурий, Венеру, Землю, Марс и т. д. в их обращении вокруг Солнца. А не лучше ли было бы отнестись к этой картинке критически?

Разве движение абсолютно? Почему нельзя считать, что Земля неподвижна, а Солнце движется? Этот вопрос не столь уж бессмысленный. Видимо, первый в истории науки, кто его себе задал, был Зенон, который спросил: почему мы считаем, что Земля неподвижна, а стрела, которая представляется нашим глазам летящей, движется? Нельзя ли полагать, что зрение нас обманы-

вает и этот легкий предмет — стрела — неподвижен, а огромная Земля со всем, что на ней находится, движется?

На современном языке этот вопрос можно высказать так. Можно вообразить себе две системы координат, начала которых жестко связаны одно — с Землей, а другое — со стрелой. Движение любых тел можно наблюдать, находясь в любой из этих двух систем координат. Вообразим, что мы наблюдаем движение тел из системы координат, связанной со стрелой, т. е. мы летим вместе со стрелой. Мы тогда убедимся, что, действительно, зрение нас обманывало: стрела стоит на месте, а все, что мы видим вокруг — дома, горы, реки — летит мимо нас. Разве не то же самое мы видим из окна движущегося поезда? Все тела на Земле, прежде бывшие неподвижными, теперь летят мимо нас, и это потому только, что мы теперь наблюдаем их из системы координат, движущейся вместе с поездом.

Если допустимо наблюдать мир из движущегося поезда (а почему бы нет?), то, выходит, поезд стоит на месте, а вся Земля движется. Можно теперь поставить на место поезда Землю и сказать: Земля неподвижна, а Солнце и вся Вселенная движутся. Говоря иначе: если описывать мир в системе координат, связанной с Землей, то Солнце будет двигаться вокруг Земли. Такая система координат называется *геоцентрической*, и соответствующая ей картина движения, или система мира (Аристотеля, Птолемея) называется геоцентрической системой мира. И это отнюдь не будет какой-то иллюзией или обманом зрения.

Но ничто не мешает нам поместить начало координат в центр Солнца: в этой системе координат (она называется *гелиоцентрической*) Земля будет вращаться вокруг Солнца. Мы получим иную картину движения небесных тел — гелиоцентрическую систему мира Коперника.

Роль системы отсчета. Система координат всегда необходима для научного описания движения тел. Например, мы ее используем для расчета траекторий движения планет по изменению их координат со временем. Система координат никогда не связана с пустотой: мы связываем ее с некоторым телом, называемым *телом отсчета*. В геоцентрической системе мира за тело

отсчета принимается Земля, в гелиоцентрической — Солнце. Как видим, выбор тела отсчета радикально изменяет картину мира. Борьба, которая веками велась между сторонниками геоцентрической и гелиоцентрической систем мира, — борьба, при которой католическая Церковь собиралась пытать Галилея на дыбе, — была, как видим, борьбой за тело отсчета. Галилей первым понял важность выбора тела отсчета для описания движения и не собирался, даже рискуя жизнью, уступать это знание Церкви. Более того, оказалось, что сама формулировка законов природы зависит от выбора тела отсчета.

Надо действительно верить не своим глазам, а своему разуму: не глаза, а разум должен сказать нам, какое тело отсчета целесообразнее выбирать для описания мира.

В этом заключался принцип относительности движения: любое тело можно сделать неподвижным, если принять его в качестве тела отсчета. Выбором тела отсчета можно остановить Солнце и двинуть Землю (так это и говорили про Коперника, хотя объяснил это только Галилей). Но, очевидно, можно и наоборот — двинуть Солнце вокруг Земли.

Зенон Элейский знал, что можно остановить стрелу и двинуть Землю. Аристотель принял это за отрицание движения: движения нет, если оно всего лишь относительно и его можно уничтожить выбором системы координат.

В свете сегодняшнего дня это следует понимать так: Аристотель не считал все тела отсчета равноправными. Есть одно, преимущественное перед другими тело отсчета. Есть, следовательно, одна, *абсолютная* система координат, выделенная из всех других. Движение приобретает абсолютный смысл, если его описывать в этой, абсолютной системе координат. И движение теряет смысл, если его описывать из какой-либо другой системы координат. Тогда действительно движения нет, и можно соглашаться с Зеноном.

Тело отсчета вместе с привязанной к нему системой координат называется сейчас *системой отсчета*. Аристотель, в соответствии со своим философским учением, считал абсолютной систему отсчета, связанную с Землей (которую он рассматривал

как самое тяжелое тело). Так была создана первая геоцентрическая система мира.

Почему не победила система мира Аристарха? С аристотелевой системой не все были согласны даже во времена античной древности. Так, уже Гераклит считал, что «нижние» планеты — Меркурий и Венера — вращаются не вокруг Земли, а вокруг Солнца. А его ученик Аристарх Самосский (около 310–230 до н.э.) уже тогда, в III веке до н.э. построил гелиоцентрическую систему мира: он остановил Солнце и заставил все планеты двигаться вокруг него.

Почему же не Аристарх, а Коперник признается творцом гелиоцентрической системы мира?

Ситуация здесь не похожа на ту, что была с Колумбом, впервые достигшим Америки, и Америго Веспуччи, именем которого она была потом названа. Несмотря на это название, первооткрывателем Америки считается Колумб. Все знают, что первым в Новое время на новый материк ступил Колумб (это, однако, не исключает того, что на Американском континенте уже в IX или X веке побывали отважные викинги).

На первый взгляд кажется, что Аристарх сделал нечто подобное тому, что сделал Колумб, и даже больше — он двинул Землю. На самом деле Аристарх лишь заметил, что в гелиоцентрической системе движение планет по небу будет объясняться и предсказываться проще, чем в системе мира Аристотеля. Проще! Достаточно ли это основание, чтобы изменять систему мира?

Конечно, этого было бы достаточно. Вспомните, какую роль играет удобный выбор тела отсчета при описании движения. И, тем не менее, Аристарх не победил тогда — победил Аристотель. В чем тут дело?

А дело было в том, что человечеству было трудно дойти до того, что открыл только в XVII веке Галилей, — до принципа относительности. Этот принцип казался невероятным, и Аристотель не мог принять его. Возражения перипатетиков (ученых школы Аристотеля) против движения Земли были основаны на том, что все механические явления, происходящие на поверхности Земли, происходят так, как если бы Земля была неподвижна.

Если бы Земля двигалась, говорили они, то тяжелые тела, падающие на ее поверхность, отставали бы от ее движения и падали бы не по вертикали, а наклонно. Камень, свободно отпущенный вниз с высокой башни, никогда не упал бы к ее подножию, а приземлился бы далеко в стороне к востоку (этим аргументом Аристотель обосновывал также невозможность вращения Земли вокруг ее оси). Орудия стреляли бы на запад дальше, чем на восток. Летящие птицы отставали бы от находящейся под ними Земли. Воздух, оставаясь на месте, на вращающейся Земле производил бы вечный ураган и т. д.

Система мира Аристотеля уже в древности перестала удовлетворять астрономов невысокой точностью предсказания видимых движений планет и затмений Луны и Солнца. Казалось бы, ее место должна была занять система мира Аристарха Самосского, но и тут этого не произошло. Почти через 5 веков после Аристотеля его система мира была заменена более точной системой Птолемея (около 100–165 н.э.), и опять же геоцентрической. В ней планеты уже не были прикреплены к небесным сферам, но совершали сложное движение по круговым орбитам — эпициклам, — центры которых двигались по другому кругу — деференту — вокруг Земли. Птолемей знал про гелиоцентрическую систему и даже признавал ее гораздо большую простоту и удобство. Сама же система Птолемея, хотя и давала требуемую точность расчетов движений, была настолько сложна и громоздка, что про нее часто говорили: «на месте Господа Бога следовало бы устроить Вселенную попроще». И, представьте, и через 5 веков после Аристотеля его аргументы продолжали владеть умами: Клавдий Птолемей отверг систему Аристарха исключительно из-за того же неприятия относительности движения. Он повторил все аргументы перипатетиков и на их основании тоже по-прежнему отрицал возможность движения Земли.

В системе отсчета, связанной с Землей, все связанные с Землей тела будут неподвижны — это напрямую вытекает из относительности движения. Координаты любых точек в этой системе отсчета не изменяются, поэтому все такие точки будут неподвижны по отношению к Земле. Воздух, камни, птицы, люди

будут неподвижны в этой системе отсчета; поэтому камень, упавший с вершины башни, приземлится точно у подножия, птицы не отстанут от Земли, на Земле не возникнут вечные ураганы. Аргументы перипатетиков против движения Земли — и суточного вращения, и обращения вокруг Солнца — оказались несостоятельными в силу принципа относительности Галилея.

Принцип относительности Галилея. Содержание принципа относительности может быть выражено теперь иначе: механические явления в какой-либо системе отсчета происходят одинаково, независимо от того, неподвижна ли система или совершает равномерное и прямолинейное движение. Или, иначе, механические явления происходят одинаково в любых двух системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно одна относительно другой.

Система отсчета, в которой на тело не действуют никакие силы, называется *инерциальной*: тело движется по инерции. Говоря точнее, в такой и только такой системе отсчета закон инерции имеет обычный, соответствующий нашим наблюдениям вид. Можно было бы избрать другую систему отсчета, движущуюся относительно данной инерциальной системы отсчета с ускорением. Но в такой системе отсчета закон инерции выражался бы так, что мы просто не узнали бы его. В этом заключается особая выделенность, *привилегированность* инерциальных систем отсчета.

Принцип относительности утверждает равноправие всех инерциальных систем отсчета: в любой из них законы механики будут формулироваться одинаково и движение тел в одной системе неотличимо от движения в другой. Переход от координат точек в одной инерциальной системе к координатам в другой (с нею совершенно равноправной), описывается с помощью простейших формул, которые называются *преобразованиями Галилея*.

Пусть одна инерциальная система отсчета — обозначим ее S , — считается (условно, конечно) неподвижной, а другая, S' , движется относительно нее со скоростью v м/с. Пусть, для простоты, оси координат x (в системе S) и x' (в системе S') направлены вдоль одной прямой, и именно вдоль этой прямой система S'

движется относительно системы S . Пусть x', y', z' — координаты точки, неподвижной в системе S' , но отсчитываемые в системе S , в которой они имеют значения x, y, z . Пусть, далее, часы в системе S показывают время t , а часы в системе S' — время t' . Тогда формулы преобразований Галилея имеют вид:

$$\begin{aligned}x &= x' + vt' ; \\ y &= y' ; \\ z &= z' ; \\ t &= t' .\end{aligned}\tag{9.1}$$

Как видим, «поперечные» координаты y, z , вдоль которых не происходит движения, не изменяются. Изменяется только координата x вдоль направления движения: в системе S за t секунд ее значение увеличивается на vt метров. Время t' , отсчитываемое по часам системы S' (т. е. по движущимся часам), совпадает со значением времени t в системе S . Иными словами, значение времени в системах S и S' одинаково: оно не зависит от выбора инерциальной системы координат.

Теперь принципу относительности может быть придана чисто математическая формулировка: законы механики *инвариантны* по отношению к преобразованиям Галилея (9.1) («инвариантность» означает одинаковость выражения законов в различных системах координат).

Мы видим, что принцип относительности радикально отвергает учение Аристотеля об абсолютном движении. Для Аристотеля среди всех возможных систем отсчета должна существовать выделенная, или абсолютная система. Принцип относительности утверждает, что среди инерциальных систем не может существовать никакой выделенной системы отсчета: уравнения механического движения инвариантны относительно преобразований (9.1), т. е. их вид не изменяется при переходе в другую инерциальную систему отсчета.

Правда, можно подумать: система отсчета, связанная с Землей, не может рассматриваться в качестве «инерциальной» системы отсчета, потому что движение Земли вокруг Солнца не прямолинейно. Но движение вокруг Солнца по огромной орбите даже на больших участках траектории мало отличается от пря-

молинейного. И с точки зрения не только Коперника, но и Галилея Земля с доступной им точностью могла рассматриваться движущейся прямолинейно и равномерно. Поэтому принцип относительности давал исчерпывающее объяснение возможности движения Земли вокруг Солнца.

Знал ли Коперник принцип относительности? Принцип относительности был сформулирован только в 1632 году в знаменитом труде Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой». Как мы видели, он оказался совершенно необходим для обоснования гелиоцентрической картины мира. Знал ли Коперник, создававший свою систему мира за 100 лет до Галилея, про этот принцип? Из того, что им написано, следует, что Коперник понял основную суть принципа относительности, пусть даже в его простейшем и совсем еще неполном виде. Без понимания относительности движения он не мог бы пойти против геоцентрической системы мира. В этом проявилась бесспорная гениальность Коперника. Теперь следует сказать, что именно Коперник стоит у истоков современной механики и был в этом отношении прямым предшественником Галилея (называвшего, кстати, Коперника своим учителем).

Какая система мира истинна?



Существует ли «центр мира»? Первое основное достижение Коперника состояло в опровержении доводов против возможности движения Земли, т. е. в доказательстве допустимости такого предположения как с точки зрения физики, так и астрономии. По поводу астрономических свидетельств в пользу своей системы он писал:

«Что Земля не есть общий центр всех обращений, доказывают явная неравномерность движения планет и непостоянство их расстояний до Земли: это необъяснимо при помещении Земли в единственном центре кругов концентрических».

Отказавшись поместить Землю в едином Центре мира, Коперник и его последователи видели «центр мира» в Солнце. В этом отношении Солнце заняло место, отводившееся Земле в геоцентрической системе. Смысл понятия «гелиоцентрический» означало для Коперника нечто большее, чем перенос начала координат в центр Солнца. Центр Солнца стал не только началом координат, но и абсолютным Центром мира. Место одного абсолюта занял другой.

Как мы сейчас хорошо знаем, Солнце может претендовать на положение «центра мира» не с большим основанием, чем Земля. Никакого такого абсолютного центра во Вселенной вообще не существует. В природе нет ни одного предмета, который можно было бы считать находящимся в абсолютном покое (прав был Гераклит: «все течет»). Солнце движется относительно ближайшей звезды со скоростью около 20 км/с, оно вместе с другими звездами вращается вокруг центра Галактики со скоростью около 300 км/с, вся Галактика вместе с другими галактиками

(точнее, скоплениями галактик) участвует в общем расширении Вселенной.

Коперник и коперниканцы достигли своей цели — «сдвинуть Землю», лишить ее абсолютной неподвижности и абсолютного центрального положения. Оставалось теперь «сдвинуть Солнце», и это уже стало делом нетрудным, но только после открытия Галилеем относительности движения.

В наше время «система мира» Коперника — это уже не система «мира»: она есть лишь система обращения планет вокруг Солнца, которая, к тому же, не могла считаться полностью физически обоснованной вплоть до создания Ньютоном его теории тяготения. Под настоящей «системой мира» теперь следует понимать космологическую модель — модель Вселенной, строящуюся на основании современной, эйнштейновской теории тяготения. В свете этой теории вопрос о том, что есть «истина» — Земля ли вращается вокруг Солнца или наоборот — снова станет в повестку дня.

Какая система мира лучше? Кроме того, не следует думать, что система Коперника в действительности оказалась проще системы Птолемея, — иначе было бы непонятно, почему с системой Птолемея не могла также конкурировать гораздо более древняя гелиоцентрическая система мира Аристраха. И дело не в одном только незнании принципа относительности движения. Система мира Птолемея в отношении ее физического обоснования проигрывала не только системе Аристарха, но и системе Аристотеля. В самом деле, система Птолемея с ее круговыми движениями планет вокруг пустых точек (центров эпициклов) не только не выдерживает никакой критики с точки зрения современной механики, но она противоречила и натурфилософским воззрениям древних греков. Ни Платон, ни Аристотель никогда не допустили бы вращения вокруг пустого места, и в этом отношении Коперник был ближе к Аристотелю, чем Птолемей.

И, однако, система Птолемея господствовала на протяжении многих веков. Более того, даже после Коперника гелиоцентрическая система не принималась еще большинством астрономов,

несмотря на ее более простой характер в целом. То есть несмотря на все преимущества, связанные с выбором Солнца в качестве тела, находящегося в состоянии покоя. Несмотря также на то, что неизмеримо проще рассматривать вращение Земли вокруг своей оси, нежели общее вращение всех «неподвижных» звезд вокруг Земли. И даже несмотря на еще одно открытие Галилея — открытие спутников у Юпитера. Юпитер со своими спутниками-лунами в некотором смысле представлял коперниканскую систему в миниатюре. Это указывало на то, что более естественно было бы рассматривать и движение планет вокруг Солнца. Несмотря на все это, борьба за гелиоцентрическую систему велась на протяжении более 100 лет после Коперника и даже долгое время после Галилея.

Причина этого в том, что система Птолемея — это в общем-то Солнце и планеты, как они видны с Земли. Мы, люди, привязаны к Земле, и наши наблюдения никогда не дадут нам непосредственно истинные движения планет: они лишь дадут движение точки пересечения нашего луча зрения (направления от Земли к наблюдаемой планете) с небесной сферой. Подтверждение правильности коперниканской системы стало возможно лишь после того, как были определены истинные орбиты планет, эллипсы. Между тем эти истинные орбиты не были известны ни Птолемею, ни Копернику. Тот и другой считали орбиты планет круговыми, и уже по одному этому во времена Коперника его система не могла проявить какого-либо преимущества перед системой Птолемея. Обе системы одинаково хорошо описывали видимое движение планет, и обе только для этого создавались. Система Птолемея, хотя и с необыкновенно сложной совокупностью кругов, была с древности и в течение веков прекрасной «теоретической астрономией» (хотя и не была вовсе никакой физической). Копернику же для создания своей системы требовалось производить пересчет видимых с Земли положений планет в гелиоцентрическую систему отсчета. Это было не только сложно в те времена, но и главным образом затруднялось тем обстоятельством, что Коперник не знал, что планеты движутся неравномерно по эллипсам. Поэтому и Копернику для согласования

своей системой с наблюдениями пришлось сохранить движение по эпициклам. Ему удалось лишь уменьшить количество кругов примерно вдвое: в его системе 34 круга (эпициклы и деференты) против 73 у Птолемея. При простоте в целом, в деталях система Коперника оказалась не проще птолемеевой.

Сейчас можно сказать, что обе системы мира, как они принимались современниками, физически одинаково не обоснованы: обе допускают движение вокруг пустого места, обе полагают некий «абсолютный» центр мира (одна — в Земле, другая — в Солнце). Но каждая из них одинаково успешно достигала цели наблюдательной астрономии — с требуемой точностью описывала небесные движения.

На этом примере видно огромное различие между астрономической — чисто наблюдательной — и физической картинами мира. Прекрасная астрономическая картина мира может оказаться совершенно ложной с точки зрения физики. С астрономической точки зрения системы Птолемея и Коперника были одинаково удовлетворительны. С точки зрения физики дело обстоит совсем иначе. С позиции современной науки можно было бы даже утверждать, что обе системы одинаково неудовлетворительны, т. е. одинаково ненаучны. Но и это будет неправильно. Механика Галилея–Ньютона позволила обнаружить между ними существенное различие.

Часто, говоря о «преимуществе» системы Коперника, связывают этот вопрос с отношением к ней Церкви: Церковь приняла систему Птолемея, но боролась с учением Коперника, включив в конце концов его книгу в «индекс» запрещенных книг. Но свидетельство Церкви — это очень слабый аргумент. Ссылка на отношение Церкви к Копернику мало что доказывает. Конечно, учение о том, что центр мира — не Земля, а Солнце, противоречило «истине» Священного Писания, в котором говорится, что Иисус Навин повелел остановиться Солнцу, а не Земле. Но любопытно, что католическая Церковь сама не сразу приняла учение Птолемея. И далеко не сразу стала противницей учения Коперника. Иначе книга Коперника не могла бы выйти в свет в 1543 году. Книга вышла с предисловием католического ученого бо-

гослова Оссиандера, который писал, что публикуемая система мира предлагает лишь некий новый математический способ для расчета положений планет на небе и составления календаря, и больше ничего. О том, что Солнце, а не Земля находится в «центре мира», ничего в предисловии не говорилось, да и в самой книге это не акцентировалось. Коперник и сам не мог физически обосновать, что центр мира — Солнце. И мы теперь знаем, что смысл системы Коперника и ее преимущество перед системой Птолемея — не в том, что остановилось Солнце и двинулась Земля: с точки зрения принципа относительности это довольно безразлично. Так что «истина» системы Коперника заключалась не в том, в чем полагал ее сам ее создатель, а в чем-то ином. (И здесь видим аналогию с Колумбом: он тоже, открыв Америку, так до конца жизни и не знал, что он открыл новый материк).

В чем же состоит «истина» системы Коперника? В чем физический смысл гелиоцентрической системы?

Каково же истинное движение планет? Кеплер



Второе физическое обоснование системы Коперника. «Системы мира», ставившие целью лишь объяснение видимых движений светил по небосводу, не давали ответа на вопрос: а как светила истинно движутся в пространстве? По каким законам? В частности, по каким траекториям?

Круговые орбиты, по которым двигались планеты и у Птолемея, и у Коперника, были фикцией, искусственной выдумкой. Лишь установив законы истинного движения планет (т. е. движения, допускаемого законами механики), можно было сделать настоящий *физический* выбор между двумя системами мира.

Иоганн Кеплер (1571–1630) еще до открытия принципов механики, с помощью одних только астрономических наблюдений сумел совершить научный подвиг — открыть законы истинного движения планет (1609 г.). Тем самым он уже нашел подход к физической интерпретации гелиоцентрической системы. Он был первый, кто дал системе Коперника уже достаточно убедительное физическое обоснование, хотя и он не открыл еще закона действия силы, движущей планеты. Мы уже знаем, что второе существенное физическое обоснование гелиоцентрической системы было открытие принципа относительности, сделанное позже, в 1632 г.

Галилей не признавал еще силы, исходящей от Солнца и движущей Землю: силу тяготения он приписывал Земле. К тому же он вовсе не собирался объяснять природу тяготения. В его «Диалоге» на вопрос, какая причина заставляет тела падать на Землю, Симплицио отвечает: «Всем известно, что тяготение». Но Сальвиати (читайте: Галилей) возражает ему: «Ты ошибаешься, Симплицио: то, что ты имеешь в виду, лишь называется тяго-

тением». Галилей считал, что для понимания сущности какого-либо явления отнюдь не достаточно присвоить ему название. А сам он гипотез о природе тяготения не измышлял.

Совсем иначе подошел к этой проблеме Кеплер. Первое, что он открыл, было то, чего не знал и Галилей: истинные орбиты планет. Его первый закон движения планет гласил: планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце. Второй закон утверждал, что площадь сектора орбиты, описанная радиусом-вектором планеты, изменяется пропорционально времени. Из него следовало, что скорость движения планет зависит от их расстояния до Солнца: чем ближе на своей орбите планета находится к Солнцу, тем она движется быстрее. Движение планеты зависит, стало быть, от Солнца. Из этого Кеплер сделал основательный вывод: именно Солнце должно быть источником движущей силы.

Кеплера не удовлетворило знание законов, по которым планеты движутся вокруг Солнца. По своим методологическим принципам Кеплер придерживался наследия физики древних греков: для объяснения движения он считал необходимым не просто описать движение, но и найти его причину. Иными словами, его интересовала природа движущей силы, исходящей от Солнца.

Небесный магнетизм Кеплера. Для Аристотеля, как мы видели, такой проблемы не существовало: его Перводвигателем была звездная сфера. Сила, движущая планеты, для него вообще не была силой тяжести. Кеплер первым понял, что истинным перводвигателем является Солнце. Он был убежден, что для поддержания движения требуется действие силы, следовательно, планеты заставляла двигаться по орбитам некая сила. Он утверждал, что эта сила исходит от Солнца и ослабевает с расстоянием. Но Кеплер, в попытке разгадать природу тяготения, обобщил представление о тяготении на все вообще тела. Он считал, что существует некое общее, присущее всем телам свойство притягиваться друг к другу: все вообще удаленные в пространстве тела стремятся двигаться по направлению друг к другу и объединяться в одно целое. Кеплер, следовательно, до-

пускал, как и Галилей, что притяжение между телами передается через пустоту. Но, в отличие от Галилея, он высказал соображения о природе этой общей силы притяжения. Он уподобил ее магнетизму, предположив, что Солнце испускает силовые «магнитные нити», которые и заставляют планеты двигаться. В книге «Гармония мира» он писал:

«Гравитацию я определяю как силу, подобную магнетизму — взаимному притяжению. Сила тем больше, чем оба тела ближе друг к другу».

Это определение, как видите, вполне правильно и с современной точки зрения, если принять во внимание, что, в отличие от магнитной, эта сила у Кеплера действовала на любые тела. Это позволило Кеплеру объяснить, в частности, истинную физическую причину океанских приливов. Он объяснил их гравитационным действием Луны и частично Солнца. Этого не смог сделать Галилей: не признавая гравитационного действия Луны и Солнца, он дал совершенно ложное объяснение приливов. Но, однако, и Кеплер не смог объяснить то, что объяснит потом Ньютон: почему под действием сил гравитации планеты движутся именно по эллиптическим орбитам.

Всегда ли физика отыскивает причины явлений? Можно заметить различие в методологии (т. е. в способах познания) Галилея и Кеплера. Оба считали, что исследование природы должно вестись на основе опытных фактов, а не на основе «книг», т. е. догм Священного Писания или сочинений схоластов. Но Кеплер, следуя традиции древних греков, всюду стремился отыскивать причины фактов (явлений), тогда как Галилей ставил главной целью правильное математическое описание явлений природы, не отыскивая их конечных причин. Галилей хорошо понимал древнегреческую проблему причинности: естественные причины образуют бесконечный ряд, так что ни для одного явления природы не удастся найти так называемой *финальной* (т. е. окончательной) естественной причины. Причина любого явления, которую отыскивает физик, всегда является *подчиненной*, т. е. требует для себя своей причины, причем тоже в мире

природных явлений. Только тогда познание будет истинно физическим — природа будет объясняться через саму природу, а не через нечто иное, стоящее над природой (подобно Перводвигателю Аристотеля).

Если финальные причины и существуют, они в любом случае физически непознаваемы, поскольку их нельзя проверить на опыте: опыт имеет дело только с подчиненными причинами, потому что только они принадлежат к миру наблюдаемых явлений природы. Именно из этих соображений Галилей, а потом и Декарт объявили финальные причины ненаучными (нефизическими). Такие причины относятся уже не к природе — их уже нельзя называть естественными; источником их следует называть Божество. Но Галилей говорил, что в споре между геоцентрической и гелиоцентрической системами мира апеллировать к вмешательству Бога бесполезно, так как для всемогущего Бога было бы одинаково легко заставить как Солнце обращаться вокруг Земли, так и Землю вокруг Солнца. Финальная причина, как ссылка на волю Божию, все равно не поможет нам сделать выбор между различными системами мира.

Галилей и Декарт отвергли финальные причины вовсе не из отрицательного отношения к религии (оба признавали существование Бога). Не отвергая религиозного познания, они, однако, четко отделяли его от познания научного. Галилей по этому поводу даже сформулировал принцип, уже философский, называемый *принципом двойственности истины*: оба способа познания — научный и религиозный — позволяют постичь истину, только разными путями, с использованием разных типов причинности. Наука использует только естественную причинность и изучает только подчиненные причины. Религия использует причинность «свободную» (так ее позднее назвал И. Кант) и отыскивает финальные причины для всех явлений природы.

Отношение Галилея к Церкви и к религиозному познанию хорошо охарактеризовано им самим: «Я множество раз наблюдал за колебаниями подвешенной в церкви на длинном подвесе лампы, которую кто-нибудь нечаянно толкнул». Очевидно, в Церковь его не тащили силой, он ходил туда как верующий. Но,

находясь в Церкви, он более, чем молитвам, предавался размышлениям о законе колебания маятника. Он знал, что Господь не объяснит ему этого закона непосредственно, а в Священном Писании этого закона не найти. Но знал он и другое: тот же Господь вложил в него разум, которым он может поверять свои опытные наблюдения.

Таким вот образом, наблюдая за колебаниями лампы в церкви и измеряя время по биению собственного пульса, Галилей собственным разумом установил закон, известный сейчас как закон изохронизма колебаний маятника: период колебаний не зависит ни от массы маятника, ни от его размаха, т. е. амплитуды колебаний (при условии, если эти амплитуды не слишком велики). Этот закон представляет собой как бы колебательный аналог его собственного закона падения тел: любые маятники, независимо от их массы, одинаково «падают» в поле сил тяжести.

Аксиоматический метод. У Кеплера не было таких вольных отношений с Богом, как у Галилея. Кеплер был религиозным мистиком (как и Ньютон, как и Паскаль) и, возможно, верил, что Господь непосредственно дает ему откровения о финальных причинах явлений — и потому верил в абсолютность причинности и отыскивал всегда причины. Галилей же основал свой научный метод на другом (этот метод используется в физике и по сей день и называется *аксиоматическим* методом). Он понял, что для научного познания следует обрывать бесконечные причинные ряды, т. е. находить такие факты (явления), которые, хотя и служат причинами других явлений, но сами как бы не имеют причин. Такие факты — как бы первичные причины — называются *аксиомами*. Они принимаются без доказательств (т. е. без отыскания их причин) и кладутся в основу физической теории.

Галилей, таким образом, в Новое время и на новом уровне возродил так называемый *дедуктивный* метод познания древних греков, или принцип дедукции, состоявший в выводе частных заключений из небольшого числа постулированных (т. е. принятых без доказательства) общих положений — аксиом. Блестящий пример построения математики на основе дедуктивного метода

дал в III веке до н.э. Евклид, чьи «Начала» более чем на два тысячелетия стали образцом аксиоматического построения науки. Галилей решил математизировать физику, применив аксиоматический метод к построению физической теории по образцу евклидовой геометрии. У него, как и у греков, была глубокая внутренняя убежденность в том, что в основе мира вещей лежит скрытый разумный смысл, что мир сотворен Богом по некоему разумному плану, и план этот — математический. Недаром Платон говорил: «Бог всегда является геометром». В том же самом смысле Галилей уподоблял природу книге, прочесть которую можно только с помощью математики:

«Философия природы написана в величайшей книге, которая всегда открыта перед нашими глазами, — я разумею Вселенную, но понять ее сможет лишь тот, кто сначала выучит язык и постигнет письмена, которыми она начертана. А написана эта книга на языке математики, и письмена ее — треугольники, окружности ...»

Математика — язык Природы! Такой она была для Галилея, такой ее воспринимал Ньютон, а Леонард Эйлер позднее выразит этот пафос той мыслью, что открывать в математической форме законы природы — значит свидетельствовать о премудрости Всевышнего:

«Наш мир устроен наисовершеннейшим образом и является творением всеведующего Творца».

Мир протяженностей, или бегство от мистики. Декарт



Математизация физики. На тех же самых позициях стоял и младший современник Галилея Рене Декарт (1596–1650), который также поставил себе задачей математизацию физики по типу евклидовой геометрии и продвинулся на этом пути много дальше Галилея. Математизация означала, что физика должна исходить из небольшого числа аксиом, само собой очевидных, на которые опирается последовательность выводов по принципам аристотелевой логики. В силу принципов логики, все получаемые выводы обладают той же степенью достоверности, что и первичные аксиомы. Декарт вдохновлялся при этом не одними только целями чистого познания. Изучение физики, по его мнению, должно сделать людей «господами и хозяевами природы». Этого господства над природой человек может достичь, применив к физическому исследованию методы математики, наиболее совершенной из всех наук.

Откуда берутся аксиомы? Декарт и Галилей, оба воспринявшие дедуктивный метод древних греков, мотивировали его по-разному. Оба принимали, что в объяснении природы разум должен исходить из общих положений (аксиом), но Декарт считал, что сами эти общие положения разум должен находить в себе самом, Галилей же думал иначе — полагал, что разум может их выработать лишь на основе наблюдений. Декарт обосновывал свое мнение тем, что наши наблюдения несовершенны: наши органы чувств способны лишь вводить нас в заблуждения, туман которых может развеять только наш разум. Истинным может быть только то, что наш разум воспринимает как нечто абсолютно ясное и несомненное. Такими вот ясными и несомненными для разума представлялись Декарту идея Бога (высшего Разума), а

также идея бытия: «мыслю — значит существую» (бытие также сводилось к разуму и было для разума ясным и несомненным).

Что касается Галилея, то он для обоснования своей позиции приводил такой аргумент: утверждать, что разум сам в себе содержит знание о Природе, — значит считать, что Бог сначала сотворил человеческий мозг, в который вложил это знание, а уже потом создал Вселенную в точном соответствии с этим человеческим знанием. Неужели так в действительности происходило миротворение? Утверждать подобное — значит ставить человека в центр миротворения или уж по крайней мере вводить совершенно недоказуемый (самим разумом) антропологический принцип: в мире существует только то, что способен познать человек.

Галилей как бы хотел сказать: вы можете принять этот принцип и уверовать во всемогущество «чистого разума», но берегитесь — все измышления чистого разума о Природе могут оказаться чистой воды фантазией. Во всяком случае необходимо убедиться, что «истины», исходящие от разума, соответствуют Природе, а это возможно лишь путем непосредственного контакта с ней. *Научный* подход к описанию Природы предполагает, что только у нее самой можно научиться языку, на котором написаны ее письмена.

Это было уже обоснование современного экспериментального метода в физике. Он возник как опровержение метода Декарта, который настолько веровал в непогрешимость своего чистого разума с его «ясными и четкими» идеями, что даже если его выводы опровергались опытом, он на это отвечал: тем хуже для опыта. Так случилось, например, с его теорией соударения шаров: достаточно было подойти к бильярдному столу, чтобы убедиться в неправильности выводов Декарта.

Трудно было добиться «господства над природой» с помощью разума, который не желает считаться с этой Природой и не хочет даже вступать с ней в контакт.

И при всем том Декарт был гениальным математиком, механиком и философом, внесшим огромный вклад в естествознание (странности же свойственны великим людям). Он заложил основы аналитической геометрии, создал одну из известнейших

в истории философских систем, а что касается механики, то он в чем-то ушел и дальше Галилея. В своих «Началах философии» (обратите внимание на название труда!), в 1644 г., уже после смерти Галилея, он сформулировал закон инерции полнее, а главное точнее самого Галилея — уже примерно в таком виде, в каком этот закон войдет позднее в аксиоматику механики Ньютона. Галилей рассматривал лишь движение в одной плоскости, а главное — он ошибочно считал, что «естественное» движение тела — это равномерное движение по окружности. Такое движение, по его мнению, совершает тело до тех пор, пока нечто (мы теперь говорим — сила) не выведет его из этого состояния. Галилей потому и отказался приписать Солнцу притягательное действие, что считал: Земля движется по окружности вокруг Солнца естественным образом, без действия сил, иными словами, по инерции. Декарт понял, что «естественное» движение — это равномерное движение по прямой. Пусть, например, мы вращаем камень на конце веревки. Если веревка оборвется (т. е. на камень перестанет действовать сила), то камень полетит не вдоль радиуса и не по окружности, а по касательной к окружности. Иначе говоря, он будет двигаться с постоянной скоростью и прямолинейно в том направлении, в каком двигался в момент обрыва веревки, подчиняясь тем самым закону инерции, сформулированному Декартом.

Умозрение и опыт. Как видите, пренебрежение опытом не помешало Декарту лучше и в более точном виде сформулировать один из трех основополагающих законов классической механики, нежели то смог сделать Галилей, наблюдавший за движением тел на опыте. Опыт опытом, без него действительно нельзя познать законы природы. Но познание лишь начинается с опыта (и заканчивается тоже им: тут Галилей прав — теория должна соответствовать опыту, а следовательно, и проверяться на опыте). Однако теорию не создать и закон не сформулировать без внеопытных, умозрительных (априорных) общих положений. Мы говорим — *общих*, значит справедливых для всех тел. Между тем, мы на опыте никогда не можем наблюдать движение *всех* тел. Так, Галилей не сформулировал бы закон падения, только

лишь наблюдая падающие с Пизанской башни тела. Закон Галилея содержит нечто неизмеримо большее, чем то, что мог дать Галилею опыт: он утверждает, что *все* тела, падающие где угодно, в том числе и там, где ни Галилей и никто другой никогда не смогли бы их наблюдать, падают с одинаковым ускорением.

То же самое относится и к закону инерции, тем более что в чистом виде движение по инерции наблюдать на опыте просто невозможно: на любое движущееся тело всегда действует сила сопротивления окружающей среды. Можно даже сказать, что принцип инерции в строгом смысле никогда не подтверждается опытом, и его формулировка — исключительно умозрительная.

Историки физики считают, что если бы не страх перед инквизицией, то Декарт и принципу относительности Галилея придал бы математически более строгую формулировку, чем то сделал сам Галилей. Однако Декарт скрывал свои мысли и не посмел гласно вступать в противоречие с положением о неподвижности Земли, которое ревностно защищала Церковь.

Боязнь пустоты. От Галилея и Декарта идут две разные традиции истолкования умозрения древних греков. Декарт, так же как и Кеплер, считал, что физика непременно и всегда должна отыскивать причины явлений. Это буквально соответствовало аристотелеву пониманию смысла физического знания. Галилей, как мы видели, полагал целью физики не столько причинное объяснение, сколько математическое описание явлений природы. По Декарту, физика должна искать ответ на вопрос, *почему* происходят явления (вспомните Аристотеля!); по Галилею — исследовать, *как* они происходят. Цель Декарта — поиски причин, цель Галилея — описание явлений.

Посмотрим, как проявилось принципиальное различие мышления двух ученых в главном для нас вопросе — в вопросе о тяготении.

Начать с того, что Декарт совершенно не понял учения Галилея о тяжести и его закон падения тел. Он не принял их: его кинематике было даже чуждо само понятие ускорения тел. Отыскивая всюду причины, он видел причину изменения движения лишь в непосредственном соприкосновении тел: неконтакт-

ное воздействие одного тела на другое трудно было признавать в качестве материальной причины изменения движения. Признание неконтактных действий казалось Декарту возвращением к оккультизму средневековой схоластики, и в этой борьбе против мистики его потом поддерживали Гюйгенс и Лейбниц. В самом деле, для того чтобы тело А притягивало на расстоянии тело В, нужно, чтобы оно *знало*, где находится тело В. А как неодушевленное тело может «узнавать»? Да еще узнавать через абсолютную пустоту.

Всепроникающая материя. Если неконтактных сил вообще не существует, то взаимодействие не может передаваться через пустоту. Отрицание неконтактных сил, таким образом, приводило Декарта к отрицанию пустоты. Как же он понимал пространство?

Дело в том, что пространство — одна из двух фундаментальных составляющих философской системы Декарта. Он признавал две фундаментальные субстанции: протяженность и сознание, принципиально друг от друга отделенные. Мир сознания — нематериальный и непространственный, это мир идей, с собственной логической причинностью, в которой Первопричиной является Бог. Это не есть физический мир, и в его познании Декарт допускал и отыскивал финальные причины. На этом пути к отысканию финальных причин Декарт основал свое так называемое онтологическое доказательство бытия Бога.

Другая, естественная причинность имеет место в мире протяженностей, для которого Декарт создавал свое учение о движении и о тяготении. Само существование внешнего физического мира, т. е. мира вещей Декарт доказывает, выводя его из субстанции протяженности: тела существуют потому, что они обладают протяженностью. Все, что протяженно, то материально: это было еще одно обоснование декартова тезиса о том, что пространство не может быть пустым. Тогда, очевидно, оно всегда и всюду чем-то заполнено. Чем же?

«Тонкой материей», отвечал Декарт. Что это такое?

Выкачивая воздух насосом из баллона, мы достигаем в нем все меньшей и меньшей плотности воздуха. Но, даже выкачав

из него весь воздух, мы не сможем «выкачать» из него тонкую материю Декарта. Недаром ее называли еще *пленум* («все заполняющий»). От ее присутствия нельзя избавиться, потому что она — принадлежность пространства. Лучше сказать: пространство не может существовать без этой тонкой материи, хотя мы ее не можем ни увидеть, ни почувствовать. Она не поддается нашему воздействию, потому что не обладает никакими физическими свойствами, кроме свойств протяженности и движения.

Не поддаваясь воздействиям, тонкая материя сама обладает действиями: светом, теплом и *тяготением*. Вес (тяготение) есть свойство движения тонкой материи.

Вихревая Вселенная Декарта. Вселенная, по Декарту, представляет собой гигантскую совокупность вихрей, в форме которых существует его вездесущая среда, тонкая материя, наделенная Богом непрерывным вихревым движением. Эта среда несет вокруг Солнца планеты, как корабли, плавающие в гигантском водовороте эфирного моря. Гигантский вихрь, ось вращения которого проходит через Солнце (рис. 12.1), заставляет планеты обращаться вокруг Солнца. Спутники движутся благодаря меньшим вихрям, окружающим каждую планету. Что касается земной тяжести, то Декарт видел ее причину в давлении, которое оказывают на тела частицы тонкой материи — «флюиды». Тела падают на Землю потому, что подталкиваются по направлению к Земле теми же мельчайшими невидимыми частицами. Это стремление к центру и составляет вес тела, т. е. его тяжесть.

Если бы Галилей это знал, сказал как-то Декарт, то ему не нужно было бы строить безосновательную теорию падения тел в пустоте.

Чья теория оказалась «безосновательной», рассудило будущее. Рассудило, правда, не скоро. Созданное Декартом представление о флюидах господствовало в физике в течение всего XVIII и частично в XIX веке. Теория тяготения Галилея–Ньютона восторжествовала только спустя полтора столетия после ее создания. Так, в 1740 г. Парижская академия присудила премию за решение задачи о приливах и отливах и ньютонианцам Д. Бернулли, Л. Эйлеру и Маклорену, и картезианцу Кавальери. Тео-

рия Декарта пользовалась успехом потому, что объясняла движение планет, причем совершенно точно — достаточно было сделать правильное предположение о свойствах вихрей, а именно, что они движутся так, как движутся планеты согласно наблюдениям. С точки зрения объяснения наблюдений ни одна из теорий

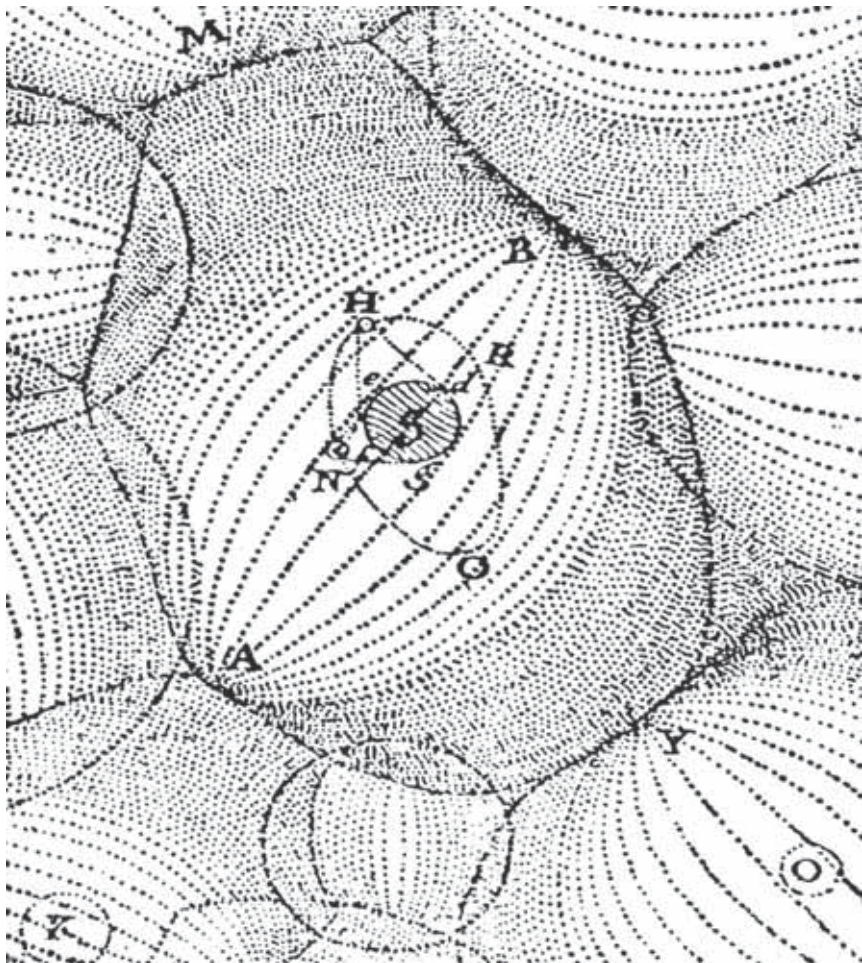


Рис. 12.1. Вихри тонкой материи по представлению Декарта. В центре находится Солнечная система (Oeuvres de Descartes, v. IX).

долгое время не имела преимуществ над другой. Теория тяготения Ньютона победила не потому или не только потому, что лучше объясняла факты. С нею победило новое мировоззрение, последовательность умозрительных принципов.

Декарт хотел избежать темной для разума, бессмысленной мистики. Но что темнее и мистичнее — пустое пространство или невидимые, недоступные опытному знанию флюиды? Эти удобные флюиды, подобно добрым гномам, позволили Декарту объяснить явление тяготения. Они скромно и скрытно от наших чувств всегда готовы к нашим услугам. Однако эти «услуги» в чем-то подобны услугам Бога, который одинаково легко может двинуть как Землю, так и Солнце. Не возврат ли это к тому же оккультизму, которого боялся сам Декарт?

Заметим, что тяготение не носит у Декарта характера обычного силового действия. Декарт не мог бы сказать, как Галилей или Ньютон: от Земли исходит сила, притягивающая тела и вызывающая их падение на Землю. Он бы сказал: падение тел на Землю вызывается специфическим движением флюидов. Для Галилея и Ньютона сила — это самостоятельная физическая реальность, несводимая к свойствам движения. Наоборот, свойства движения тел определяется действующей силой. Для Декарта сила (тяготение) определяется движением: это есть свойство движения флюидов.

Казалось бы, Декарт, который ввел понятие пространственной протяженности как философскую субстанцию, естественным образом мог бы рассматривать тяготение как свойство пространства. Если бы он это сделал, его концепция тяготения могла бы предвосхитить теорию тяготения XX века. Но он связал тяготение не с пространством, а с заполняющей пространство невидимой средой. Боязнь пустоты сыграла тут роковую роль. Декартова теория пала, уступив место теории ньютоновской. Мистика «пустоты» не смогла этому воспрепятствовать.

И вряд ли могло утешить великого Декарта то обстоятельство, что его теория тяготения пала не из-за несоответствия с наблюдениями.

Ньютон.

Завершение классической механики



Некоторые свойства личности. Ньютон сказал однажды: «Если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов». Он имел в виду своих великих предшественников. Было что-то символическое в том, что Исаак Ньютон (1642–1727) родился именно в год смерти Галилея. Чтобы завершить такое дело, как систематическое построение теоретической механики и теории тяготения, он и сам должен был быть гигантом, каким он и был — мощный духом, хотя физически, как говорят биографы, родился слабым и хилым ребенком. В «Математических началах натуральной философии» (1687) он воздал должное и Галилею, и Кеплеру, и Декарту (это так нетипично для нашего времени), хотя с картезианцами ему потом пришлось бороться всю жизнь, отстаивая свою теорию тяготения против теории Декарта.

Он был скромн: говорил, что он подобен мальчику, который лишь собирает ракушки на берегу великого океана Знаний. Публиковаться, правда, не любил: Роберт Гук сказал потом, что он первый догадался о том, что сила тяготения убывает пропорционально квадрату расстояния. Но Ньютон потом уверял, что его закон тяготения был сформулирован им еще за 20 лет до этих слов Гука, но лишь валялся под спудом в его личных бумагах, и так оно и было. Говорят, друзья долго уговаривали его опубликовать свои открытия, пока, наконец, «Математические начала» не увидели свет. Без сомнения, не зря уговаривали, хотя потом те же друзья уговорили его поехать в путешествие — излечиться от страшного переутомления, возникшего в процессе работы, когда он, не в состоянии остановиться, просто в изнеможении бросал перо.

Метод Ньютона. Ньютон начал, конечно, с того, чем закончили его предшественники. Он взял от Галилея и Декарта идею математизации физической науки по типу евклидовой геометрии — принцип аксиоматического построения физики. Его теоретическая механика и в нынешнее время преподается в университетах практически в том же виде, в каком она была изложена в «Математических началах» (правда, изменились некоторые, ныне устаревшие термины). До сих пор из всех физических наук его механика считается образцом теории: ни один раздел физики и сейчас никем не изложен в таком математически изящном виде. Представьте: всего на трех аксиомах — законах Ньютона, которые можно найти в любом школьном учебнике физики, построена механика, до сих пор считающаяся королевой всех физических наук. В любой области физики поныне применяются методы, которыми излагается механика Ньютона (лагранжев и гамильтонов методы).

Можно ли установить законы движения, лишь наблюдая за движением тел? Нет, нельзя: необходима теория, в основе которой лежат умозрительные принципы. Существует легенда о том, что Ньютон задумался по поводу закона тяготения, увидев упавшее с дерева яблоко в саду. Если этот рассказ даже и верен, смысла в нем мало. Ньютон никогда не открыл бы всемирность тяготения, наблюдая лишь падение яблок в своем саду, точно так же, как Галилей не открыл бы свой всеобщий закон падения тел, лишь наблюдая за их падением с Пизанской башни.

Однако и на одном умозрении физическую теорию не построить: можно впасть в крайность, от которой предостерегал Галилей и в которую нередко впадал Декарт, иногда полностью игнорируя факты опыта. Где же найти правильную, «золотую» середину между эмпирическими фактами и чистым умозрением? Ньютон нашел ее. Его работа представляет собой, пожалуй, наиболее заверченный образец гармонического слияния данных опыта и теоретических рассматриваний из всех существовавших когда-либо в физике.

Метод, примененный Ньютоном, называется сейчас правилом *индукции*, позволяющим сделать вывод об общих свойствах

всех тел, хотя эксперимент можно поставить только на некоторых. Индукция — это заключение от частных фактов к общим положениям при творчески контролирующем действии разума. Благодаря этому методу Ньютон сумел распространить область применимости законов механики на всю Вселенную и доказать универсальность тяготения. Если все тела притягиваются к Земле, море притягивается к Луне, а планеты притягиваются к Солнцу, то мы можем заключить, что все тела притягиваются друг к другу. Ньютон, кстати, теперь смог точным расчетом подтвердить идею Кеплера о притяжении морской стихии спутником нашей планеты — Луной. Море притягивается к Луне! Это потом даже станет поэтическим образом. Например, у Лермонтова в «Тамани» можно прочесть:

«Луна тихо смотрела на беспокойную, но *покорную ей стихию*».

Провозглашая этот закон, Ньютон, однако, не намеревался определять причину притяжения. Он более следовал методике Галилея, нежели Декарта: понимал, что всегда отыскивать причины — неблагоприятное дело в физике. И прямо написал:

«Причину этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю».

И добавил, в пику Декарту:

«Скрытым свойствам не место в экспериментальной философии», намекая на ненаблюдаемые декартовы флюиды.

«В такой философии предложения выводятся из явлений и обобщаются с помощью индукции . . . Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря».

Ньютоновы абсолюты. Ньютон ввел в употребление два понятия, которым до него большого значения в физике не придавалось: это масса и сила. Определить, что они означают, было все равно невозможно, и Ньютон не побоялся употреблять их без строгого определения. Так и в геометрии Евклида первоначальные понятия, такие как точка или прямая, не определяются,

равно как и не доказываются формулируемые для них аксиомы. «Масса» m , входящая в уравнение второго закона Ньютона

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F} , \quad (13.1)$$

интерпретируется сейчас как «мера инерции» тела, т. е. его сопротивляемости к изменению скорости, но и это, как мы увидим, не есть строгое определение. Силу \vec{F} можно понимать хоть как причину, хоть как следствие изменения скорости $\vec{v} = d\vec{r}/dt$, или причину ускорения $\vec{a} = d^2\vec{r}/dt^2$, где \vec{r} — радиус-вектор, указывающий местоположение тела.

Не убоясь Ньютон и мистики пустого пространства. Более того, он сделал пространство и время фундаментальными абсолютами, метафизическими субстанциями. Пространство он рассматривал как пустоеместилище вещей. Оно трехмерно, непрерывно, неподвижно, бесконечно, однородно и изотропно: «абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным». Время в концепции Ньютона также абсолютно и ни от чего не зависит. Оно — «вместилище событий», и ход событий не влияет на течение времени. Оно одномерно, непрерывно, везде одинаково, бесконечно, однородно. Оно не зависит, в частности от движения инерциальной системы отсчета: в преобразованиях Галилея стоит равенство $t' = t$, т. е. время в движущейся инерциальной системе отсчета такое же, как и в неподвижной.

Эти понятия чем-то напоминают метафизические абсолютные понятия древних греков, греческую «архэ». Ньютоновское пространство по своему смыслу очень близко к неподвижной однородной сфере, в форме которой Парменид представлял себе Вселенную, с той, правда, разницей, что парменидова сфера заполнена однородной материей, тогда как пространство Ньютона нематериально — это абсолютная пустота. Зато в этой пустоте, как во вместилище вещей, оказалось возможно изучать движение тел: с «вещами», т. е. с материальными предметами, можно связать инерциальную систему отсчета — ту, в которой исследуемое тело движется равномерно и прямолинейно. Тогда ускорение

\vec{a} этого тела приобретает четкий смысл как ускорение относительно инерциальной системы отсчета.

Все три закона Ньютона — закон инерции, закон движения (13.1) и закон равенства действия противодействию — не имели бы смысла, если бы не указана была система отсчета (включая сюда и способ измерения или отсчета времени), относительно которой определяется вектор \vec{r} . Такими системами являются инерциальные системы, и их существование постулируется первым законом Ньютона.

В согласии с принципом относительности уравнение Ньютона (13.1) должно записываться одинаково для любой из инерциальных систем, получающихся одна из другой с помощью преобразований Галилея

$$t = t' , \quad \vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t . \quad (13.2)$$

Здесь преобразования (13.2), в отличие от (9.1), записаны в векторной форме: \vec{r} — это радиус-вектор тела (материальной точки) относительно начала инерциальной системы отсчета.

Пусть материальная точка массы m в некоторой инерциальной системе отсчета S движется по закону (13.1). Обозначим другую инерциальную систему отсчета через S' . В теории Ньютона полагается, что сила F и масса m являются абсолютными величинами, т. е. одинаковы в обеих системах отсчета: $F' = F$, $m' = m$. Используя преобразования Галилея (13.2) и производя дифференцирование, легко убедиться, что в новой системе отсчета точка движется по закону $m'd^2\vec{r}'/dt^2 = \vec{F}'$. Это значит, что ускорение $\vec{a} = d^2\vec{r}/dt^2$ тела в системе S в точности равно ускорению $\vec{a}' = d^2\vec{r}'/dt^2$ того же тела в системе S' . Физически это можно проиллюстрировать так. Пусть, например, один наблюдатель стоит неподалеку от железнодорожного полотна, а другой находится в вагоне скорого поезда, движущегося с постоянной скоростью. Если движущийся наблюдатель уронит мяч на пол движущегося вагона, то он измерит такое же точно ускорение мяча (обусловленное силой притяжения Земли), что и покоящийся наблюдатель, если и *тот* уронит мяч на Землю.

Мы видим, что уравнение, выражающее второй закон Ньютона, не изменилось при переходе в систему отсчета S' , т. е. второй

закон Ньютона инвариантен относительно преобразований Галилея. Все инерциальные системы отсчета оказываются равноправными, и обнаружить абсолютное пространство в этих системах отсчета оказывается невозможным.

Действительно, ни одним изменением инерциальной системы отсчета (а это есть *изменение движения*) нельзя изменить описание механических явлений: они останутся теми же самыми. А какими еще механическими средствами, кроме наблюдения за движением тел, можно обнаружить пространство и тем самым убедиться в его существовании? В этом тоже было нечто мистическое. Механика формулировалась в инерциальных системах отсчета, в тех самых, в которых абсолютное пространство Ньютона принципиально необнаружимо. Оставаясь неподвижным, однородным и изотропным, оно недоступно никаким механическим воздействиям. Слово «абсолютное» для Ньютона буквально означало «не подверженное влиянию масс и их движений».

Наконец, Ньютон положил в основания механики и еще одно темное, «мистическое» понятие: материальную точку. Это — объект принципиально ненаблюдаемый: точку нельзя увидеть. Планеты, огромные небесные тела, равно и как само Солнце, в тысячи раз превосходящее их по массе, рассматривались как точки, в которых сосредоточена вся масса тела. Отвечает ли это какой-либо реальности? Разумеется, нет. Масса Солнца (около 2×10^{33} г) распределена в объеме, приблизительно сферическом, с диаметром в 1390600 км, превосходящем объем Земли в 1300000 раз. Тем не менее Ньютон предположил (и потом сумел обосновать вычислениями), что Солнце притягивает все планеты так же, как точка, находящаяся в его центре и обладающая той же массой.

Как видим, не следует буквально принимать слова Ньютона: «гипотез не измышляю». Он измыслил много гипотез, да при том таких, которые показались его современникам просто фантастическими. Поэтому большинство из них отказывались принять закон тяготения Ньютона и придерживались декартовой концепции вихрей. Например, Лейбниц категорически отказался принять ньютонову концепцию мгновенной передачи тяготения

через пустоту. И в самом деле, это всем ученым казалось мистической из мистик: передача взаимодействия без передающей среды и с бесконечно большой скоростью — мгновенно.

Эффективность теории. Прошло почти полтора столетия после Ньютона, пока его теория тяготения не вытеснила полностью представление о флюидах. Благодаря чему ей удалось восторжествовать? Благодаря тому, что обещал и сам Ньютон: его теория будет с поразительной точностью описывать все явления тяготения и на Земле, и в небесах.

Это и случилось. Первое великое торжество ньютоновой теории тяготения состоялось в 1759 году и было связано с предсказанием появления кометы Галлея. Сначала сам Э. Галлей по способу, предложенному Ньютоном, вычислил орбиту кометы, получившей впоследствии его имя, и предсказал ее появление около 1758 года. С приближением этой даты французский математик А.-К. Клеро сумел предсказать запоздание времени появления кометы. Это запоздание было связано с возмущающим притягательным действием больших планет — Юпитера и Сатурна — на эллиптическую орбиту кометы. Прodelав соответствующие вычисления на основании закона всемирного тяготения, Клеро определил прохождение кометы через перигелий в 1759 году, что и подтвердилось с высокой точностью даже несмотря на то, что в то время не были известны еще две большие планеты Солнечной системы — Уран и Нептун.

Но, пожалуй, самое удивительное подтверждение ньютоновой теории дал в 1846 г. другой французский ученый Урбан Леверрье. То, что он сделал, было каким-то чудом. Он открыл новую большую планету Нептун, находясь не в обсерватории, а за письменным столом, в своем рабочем кабинете. С помощью закона Ньютона он произвел анализ возмущений (отклонений от строгой эллиптической орбиты) планеты Уран, которые вначале казались непонятными и загадочными. Леверрье предположил, что эти возмущения вызываются притягательным действием другой, пока неизвестной планеты, находящейся за орбитой Урана. По небольшим отклонениям в движении Урана он сумел определить массу, орбиту и положение на небе неизвестной

до сего времени планеты, которую нельзя было даже увидеть простым глазом. После этого оставалось лишь сообщить астрономам в Берлинскую обсерваторию, в какую точку неба надо направить телескоп, чтобы обнаружить новую планету. Таким образом, планета Нептун была найдена не случайно, а, как говорят, «на кончике пера».

Мистика мистикой, а теория оказалась настолько поразительно эффективной, что не принять ее уже оказалось невозможно. Но сначала посмотрим, как она объясняла движение планет и универсальность гравитации. Любопытно посмотреть, как из самых невероятных, мистических постулатов оказалось возможно вывести самые реальные, наблюдаемые эффекты, причем с высокой точностью соответствующие вычислениям.

Всемирное тяготение



Сила тяготения не движет планеты. Иоганн Кеплер открыл законы, по которым движутся планеты Солнечной системы. После этого естественно стал на очереди вопрос о силе, которая вызывает движение планет. Кеплер сам пытался найти эту силу, но в его время еще были не ясны законы механики. Впрочем, Кеплер мог бы уже знать про закон инерции, но почему-то не знал, хотя и находился в переписке с Галилеем. Он предполагал, что движение продолжается только до тех пор, пока на тело действует сила, а что при отсутствии силы тело движется равномерно и прямолинейно — это ему не было известно. Поэтому он считал, что от Солнца должна исходить сила, «движущая» планету, как бы толкающая ее по орбите. Кеплер полагал, что эта сила вызывается вращением Солнца вокруг оси: из вращающегося Солнца вырываются некоторые «силовые нити», которые увлекают планету по ее пути.

С другой стороны, Галилей тоже ошибочно полагал, что на планеты не действует со стороны Солнца никакая сила — ни движущая, ни даже хотя бы удерживающая планету на орбите. Он считал, что планеты движутся по круговым орбитам по инерции, без действия сил.

Теперь мы знаем, что нет нужды предполагать в Солнце движущую силу. Сила, исходящая от Солнца, вовсе не движет планету, как думал Кеплер, а лишь удерживает ее на орбите, не позволяя ей удаляться от Солнца вдоль своего радиуса-вектора. Достаточно лишь силы удерживающей, той, существование которой отрицал Галилей. Точно так же сила, исходящая от Земли, лишь удерживает Луну на ее орбите. Для пояснения разберем движение Луны около Земли.

На рис. 14.1 изображено движение Луны. Если бы в положении L прекратилось действие силы, исходящей от Земли, то Луна стала бы перемещаться прямолинейно по направлению LL_1 и через секунду оказалась бы в точке L_1 . Но вследствие притяжения Земли она за это время приблизится к Земле на расстояние L_1L_0 . Под совместным воздействием инерции и притяжения Луна будет совершать сложное движение, складывающееся из двух движений: одно — без сил (по инерции) по прямой LL_1 , а другое — под действием удерживающей силы Земли по прямой L_1T . Это сложное движение и будет истинным движением Луны — по дуге LL_0 . Можно сказать: центральная сила притяжения, исходящая от Земли, заставляет Луну непрерывно отклоняться от прямолинейного пути и тем самым «падать» на свою орбиту. Точно так же обстоит дело и с движением планеты под влиянием притяжения Солнца.

Прямая задача небесной механики. Установив это, Ньютон теперь мог решить задачу, которая сейчас называется прямой задачей динамики материальной точки: зная закон движения точки, найти выражение для закона действия на нее силы. В строгом своем виде эта задача решается методом дифференцирования, поэтому для ее решения Ньютону пришлось изобрести

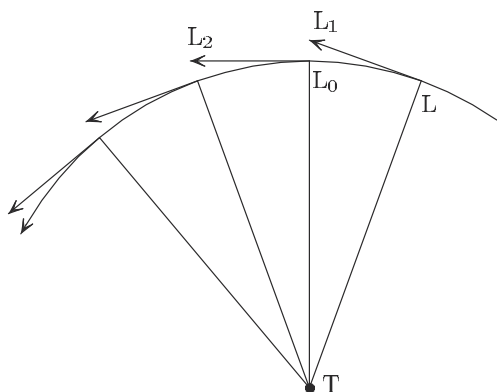


Рис. 14.1. Схема обращения Луны (L) вокруг Земли (T)

дифференциальное исчисление. Пользуясь им, Ньютон со всей строгостью вывел из законов движения планет Кеплера закон действия силы тяготения Солнца, т. е. основную формулу закона всемирного тяготения.

При упрощающем предположении кругового движения планеты этот закон может быть выведен из третьего закона Кеплера и без использования дифференциального исчисления (заметим, что в действительности планеты движутся хотя и по эллиптическим орбитам, но весьма близким к круговым).

Вывод этот основан на открытой еще Гюйгенсом формуле для ускорения точки, совершающей равномерное круговое движение:

$$a = \frac{v^2}{R} . \quad (14.1)$$

Здесь v — линейная скорость движения точки по кругу, R — расстояние от ее центра вращения. Поскольку скорость такой точки по величине не меняется, ее ускорение выражает лишь изменение направления скорости; поэтому ускорение \vec{a} точки направлено к центру вращения и называется *центростремительным ускорением*. В формуле (14.1) мы можем выразить скорость как частное от деления пути на время:

$$v = \frac{2\pi R}{T} , \quad (14.2)$$

где T — время оборота точки вокруг центра. Подставляя эту величину в формулу Гюйгенса, находим

$$a = \frac{4\pi^2 R}{T^2} . \quad (14.3)$$

Если мы обозначим через a_1 и a_2 центростремительные ускорения двух планет, через R_1 и R_2 — радиусы их орбит, через T_1 и T_2 — периоды обращения планет, то, пользуясь формулой (14.3), для отношения ускорений этих планет получим

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{4\pi^2 R_1}{T_1^2} / \frac{4\pi^2 R_2}{T_2^2} = \frac{R_1}{R_2} \frac{T_2^2}{T_1^2} .$$

Но согласно третьему закону Кеплера:

$$\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{R_2^3}{R_1^3} \quad (14.4)$$

(квадраты периодов обращения планет пропорциональны кубам больших полуосей — здесь просто радиусов их орбит). Подставляя в предыдущую формулу вместо отношения квадратов периодов равное ему отношение кубов радиусов, получаем:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{R_1}{R_2} \frac{R_2^3}{R_1^3} = \frac{R_2^2}{R_1^2} . \quad (14.5)$$

Это значит, что центростремительные ускорения планет обратно пропорциональны квадратам их расстояний от Солнца. Если обозначить через m_1 и m_2 массы первой и второй планет, а через F_1 и F_2 — силы, действующие на них, то по закону движения Ньютона (13.1)

$$F_1 = m_1 a_1 , \quad F_2 = m_2 a_2 . \quad (14.6)$$

Вследствие формулы (14.5) отношение этих сил будет таково:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{a_1}{a_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{R_2^2}{R_1^2} . \quad (14.7)$$

Это значит, что сила, действующая на планеты, прямо пропорциональна их массе и обратно пропорциональна квадрату их расстояний от Солнца.

Доказательство универсальности тяготения. Ньютон, пользуясь своим рассуждением по индукции, распространил этот закон не только на все планеты, но и на любые две материальные точки. В этом обобщении закон получает значение закона *всемирного тяготения* и может быть выражен одной математической формулой:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} , \quad (14.8)$$

где F — сила взаимного притяжения точек, m_1 и m_2 — массы точек, r — расстояние между ними, k — коэффициент пропорциональности, постоянный для любых тел. Его значение зависит

лишь от выбора единиц измерения массы, длины и силы. Если мы положим: $m_1 = m_2 = 1$ г и $r = 1$ см, то $k = F$ и численно представит собой силу, с которой две частицы вещества с массой по одному грамму, находящиеся на расстоянии одного сантиметра, притягиваются друг к другу.

Только значительно позднее Ньютона, в 1798 г., Кавендишу при помощи так называемых крутильных весов удалось экспериментально измерить эту ничтожно малую силу притяжения и тем самым определить коэффициент k . Численно он равен $6,67 \times 10^{-8}$ — это приблизительно одна пятнадцатимиллионная часть дины. Этот постоянный коэффициент, входящий в формулу (14.8) закона всемирного тяготения, принадлежит к числу так называемых мировых физических констант и носит название *гравитационной постоянной Ньютона*.

Что же позволило Ньютону распространить закон притяжения планет на все вообще тела в природе? Как уже говорилось, метод индукции всегда опирается на критическое умозрение. Ньютон подтвердил свою догадку строгим вычислением. А именно, он показал с помощью расчета, что сила, удерживающая планеты Солнечной системы на своих орбитах, действует по такому же закону, как и привычная нам на Земле собственная сила тяжести.

Для этой цели он вычислил ускорение, с которым камень падал бы на Землю, находясь от нее на расстоянии Луны: это 60,27 радиусов Земли. Так как массы в теории Ньютона абсолютны, то из его закона движения (13.1) следует, что сила тяжести F камня пропорциональна его ускорению свободного падения g . А это значит, что g изменяется так же, как и сила тяжести, — обратно пропорционально квадрату расстояния от Земли. На Земле ускорение свободного падения приблизительно равно 981 см/с². Отсюда ускорение g' камня на расстоянии 60,27 радиусов Земли выражается через ускорение g камня у поверхности Земли в виде $g' = g/(60,27)^2 = 0,27$ см/с². Теперь по формуле Гюйгенса вычислим фактическое ускорение Луны (тоже «падающей» в каждый момент на свою орбиту в поле тяжести Земли): $a = 4\pi^2 R/T^2$, где вместо R следует подставить радиус орбиты

Луны (384450 км), выраженный в сантиметрах, а вместо T — период обращения Луны вокруг Земли, выраженный в секундах ($27,3$ суток $= 27,3 \times 86400$ сек). Получаем $a = 0,27$ см/с², т. е. то же самое значение, что и для ускорения камня, находящегося на расстоянии Луны. Ускорение Луны, движущейся под действием земного тяготения, равно ускорению силы тяжести Земли на расстоянии Луны. Следовательно, сила, которая удерживает Луну на своей орбите, есть та же сила тяжести, с которой притягиваются к Земле все тела у ее поверхности. Заодно выяснилось, что все тела, независимо от их массы, будь то Луна, будь то камень, падают на Землю с одинаковым ускорением. Значит, закон Галилея о равенстве ускорений падения всех тел справедлив не только у поверхности Земли, но и на любом от нее расстоянии.

Закон Ньютона и космонавтика



Обратная задача небесной механики. Установив закон тяготения, т. е. решив прямую задачу динамики, Ньютон мог теперь приступить к обратной задаче: по известному закону действия силы тяготения найти закон движения материальной точки, на которую действует эта сила. Эта задача решается методом интегрирования, и для ее решения Ньютону необходимо было изобрести интегральное исчисление, что он и сделал независимо от Лейбница. Пользуясь этим новым математическим аппаратом, Ньютон теперь из закона всемирного тяготения вывел законы движения планет вокруг Солнца.

Можно было думать, что ответ уже известен: это законы движения планет, уже открытые Кеплером. Но универсальность математического метода позволила Ньютону показать, что законы Кеплера — не всеобщие. Так, Ньютон пришел к выводу, что в соответствии с законом тяготения небесные тела могут описывать не только эллипсы, но и любое коническое сечение, т. е. эллипс, параболу или гиперболу, в фокусе которых находится центральное притягивающее тело — Солнце. Таким образом, Ньютон расширил первый закон Кеплера. Оказалось, что род орбиты определяется скоростью тела в данной точке. При достаточно малых скоростях тело движется по эллипсу, при больших — переходит на другую, уже не замкнутую орбиту: параболическую или гиперболическую и, следовательно, навсегда удаляется от центрального тела.

На этих выводах Ньютона основана космонавтика, возникшая в XX веке. По формулам Ньютона сейчас рассчитывается скорость, которую ракета-носитель должна сообщить телу для того, чтобы оно стало искусственным спутником Земли (так называемая первая космическая скорость), а также скорость, необ-

ходимая для того, чтобы оно полностью преодолело земное притяжение и навсегда «покинуло» Землю — перестало вращаться вокруг нее (эта скорость сейчас называется второй космической скоростью).

Если предположить, что тело обращается вокруг Земли по круговой орбите, и пренебречь силой сопротивления атмосферы, то необходимую для этого скорость тела — первую космическую скорость v_1 — можно рассчитать элементарным способом. Надо лишь учесть, что для этого тела центростремительное ускорение совпадает с ускорением силы тяжести g : $v_1^2/r_0 = g$, где r_0 есть расстояние тела от центра Земли (не забудем, что в теории Ньютона любое тело притягивает так, как будто бы вся его масса была сосредоточена в его центре масс). Из этого равенства находим $v_1 = \sqrt{gr_0}$. Примем, что спутник движется невысоко над поверхностью Земли, — на расстоянии, пренебрежимо малом по сравнению с радиусом Земли 6370 км. Тогда, подставляя в полученную формулу $r_0 = 6370$ км и записав ускорение свободного падения как $g = 0,0098$ км/с², получим значение первой космической скорости: $v_1 = 7,9$ км/с.

Чтобы получить значение второй космической скорости v_2 , элементарных методов даже для случая круговой орбиты недостаточно: здесь не обойтись без интегрирования. Скорость v_2 тела массы m должна быть такой, чтобы энергия тела mv^2 могла уравновесить так называемый *гравитационный потенциал* Земли Φ . Гравитационный потенциал в точке, отстоящей от центра Земли на расстоянии r_0 , есть потенциальная энергия Π_∞ тела в этой точке, отнесенная к единице массы тела: $\Phi = \Pi_\infty/m$. Величина Π_∞ равна работе силы тяжести, совершаемой при перемещении точки с расстояния r_0 от Земли на бесконечность. Она вычисляется интегрированием элементарной работы силы тяжести $F = kmM/r^2$, где M — масса Земли, по переменной r на пути от r_0 до бесконечности.

Произведем расчет:

$$\Pi_\infty = \int_{r_0}^{\infty} k \frac{mMdr}{r^2} = kmM \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} = -kmM \frac{1}{r} \Big|_{r_0}^{\infty} = k \frac{mM}{r_0} . \quad (15.1)$$

Следовательно ньютоновский гравитационный потенциал в точке, отстоящей от центра масс на расстоянии r_0 (для любого тела массы M , не обязательно для Земли), выражается формулой

$$\Phi(r_0) = k \frac{M}{r_0}. \quad (15.2)$$

Теперь для получения скорости v_2 достаточно записать равенство $mv_2^2/2 = \Pi_\infty$ (необходимая кинетическая энергия точки должна быть равной работе по преодолению ее силы тяжести, начиная с расстояния r_0 до бесконечности). Так как $\Pi_\infty = m\Phi(r_0) = kmM/r_0$, то равенство примет вид $mv_2^2/2 = kmM/r_0$, откуда, деля на m , получаем:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2kM}{r_0}}. \quad (15.3)$$

Чтобы найти скорость v_2 по формуле (15.3), требуется, как видим, знать массу Земли M . Вопрос о вычислении массы Земли сам по себе представляет интерес. Закон Ньютона позволил найти очень простой способ ее вычисления. Мы знаем, что на поверхности Земли тело массы m притягивается к Земле с силой $F = kmM/R_0^2$, где R_0 — радиус Земли, M — ее масса. С другой стороны, по закону движения Ньютона $F = mg$, где g — ускорение свободного падения тела. Приравнявая эти два выражения для силы тяжести F тела, получаем: $mg = kmM/R_0^2$, откуда $M = gR_0^2/k$. Подставляя в это выражение уже известные нам значения g , R_0 и k , получаем: $M = 5,97 \times 10^{27}$ г. Такова масса Земли.

Для вычисления скорости v_2 по формуле (15.3) следует, как и прежде, учесть, что расстояние r_0 спутника от центра Земли пренебрежимо мало отличается от радиуса Земли R_0 , так что можно вместо r_0 принять значение R_0 (переведенное в сантиметры). Приняв также для массы Земли вычисленное нами значение $M = 5,97 \times 10^{27}$ г, а для гравитационной постоянной известное нам значение $k = 6,67 \times 10^{-8}$, получаем величину второй космической скорости (уже переведенную для удобства в километры за секунду): $v_2 = 11,2$ км/с.

Вторая космическая скорость — это наименьшая скорость, с которой тело преодолевает земное притяжение: при этой скоро-

сти оно перестает вращаться по эллипсу и переходит на параболическую орбиту. По этой орбите оно навсегда ушло бы от Земли, если бы не было более могущественного притяжения Солнца. Вследствие тяготения Солнца, тело, уйдя с земной орбиты, станет вращаться по эллипсу вокруг Солнца.

При скоростях больших, чем 11,2 км/с, тело также уходит от Земли, но уже по гиперболической траектории. Не может ли быть такой скорости, начиная с которой тело, запускаемое с поверхности Земли, преодолевает не только притяжение Земли, но и притяжение Солнца и, таким образом, навсегда покидает Солнечную систему? Расчет по тем же формулам Ньютона показывает, что это произойдет по достижении телом, ускоряющимся в направлении движения Земли, скорости $v_3 = 16,7$ км/с. Эта скорость называется третьей космической скоростью.

Теория тяготения, созданная в XVII веке, обслуживает космонавтику XX века! После Ньютона на основе его теории тяготения была создана новая самостоятельная наука — *небесная механика*. Она позволяла рассчитывать не только видимые положения светил на небе, но и их истинное движение в космическом пространстве. Основы ее заложены Ньютоном, но главный вклад в ее развитие внес знаменитый французский механик, математик и астроном Пьер Симон Лаплас (1749–1827).

Кеплер открыл законы движения планет эмпирически, путем наблюдений. Бог знает, как ему это удалось! Эйнштейн, например, всю жизнь удивлялся: как можно было открыть законы движения планет, еще не зная законов механики, по которым происходит это движение? Ньютону уже не нужны были наблюдения: он *вывел* законы движения, да еще более точные, из созданной им физической теории.

Как взвесить небесные тела? Мы уже знаем, как Ньютон уточнил первый закон Кеплера. То же он сделал и с третьим законом. Наблюдения позволили Кеплеру получить его третий закон движения планет в форме (14.4), но она оказалась лишь приближенной. Ньютон вывел точную формулу для третьего закона Кеплера:

$$\frac{a_2^3}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{T_1^2} \times \frac{M_2 + m_2}{M_1 + m_1}. \quad (15.4)$$

Здесь M_1 — масса некоторого центрального тела (например, Солнца), m_1 — масса его спутника (например, Земли), a_1 — большая полуось орбиты спутника, T_1 — период его обращения. Соответственно, M_2 , m_2 , a_2 и T_2 обозначают аналогичные величины для другого центрального тела и его спутника (например, Земли и Луны). Точная формула (15.4) позволила Ньютону, зная массу Земли и Луны, вычислить массу Солнца. С помощью этой формулы оказалось также возможным, зная массу Земли, вычислить массы других планет.

Ньютон оказался первым ученым, который «взвесил» небесные тела.

Что является теорией тяготения с XX века



Принцип соответствия. Система Птолемея (да во многом и система Коперника) была лишь теоретической астрономией, но не теоретической физикой. Небесная механика Ньютона—Лапласа стала тем и другим: астрономией, основанной на строгой физической теории. Именно по ее формулам Клеро предсказывал время появления кометы Галлея, а Леверрье открывал планету Нептун. По ее формулам производятся расчеты полетов космических кораблей, запускаемых уже много лет к орбитам планет Солнечной системы. Без небесной механики в XX веке люди не смогли бы полететь на Луну. Более совершенной современной теории тяготения (теории Эйнштейна) для этих целей по большей части не требуется: теория Ньютона, более простая, чем эйнштейновская, обеспечивает практически всю требуемую точность расчета орбит.

Поэтому можно сказать, что именно XX век, несмотря на появление новой теории тяготения, стал веком окончательного торжества теории тяготения Ньютона.

Так какая же теория — ньютоновская или эйнштейновская — должна называться теорией тяготения начиная с XX века? Ответ может показаться странным: и та, и другая. Каждая вновь появляющаяся физическая теория должна содержать предыдущую теорию в качестве своего частного или предельного случая. Этот принцип построения физической теории носит название *принципа соответствия*. Так и ньютоновская теория является некоторым предельным случаем теории Эйнштейна. Поэтому и теория Ньютона оказывается способной описать качественно, а иногда и количественно некоторые физические эффекты, кото-

рые математически совершенно строго могут быть рассчитаны лишь на основе теории Эйнштейна.

Первое предсказание черных дыр. К таким явлениям относятся так называемые *черные дыры*, удивительнейшие объекты, реальное существование которых окончательно не подтверждено наблюдениями и по сей день. Это небесные тела, излучающие свет, которые, однако нельзя увидеть, т. е. нельзя непосредственно наблюдать через телескоп. Дело в том, что излучаемый ими свет не выходит во внешнее пространство: световые лучи, искривляясь под действием мощного гравитационного поля, движутся по замкнутым траекториям и поэтому не могут достигнуть наблюдателя.

Ученые XX века с удивлением обнаружили одну давно забытую работу Лапласа 1796 года. В этой работе Лаплас, в сущности, на основе закона Ньютона теоретически предсказал существование черных дыр, о которых ученый мир стал говорить только в XX веке, с появлением общей теории относительности Эйнштейна. Неудивительно, что эта маленькая заметка Лапласа была забыта чуть ли не на два столетия. Между тем, в этой забытой работе Лаплас показал, что если массивное тело излучает свет, то изнутри некоторой малой области около его центра, с радиусом $r = r_g$, свет не может покинуть излучатель.

«И по этой причине самые большие светящиеся тела во Вселенной будут для нас невидимыми» (Лаплас).

В настоящее время известно, что свет может рассматриваться и как волны, и как частицы (корпускулы). Вспомнив наш расчет второй космической скорости, можно сказать, что корпускула света массы m удаляется с расстояния r_0 от тела массы M на бесконечность при условии $kmM/r_0 = mv^2/2$, т. е. при условии, если она обладает скоростью $v = \sqrt{2kM/r_0}$. Корпускула света в пустоте всегда обладает постоянной скоростью $v = c$. Посмотрим, начиная с какого расстояния r_0 корпускула покидает излучатель. Подставляя в нашу формулу $v = c$, получаем: $r_0 \equiv r_g = 2kM/c^2$.

Эта величина

$$r_g = 2kM/c^2 . \quad (16.1)$$

носит сейчас название *гравитационного радиуса* тела массы M . Для любых расстояний $r < r_g$ свет не может покинуть излучатель и выйти во внешнее пространство. Если излучающий объект имеет радиус меньше, чем r_g , то ни одна излучаемая им порция света не достигнет внешнего наблюдателя. Мы имеем то, что сейчас называется черной дырой.

Истина гелиоцентрической системы



Роль инерциальных систем отсчета. Теперь можно вернуться к давно поставленному вопросу: в чем же состояла «истина» системы мира Коперника по сравнению с системой Птолемея? Мы уже знаем, что «двинуть» Солнце вокруг Земли так же легко, как и Землю вокруг Солнца, — для этого достаточно выбрать геоцентрическую систему отсчета вместо гелиоцентрической. Кроме того, обе системы мира хороши только как наблюдательные астрономические теории (и в этом отношении они были одинаково хороши!). А с точки зрения физики — обе одинаково плохи и не выдерживают критики: обе допускают движение вокруг пустого места, обе утверждают существование некоего абсолютного центра мира.

Почему же Галилей с такой настойчивостью боролся именно за систему мира Коперника? В чем состоит то преимущество этой системы мира, за которую Галилей, в борьбе с Церковью, ставил на карту даже собственную жизнь? Нелишне напомнить, что в свое время Сократ пошел на смерть за философскую истину.

Окончательный ответ на этот вопрос дала только ньютонова теория тяготения. Она окончательно разрешила вопрос о принципиальном различии между геоцентрической и гелиоцентрической системами отсчета (а Галилей, как мы уже говорили, шел на риск именно за систему отсчета).

Если бы в теории Ньютона *все* системы отсчета были равноправны, то и с точки зрения физики ни одна из двух систем мира не имела бы преимущества перед другой. Но дело в том, что у Ньютона, как и у Аристотеля, системы отсчета неравноправны. Для Аристотеля существует одна абсолютная, привилегирован-

ная система отсчета с началом в центре мира, для Ньютона — не одна, а целый класс систем отсчета, выделенных среди всех других: это все инерциальные системы отсчета. В любой неинерциальной (т. е. ускоренно движущейся) системе отсчета закон инерции не выполняется: в ней тело и без взаимодействия с другими телами движется с ускорением. Принцип относительности движения утверждает равноправие не всех, а только инерциальных систем отсчета. И только для этих систем отсчета формулируются закон тяготения Ньютона и его механика, в других они не имели бы смысла (или им пришлось бы придавать какой-то совсем иной смысл). Ньютон потому и ввел абсолютное пространство, что в этом пространстве на неограниченном расстоянии существуют инерциальные системы отсчета, и потому ввел абсолютное время, что в этом времени координаты точки в разных инерциальных системах отсчета оказываются связанными преобразованиями Галилея.

Мистика сил инерции. Что же произойдет с законом движения Ньютона, если перейти в неинерциальную систему отсчета? Этого закона больше не будет. В ускоренно движущихся системах отсчета пространство перестанет быть однородным и изотропным (таково оно только в инерциальных системах отсчета), время перестанет «течь» равномерно (оно одинаково течет только в инерциальных системах отсчета). Преобразования Галилея для таких систем отсчета потеряют смысл. Закона тяготения Ньютона также более не будет: он не только изменит свой вид, но и вообще будет иметь разный вид в разных неинерциальных системах. Другими словами, нарушится его инвариантность, а это значит, что закон тяготения войдет в противоречие с принципом относительности (в соответствии с этим принципом теория Ньютона формулируется как инвариантная по отношению к классу инерциальных систем отсчета).

В неинерциальных системах отсчета нарушается вся механика Ньютона, в том числе и закон сохранения механической энергии. Проявляется это в том, что при переходе к ускоренно движущейся системе отсчета возникают таинственные, неведо-

мого происхождения силы. Речь идет о так называемых *силах инерции*. Как и силы тяготения, они неконтактны, а в отличие от сил тяготения они не имеют материального носителя: нельзя указать, со стороны каких тел мы испытываем на себе действие сил инерции — либо этих тел вовсе нет, либо они (по причине бесконечной удаленности) ненаблюдаемы. Их поэтому называют *фиктивными* силами: неизвестно, откуда они берутся. Они появляются только в результате перехода к неинерциальной системе отсчета.

Между тем эти фиктивные силы оказывают на нас самое реальное действие. Во внезапно затормозившем автомобиле, если вы зазевались, вы можете набить себе шишку о ветровое стекло вследствие действия этих сил. Таково действие перехода в поступательно движущуюся неинерциальную систему отсчета. При переходе во вращающуюся систему отсчета силы инерции проявляются даже в двух видах — силы центробежные и силы *кориолисовы*. Первые из них вызывают сплюснутость формы земного шара, атмосферные циклоны (прогноз погоды не может обойтись без учета действия этих сил в атмосфере). Вторые возникают при движении тела относительно вращающейся системы отсчета.

Если мы выпустим снаряд в направлении меридиана Земли, то вскоре заметим, что меридиан как бы начнет убегать от него: какая-то сила заставит снаряд отклоняться от направления меридиана. Эта сила и называется кориолисовой. Существование этой силы приводит к тому, что один берег реки, текущей в меридиональном направлении, всегда выше другого: кориолисова сила, действующая на движущуюся волну, постоянно отклоняет ее в сторону одного берега. Сила порождена системой отсчета, а надо же! — подмывает берега рек, как будто система отсчета обладает энергией и может производить силовое воздействие, — что за фантастика? Это же форменное нарушение законов сохранения: волна, вечно подмывающая берег реки, работает как вечный двигатель. Между тем, это факт настолько заурядный, что его требуется учитывать при строительстве мостов, так что ни один строитель мостов не имеет право сказать, что может не

интересоваться вращением Земли. Приходится говорить: берег подмывается некоторой реальной силой, мы называем ее силой инерции волны, хотя знаем, что такой «силы» в механике нет, потому что ее, в сущности, и *в природе нет* — мы никогда не наблюдали тел, со стороны которых эта сила действует на волну. При появлении этой силы в нашем опыте классическая механика рушится как наука: рушится лежащий в ее основе принцип инерции, рушатся законы сохранения.

Решение вопроса: какая система мира истинна? Итак, резюмируем: механика Ньютона и его закон тяготения имеют смысл только в привилегированных — инерциальных системах отсчета. Если мы хотим сделать выбор между системами мира на основе этой механики, то надо лишь посмотреть, какая из двух систем отсчета — геоцентрическая или гелиоцентрическая — может больше претендовать на роль инерциальной системы отсчета. В ней и будет реализовываться ньютонова физика. Соответствующая система мира и может называться физически истинной.

Этот вопрос разрешается теперь весьма легко. Достаточно посмотреть на маятник Фуко — маятник, точка подвеса которого закреплена относительно Земли, — чтобы в несколько минут убедиться, что Земля — плохой претендент на тело инерциальной системы отсчета. И происходит это из-за ее довольно быстрого вращения вокруг своей оси (более быстрого, чем, например, вращение Солнца вокруг своей оси). Маятник не хочет вращаться *вместе* с Землей: плоскость его колебаний все время сохраняет неизменным свое положение в пространстве. Значит, она остается неподвижной относительно какой-то иной системы отсчета, *не связанной с Землей*, и мы воочию наблюдаем, как Земля поворачивается относительно этой системы отсчета. А раз поворачивается — притом столь явно и заметно, — то, значит, геоцентрическая система отсчета неинерциальна.

Что же это за система отсчета, которая с Землей не связана, но которой слушается этот маятник и относительно которой он не желает поворачиваться?

Хотя Солнечная система и движется относительно «неподвижных» звезд, но движется со скоростью, изменяющейся ничтожно мало по сравнению с расстояниями до них (потому мы и называем условно эти звезды неподвижными). Если взять за начало отсчета центр масс Солнечной системы и направить оси координат к удаленным (практически действительно неподвижным) звездам, то, очевидно, мы получим систему отсчета, отличающуюся от инерциальной столь же незначительно, сколь незначительно ускорение Солнца при движении в Галактике. Это и будет та система отсчета, относительно которой маятник сохраняет плоскость своего движения: в этой системе отсчета маятник движется по инерции.

Остается лишь выяснить, где будет находиться начало этой системы отсчета. Масса Солнца приблизительно в 750 раз превышает массу всех планет Солнечной системы. Ясно, что если сосредоточить массу всех планет и Солнца, взятых вместе, в одной точке (а так это и делается в теории Ньютона для определения притягательной силы всей Солнечной системы), то эта точка будет находиться в сравнительной близости от центра Солнца. Вот почему гелиоцентрическая система отсчета (с началом в центре Солнца) очень мало отличается от инерциальной и поэтому именно она есть та система отсчета, в которой движение планет определяется законом Ньютона, т. е. планеты истинно движутся в пространстве так, как это предписывает закон Ньютона. Свяжите систему отсчета с Землей — и планеты уже не будут двигаться по эллипсам: их траектории искажутся вследствие двойного вращения Земли — вокруг оси и вокруг Солнца. (Это, конечно, касается только описания движения небесных тел. Движение же тел у поверхности Земли удобнее всего описывать именно в системе отсчета, жестко связанной с Землей).

Система мира Коперника потому имеет преимущество перед системой Птолемея, что только в ней теория тяготения Ньютона отражает реальное строение Солнечной системы. В частности, соотношение масс Солнца и планет.

Метафизика в физике Ньютона



Парадигма сознания. Аристотель положил в основу своей физики, во-первых, метафизические (внеопытные) принципы, во-вторых, принцип Бога (Перводвигатель). Это были, как мы сейчас говорим, *методологические принципы* физики Аристотеля.

Галилей и Ньютон боролись не против метафизики вообще и не против Бога, а только против методологических принципов Аристотеля. Ньютон построил механику и теорию тяготения на своих метафизических принципах и на своей идее Бога.

Нельзя сказать, что принципы Аристотеля не были хороши: они вполне соответствовали мировоззрению древних греков. Эти принципы окончательно сформировали древнегреческое учение о Космосе — извечной мировой гармонии. Даже в сегодняшние дни ни физика, ни философия еще не могут создать ничего подобного. Но к XVII веку решительно изменилось мировоззрение, или, как говорят, *парадигма сознания*.

Физика, как известно, относится к так называемым «точным наукам», про которые принято считать, что они обладают общепризнанными и бесспорными знаниями о мире — такими, которые, кажется, обладают атрибутами вечности. Этим самым точные науки принято отличать от философии: разные философии в своем объяснении мира, как правило, не согласуются друг с другом. В точных науках об истине не спорят — ее находят и доказывают экспериментом или логикой. То, что можно обосновать и что в силу этого признается каждым человеком, становится тем, что называется научным знанием — и уже не является философией.

Однако самый беглый взгляд на историю физики обнаруживает, что ее «бесспорные» знания не столь незыблемы. Они от-

людь не вечны: они общезначимы и общепризнанны лишь в ту или иную конкретную историческую эпоху. Со сменой эпох эти знания не просто возрастают количественно, но и меняются качественно: новое знание часто в корне отменяет предыдущее. В развитии физики не наблюдается плавного, постепенного прогресса: иногда наступает, как говорят, революция в физике. Под этим понимается принципиальная смена научной парадигмы, или физической картины мира. Эта смена парадигмы, как правило, вызывается не появлением новых, не объясняемых имеющейся теорией фактов, ибо новые факты всегда получают то или иное объяснение в уже существующей научной теории. Основным движущим фактором, изменяющим физическую картину мира, является изменение мирозерцания ее творцов: люди по-иному начинают воспринимать мир. Это проявляется не столько в изобретении новых физических понятий, сколько в том, что в прежние понятия физики начинают вкладывать новый смысл. Смена парадигмы происходит вследствие изменения философского мировоззрения ученых, то есть изменения их метафизики, так что философия движет прогрессивное развитие физики.

Изменение древней и средневековой парадигмы сознания было начато Галилеем и окончательно закреплено с утверждением ньютоновской теории тяготения. Новая, галилеево-ньютоновская парадигма может быть названа *механистической*: она означала всеобщую программу описания всех физических явлений на основе одной только механики.

Сразу заметим, что и галилеево-ньютоновская парадигма продержалась лишь до XX века. В XX веке утвердилась новая парадигма сознания в физике — квантово-релятивистская.

Метафизические постулаты ньютоновой физики. К метафизическим принципам теории Ньютона относятся:

- 1) принцип мгновенного распространения тяготения, называемый *принципом дальнего действия*;
- 2) абсолютные пространство и время;
- 3) концепция материальной точки;
- 4) принцип инерции.

Ни один из них не является принципом *апостериори*, т. е. не диктуется опытом (экспериментальными фактами). И ни один из них не является также принципом *априори*, т. е. не диктуется разумом: нельзя сказать, как того требовал Декарт, что эти принципы — логическая принадлежность нашего разума и требуются им с необходимостью.

Начать с принципа инерции. Он утверждает весьма непонятную вещь — существование системы отсчета (*инерциальной*), в которой при отсутствии действующих на тело сил оно движется равномерно и прямолинейно. Даже если бы мы могли наблюдать такое движение, возник бы вопрос: относительно чего тело движется равномерно и прямолинейно? Ответ может быть только один: относительно ... той же инерциальной системы отсчета. Мы узнаем в этом рассуждении знакомый уже нам логический порочный круг.

Далее, в определение входит еще: «при отсутствии действующих на тело сил». Как узнать, что на тело не действуют никакие силы? Это можно сделать только наблюдая его движущимся равномерно и прямолинейно в инерциальной системе отсчета. Мы не только не вышли из порочного круга, но и увязли в нем окончательно. Выясняется, что принцип инерции нельзя научно сформулировать — выразить его априори, т. е. независимо от опыта. (Видимо, это понимали уже древние греки: они почему-то «не открыли» принцип инерции, а вернее — сочли более полезным обойтись без него). Вместе с тем нельзя также сказать, что этот принцип дан нам апостериори, т. е. из опыта, потому что на опыте мы никогда не наблюдаем движение тел в отсутствии всяких сил. Принцип инерции — ни опытный, ни умозрительный. Его следует отнести не к физическим, а к метафизическим принципам.

По Галилею и Ньютону, сила тяжести действует через пустоту. Что такое абсолютно пустое пространство? Ранее мы сказали, что пустое пространство можно мыслить. Но мы мыслим скорее лишь приближение материальной среды к пустоте, а не саму пустоту. Мы можем представить себе сколь угодно разреженное пространство в баллоне, из которого мы откачиваем воздух. Но

представить себе все пространство без единой частицы невозможно. Если пространство пустое, то в нем нельзя даже измерять расстояний: расстояния измеряются между телами. Нельзя также и вводить системы отсчета: оси координат также должны быть привязаны к каким-либо телам, называемым телами отсчета. Так, мы знаем инерциальную систему отсчета, в которой реализуется система мира Коперника: она связана с космическими телами — Солнцем и удаленными звездами. Но как построить абсолютную систему координат, связанную с абсолютно пустым пространством? Такое пространство никак невозможно обнаружить, потому что оно недоступно воздействию никаких тел.

Для Аристотеля и почти для всего греческого мирозерцания (исключая атомистов) пустота не обладает бытием. Это значит: пространство без тел для них не имеет смысла, пространство — «телесно», сама протяженность — это протяженность тел, ничто более. А что такое протяженность в абсолютной пустоте? Ни измерить, ни представить ее себе невозможно.

Пространство Галилея–Ньютона не только пустое, но и бесконечное (инерциальные системы отсчета простираются в бесконечность). Можно ли представить себе бесконечное? Греки боялись не только пустоты, но и бесконечности, относя то и другое к Хаосу: бесконечное — значит неопределенное, необозримое, неизмеримое; это — Хаос, стихия. Бесконечность Галилея–Ньютона — это та метафизика, которой стремились избежать греки, создав, вместо этой метафизики Хаоса, свою метафизику Космоса. И, может быть, они были правы. Наш знаменитый философ А. Ф. Лосев сравнил как-то телесный и конечный греческий Космос с уютной и теплой деревенской избой, в которой приятно жить, а бесконечное пространство — с ледяной и не обжитой казармой, из которой хочется убежать. Но дело даже не в эмоциях — в каком мире лучше себя чувствовать. Хуже то, что бесконечный мир невозможно познавать. И даже нельзя утверждать, что он существует. Более того, говорит Лосев, «если мир бесконечен, то это значит, что ровно никакого мира не существует». Вот даже как! Хотя, может быть, это сказано слишком эмоционально.

Другой абсолют Ньютона — абсолютное время — также недоступен воздействию тел и никак не определяется их движением. Ньютон сам отличал свое «абсолютное время» от того относительного времени, которое мы измеряем с помощью периодических движений (например, сутки как период вращения Земли). В человеческом разуме вообще не было и нет абстрактного, отвлеченного от вещей понятия времени, с помощью которого мы могли бы измерять движение или просто изменение вещей. На практике (на это впервые указал Эрнст Мах в своей «Механике») мы не временем измеряем изменение вещей, а как раз наоборот — к абстрактному понятию времени мы приходим, многократно наблюдая изменение вещей. И это время, которое мы познаем с помощью нашего опыта, — время «относительное», то, которое мы действительно можем измерить по наблюдаемому движению тел (так измеряется, например, звездное время в астрономии). Что же касается «абсолютного времени», то оно «не может быть измерено никаким движением и потому не имеет ни практического, ни научного значения» (Э. Мах).

Попробуем на основании абсолютных ньютоновских понятий разобраться хотя бы в основном законе динамики Ньютона:

$$\text{сила} = \text{масса} \times \text{ускорение} . \quad (18.1)$$

Мы убедимся, что в этом «законе» все непонятно, так как ничто в нем не определено. Во-первых, неизвестно, относительно чего измеряются ускорения. Относительно инерциальной системы отсчета? Но к какому телу отсчета привязать ее в абсолютной пустоте? Во-вторых, для определения ускорения требуется понятие времени. Между тем, мы не имеем никакого способа измерения ньютоновского абсолютного времени: по Ньютону, оно не зависит от какого бы то ни было движения тел и, следовательно, никак им не определяется. Мы привыкли измерять время по наблюдению периодических движений. А как измерить время, которое не зависит ни от каких вообще движений тел?

Далее, не определено понятие массы: не зная, как определить свойство инертности (закон инерции), мы не можем знать, что такое есть *мера* инертности. А. Пуанкаре заметил даже, что

можно было бы перестроить механику, увеличив массы всех тел в одно и то же число раз, — от этого не изменятся принципы динамики и не нарушится соответствие с опытом.

А что касается силы, то мы уже говорили о трудностях определения этого понятия. К абстрактному понятию «сила» мы тоже приходим на основании субъективных опытных представлений об «усилиях», но вовсе не имеем это понятие в готовом виде в нашем разуме.

Этим объясняется, почему Кирхгоф предложил, а Пуанкаре согласился рассматривать второй закон Ньютона только как *определение* силы: сила *есть* произведение массы на ускорение тела. Да и это определение, добавляет Пуанкаре, «еще недостаточно, так как мы не знаем, что такое масса: у нас нет иного выхода, кроме следующего определения, которое является признаком нашего бессилия: массы суть коэффициенты, которые удобно ввести в вычисления».

Неопределенность понятия силы приводит к тому, что и третий закон Ньютона приходится принимать за определение. Даже опытное представление о силе как об усилии, измеряемом по удлинению пружины динамометра, основано на применении закона равенства действия и противодействия: при измерении силы таким способом мы вынуждены *предполагать*, что наше мышечное усилие в точности равно противодействующей силе упругости пружины. Чтобы иметь какой-либо способ измерения силы, мы вынуждены и третий закон Ньютона рассматривать не как закон (опытный или умозрительный), а как определение.

Теория, аксиомы которой становятся определениями, ничего не может утверждать, кроме тавтологий, т. е. тождеств $A = A$. Подберите в уравнении движения коэффициент (массу m) подходящим образом — и теория никогда не может быть опровергнута ни экспериментом, ни логикой. Но, правда, с помощью такой теории ничего нельзя будет познавать. Такие теории, говорил Эйнштейн, нужны только лавочникам и инженерам. Он этим хотел сказать, что такие теории полезны только в прикладном, практическом, но отнюдь не в познавательном отношении.

И, между тем, Эйнштейн сам восхищался теорией Ньютона — ее математической красотой и точностью предсказаний. Очевидно, она отнюдь не сводится к тавтологии. Теория Ньютона до сих пор имеет познавательное значение именно вследствие того, что она содержит в себе существенный метафизический элемент. «Сила» была введена Ньютоном в механику не как физическое понятие, подлежащее определению, а как метафизическое (неопределяемое) понятие. Это относится, разумеется, не ко всякой силе, а только к неконтактной (к таковым принадлежит сила тяготения). Силам, возникающим в результате непосредственных соприкосновений тел, нет необходимости приписывать метафизическую природу: такие силы определяются и объясняются прямым воздействием материальных тел.

Ньютоновское абсолютное пространство недоступно воздействию тел — не обладает ли оно способностью само воздействовать на тела? Если это так, то существование абсолютного пространства можно было бы обнаружить по его действию на наблюдаемое движение тел. Тут возможна аналогия с «тонкой материей» Декарта: не подвергаясь воздействиям, она сама порождает движение тел. Ньютон определенно считал, что абсолютное пространство действует на тела, и это действие можно обнаружить, если наблюдать тела в их неинерциальном (ускоренном) движении. Чтобы продемонстрировать это, Ньютон придумал свой знаменитый опыт с вращающимся ведром, наполненным водой. Закручивая поддерживающее ведро веревку, Ньютон заставлял его вращаться вокруг своей оси. По мере того, как вода начинала принимать участие во вращении, ее поверхность меняла свою форму: из плоской она становилась параболической (воронкообразной). Совершая ускоренное (вращающееся) движение относительно инерциальной системы отсчета, связанной с полом комнаты, вода в ведре меняла свою форму вследствие действия на нее сил инерции — центробежных сил. Действие этих сил можно было наблюдать явно — по изменению формы поверхности воды. Что порождает эту силу? Материального источника у нее нет: никакие тела на воду не действовали (ведро само подвергается действию этих сил). Ньютон отвечал, что это — силы,

с которыми абсолютное пространство действует на ускоренные тела.

Силы инерции — пожалуй, наиболее явный из метафизических элементов ньютоновской физики. Ньютон использовал их, чтобы продемонстрировать, как обнаруживает себя его абсолютное пространство. Мистические — фиктивные! — силы инерции оченьгодились Ньютону: благодаря им он сумел уловить свой главный абсолют — пространство. Существование сил инерции было доказательством физической реальности пространства. Абсолютное пространство настолько же реально, насколько реальна поверхность вращающейся воды в форме воронки. Воронку мы наблюдаем, она — физическое явление. Однако объяснение этого физического явления невозможно без метафизических постулатов. Ненаблюдаемое пространство проявляет себя через самое обыкновенное наблюдаемое явление. Метафизика проявляет себя через физику. Теория Ньютона особенно ярко демонстрирует, что физика невозможна без метафизики.

Введенная Ньютоном концепция материальной точки — тоже типичная метафизическая гипотеза: точку принципиально нельзя наблюдать, и она столь же неопределяема, как «точка» в геометрии Евклида. Между тем, без этой метафизической гипотезы не была бы создана небесная механика, позволившая с исключительной математической точностью рассчитывать силы притяжения между огромными космическими телами, которые никак нельзя уподобить точкам.

Теология в ньютоновской физике. И все же самым «темным» элементом в метафизике Ньютона была мгновенная передача гравитационных сигналов через пустоту (концепция дальностей действия). Не только противников Ньютона — картезианцев, — но и самого Ньютона устрашала эта мистическая идея о распространении взаимодействия с бесконечной скоростью и без помощи какой-либо среды — посредника в передаче взаимодействия. Ньютон далеко не сразу мог принять эту идею, ему самому казавшуюся абсурдной. В своем третьем письме к Бентли, особенно

охотно цитируемом противниками идеи дальногодействия, Ньютон писал:

«Допустить, что тяготение прирожденно материи, присуще ей, так что одно тело должно действовать на расстоянии через пустоту на другое без посредства чего-либо постороннего, помощью которого действие и сила от одного тела проводится к другому, есть для меня такая нелепость, что, полагаю, в нее не впадает ни один человек, способный к мышлению о философских вещах. Тяготение должно вызываться некоторым фактором, действующим согласно определенным законам».

Обычно на этом цитату обрывают, словно боясь узнать то, что Ньютон написал дальше. А дальше он написал:

«Какой это фактор, материальный или нематериальный, — я предоставляю размышлению моих читателей».

Читатели недолго мучились неопределенностью. Ньютон не скрыл от них, что склоняется к нематериальному посреднику. Он избрал то решение, которое сам же в письме к Бентли называл нелепым. Не побоялся ни нелепости, ни мистики. Это свое мистико-религиозное решение проблемы он высказал в конце «Математических начал» и позднее в «Оптике». Посредник — Бог, присутствующий как в пространстве свободном от тел, так и в пространстве, содержащем тела («Бог пребывает всюду, также и в вещах»). Утверждение мгновенного дальногодействия было эквивалентно утверждению о существовании Бога.

Это уже не гипотеза, физическая или метафизическая, — это чистая теология, решение проблемы со ссылкой на волю Божию. Этим самым Ньютон вводил в физику финальные причины (свободную причинность наряду с естественной). Ньютонова физика, которую следовало бы называть теологической, утверждала примат свободной причинности над естественной: Бог не подчиняется естественной причинности, но сам создает ее как способ бытия мира, Его творения. Пространство и время у Ньютона — это метафизические идеи Бога, они не возникают в человеческом мозгу подобно априорным принципам И. Канта: «Не Бог существует в пространстве и времени, но Он сам своим существованием производит пространство и время» (Ньютон).

После таких объяснений Ньютона становится понятно, что он создавал физику для решения теологических проблем. Его занимал вопрос о промыслительном действии Бога на мир (отрицаемом Лейбницем), и он хотел уяснить, как это действие Бога на мир проявляется с точки зрения земного разума. Некоторые позднейшие критики, например, Луи де Бройль, называли Ньютона великим мечтателем. Но де Бройль тут же оговаривался: именно мечтатели творят науку.

Эйнштейн.

Закон равенства инертной и гравитационной масс



Зачем нужна новая теория тяготения? Возможно, теологический характер физики Ньютона напугал многих ученых. Боясь ньютоновой мистики, они испугались и ньютоновой метафизики. А затем и метафизики вообще. Возможно, этому способствовало распространившееся потом философское учение И. Канта об априорных принципах познания, свойственных (и как бы врожденных) человеческому разуму. Кантианство позволяло избавиться не только от идеи Бога, но и от метафизических гипотез: по Канту, не Бог, а человеческий разум предписывает природе ее законы; поэтому и метафизика оказывалась излишней. Не случайно после Канта среди физиков распространилась крылатая фраза: «Физика, бойся метафизики!»

Борясь против ньютоновой метафизики, многие физики (например, Мах и Герц) как будто не замечали, что вместе с водой выплескивают и ребенка — вместе с метафизикой выбрасывают вон и физику Ньютона. Теперь очевидно ясно, что без метафизических постулатов физика Ньютона не могла бы возникнуть и столь эффективно работать. Настолько эффективно, что, когда Эйнштейн начал разрабатывать новую теорию тяготения, то некоторые физики (например, Макс Планк) удивлялись: зачем создавать новую теорию, когда и старая, ньютоновская, работает безукоризненно?

Если метафизические категории Ньютона сами по себе нельзя определить строго научно, то из этого не следует, что их надо отбросить: тогда рухнет и физика Ньютона. Например, нельзя было отбросить категорию «абсолютного времени», которое, по Э. Маху, «не имеет ни практического, ни научного значения» (Э. Мах, «Механика», 1909 г.). Эта категория уже потому имеет

научное значение, что без нее механика Ньютона не могла бы существовать как наука.

Эйнштейн оказался прав: ньютонову теорию тяготения должна была сменить новая теория. Это был тот случай, когда не оправдывалась поговорка «лучшее — враг хорошего». Впрочем, сменить — не значило отменить: вспомним, что теория Ньютона так и осталась предельным случаем теории Эйнштейна, притом самым удобным и эффективным для расчетов. Сменить теорию Ньютона оказалось необходимым не из-за того, что она держалась на метафизических гипотезах, а из-за того, что новая парадигма сознания должна была прийти на место старой. Хотя многие ученые и пугались метафизических гипотез, это не относилось к Эйнштейну. Он тоже создавал теорию гравитации как новую метафизику. И, подобно Ньютону и Эйлеру, верил в Бога как зиждителя гармонии Вселенной.

Почему Эйнштейн задумался над проблемой тяготения, когда, казалось, этой проблемы давно уже не существовало?

Однозначный ответ на этот вопрос дать трудно: гений — всегда загадка. Может быть, Эйнштейна заинтересовало особое свойство гравитационного поля: его универсальность (всемирность), которая могла натолкнуть его на мысль об особой *природе* гравитационных сил.

Сразу отметим, что физические и философские соображения, приведшие Эйнштейна к созданию новой теории тяготения — так называемые *эвристические*, или наводящие соображения, — это одно, а сама теория, ныне существующая в готовом виде, — это нечто другое. Эйнштейн создал теорию тяготения в результате многолетних и мучительных поисков, начавшихся сразу после создания им специальной теории относительности, с 1906 по 1916 год, после многочисленных попыток решения проблемы, предпринятых в ложных направлениях. Поэтому многие эвристические идеи, благодаря которым Эйнштейн пришел к своей теории, потом не вошли в саму теорию — оказались либо излишними, либо даже противоречащими ей.

Первое указание: закон Галилея. Видимо, в первую очередь Эйнштейн обратил внимание на тот факт, что сила тяго-

тения P (вес тела), в отличие от всех других сил, всегда пропорциональна массе m того тела, на которое она действует. Это следует из закона Ньютона: $P = kmM/R^2$, где M — масса Земли, R — ее радиус. С другой стороны, в уравнении движения классической механики сила F , сообщающая телу ускорение a , тоже пропорциональна его массе m : $F = ma$. Пусть сила F сама есть сила веса тела: $F = P$, сообщающая телу ускорение свободного падения: $a = g$. Тогда мы имеем равенство:

$$mg = k \frac{mM}{R^2} . \quad (19.1)$$

Деля обе части этого равенства на массу тела m , получаем:

$$g = k \frac{M}{R^2} . \quad (19.2)$$

Мы вывели из закона Ньютона закон Галилея: ускорение падения тел не зависит от их массы, потому что в полученном выражении (19.2) для g не входит масса тела m . Ускорение тела g не зависит от m , оно зависит только от массы Земли M и от расстояния R до ее центра.

На чем был основан наш вывод закона Галилея? На предположении о том, что в левой и правой частях равенства (19.1) масса m тела одна и та же (поэтому оказалось возможным поделить обе части равенства (19.1) на одну и ту же величину m). Но, если разобраться, массы m в левой и правой частях для одного и того же тела имеют совсем разную природу. Масса в левой части есть постоянная для данного тела величина, характеризующая поведение тела под действием сил. Эту постоянную можно назвать «инертной массой» ($m_{\text{ин}}$), так как она является мерой сопротивляемости тела ускорению вследствие свойства инерции. Масса m в правой части характеризует свойство тела гравитационно притягиваться к другому телу массы M . Выражение в правой части равенства (19.1) очень напоминает силу электростатического притяжения двух зарядов (по закону Кулона): роль этих зарядов играют массы m и M двух притягивающихся тел. В том случае, когда масса тела m играет роль «гравитационного заряда», ее называют «гравитационной», или «тяжелой» массой ($m_{\text{Т}}$).

Очевидно, закон равенства ускорений падения всех тел не мог бы выполняться, если бы инертная масса не равнялась для всех тел массе тяжелой: только в случае равенства $m_{\text{ин}} = m_{\text{т}}$ из формулы (19.1) могла получиться формула (19.2).

Теория тяготения Ньютона принимает закон падения тел Галилея: в ней сила тяжести, как и всякая действующая на тело сила, определяется ускорением падения тел. Из этого следует, что в теории Ньютона *инертная и гравитационная массы одного и того же тела всегда равны*.

Никакого объяснения этому факту теория Ньютона не дает, как не дает она и объяснения природы тяготения. Вообще говоря, могло бы случиться, что инертная и гравитационная массы большинства тел только приблизительно равны, что это приближенное равенство случайно, и при точном измерении обе массы в действительности окажутся различными.

Равны ли две различные массы? К счастью, утверждаемое равенство инертной и гравитационной масс оказалось возможно подвергнуть очень точной экспериментальной проверке. «Сила инерции» пропорциональна инертной массе тела. Поэтому, если на тело одновременно действуют и «силы инерции» и гравитационные силы, то направление их равнодействующей будет зависеть от отношения инертной массы тела к гравитационной. Определение направления этой равнодействующей для различных тел представляет критерий того, одинаково ли это отношение для всех испытываемых тел.

Необходимая экспериментальная установка создана самой природой: Земля, вращающаяся вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью, является, как мы знаем, неинерциальной системой. На тело, покоящееся относительно Земли, действуют две силы: гравитационное притяжение Земли и «центробежная сила». Полное ускорение этого тела относительно Земли получается векторным сложением гравитационного и «центробежного» ускорений.

Лоранд фон Этвеш (1848–1919) в многочисленных весьма точных опытах, проводившихся с 1886 по 1908 гг., подвешивал на коромыслах крутильных весов две гири из различных мате-

риалов, но с одной и той же гравитационной массой. Если бы их инертные массы не были равны, результирующие силы, действующие на гири, были бы непараллельны, и весы получили бы вращательный момент, легко обнаружимый на опыте. Эксперименты показывали, что такой момент всегда отсутствует, т. е. отношение инертной массы к гравитационной одно и то же для различных материалов. Этот результат был получен самим Этвешем с огромной для того времени относительной точностью: 10^{-8} . В настоящее время он подтвержден уже с точностью в 10^{-12} .

Выбором соответствующей системы единиц измерений всегда можно было добиться, чтобы для любых тел не только отношение инертной и тяжелой масс было одно и то же, но и сами эти массы совпадали. После опытов Этвеша у Эйнштейна не было никаких оснований сомневаться, что эти две различные по природе массы одинаковы. Но удивительно то, что Эйнштейн не упоминает об экспериментах Этвеша ни в 1907 г., когда он впервые использовал равенство инертной и тяжелой масс для построения теории тяготения, ни в 1911 г., когда Эйнштейн вернулся к разработке теории тяготения на основе этого закона. Впервые об опыте Этвеша Эйнштейн упоминает лишь в 1913 г., когда уже обозначились контуры его теории тяготения. Вероятнее всего, он до того времени действительно не знал об этом опыте. «В том, что этот закон выполняется строго, — писал он сам много позднее, — я не сомневался, даже не зная результатов изящных опытов Этвеша». Это показывает, какую незначительную роль играли экспериментальные данные в построении теории тяготения Эйнштейна. Эта теория при своем возникновении практически не имела экспериментально-эмпирических стимулов. Эйнштейн при построении теории действовал скорее не как физик, а как философ и математик.

Еще со времен Ньютона все физики знали факт равенства инертной и тяжелой масс, хотя Ньютон проверил его лишь с незначительной точностью в 10^{-3} . Настолько хорошо и давно знали, что никто этому факту давно не удивлялся, хотя могло случиться, в пределах такой точности, что это равенство — лишь

приближенное. Мы не удивляемся большинству привычных для нас явлений только потому, что они всегда у нас перед глазами, хотя многие из них для нас настоящая тайна. Так и в этом случае: никто не мог объяснить, почему две величины совершенно различного физического смысла всегда оказываются равными одна другой. Никто не мог определить, что такое инертная масса: это был лишь какой-то коэффициент, который удобно было вводить в уравнение движения. И эта масса оказывалась всегда равной тяжелой массе: точнее говоря, отношение веса тела к его инертной массе всегда одно и то же, хотя эти два свойства материи — вес и инертная масса — в корне различны. Постоянство этого отношения на самом деле было не менее удивительно, чем, скажем, такой факт, как неизменность из года в год отношения производства угля к производству пшеницы. Уголь и пшеница — продукты различного рода, и количественная потребность в них не обязана быть одинаковой. Если бы стало известно, что государство каждый год производит одно и то же количество тонн угля и пшеницы, то люди, конечно, удивились бы этому и стали бы искать объяснение этому факту в экономической структуре государства. Удивление в науке — вещь плодотворная, оно ведет к новым открытиям. Еще Аристотель говорил, что удивление — начало философии, и греки создали свою метафизику, когда удивились, что мир не таков, каким он кажется.

Однако постоянству отношения веса тела к массе не удивился никто, кроме Эйнштейна. Лишь Эйнштейн, по его словам, «крайне удивился, что этот закон существует, и предположил, что он и даст ключ к более глубокому пониманию инерции и тяготения». Удивившись этому закону, Эйнштейн решил искать сущность, или теоретическую *структуру* тяготения, которая соответствовала бы этому закону. В самом этом законе заключалось уже нечто мистическое. Возможно, именно таинственность самого этого закона возбудила любопытство Эйнштейна. Усмотрев в нем некое специфическое свойство гравитационного поля, Эйнштейн решил положить этот пока мистический факт в основу построения теории, вместо того чтобы выводить его из теории, построенной на других началах.

Парадигма Ньютона и концепция поля



Мы употребляем понятие «гравитационное *поле*». Оно стало возможным только в новой, эйнштейновской теории тяготения. Само понятие поля не было уже механическим понятием. Механика Ньютона имеет дело лишь с материальными точками, взаимодействие между которыми передается непосредственно, через пустоту. Понятие поля появилось с возникновением электродинамики Фарадея—Максвелла.

Эта теория, вместе с опытами Герца, ее подтвердившими, показала, что существуют особые — электромагнитные процессы, по существу своему оторванные от вещества, а именно волны, представляющие собой колебания (в пустом пространстве) особой субстанции, которая была названа электромагнитным полем. Сами Максвелл и Герц еще верили в возможность обоснования всей физики на основе классической механики и потому стремились дать механическое толкование уравнений Максвелла. В связи с этим было введено механическое понятие — *эфир*, невесомая и неподвижная среда, являющаяся переносчиком электромагнитных волн. Создавая свою теорию, Максвелл думал, что строит механику эфира, и только Лоренц, указавший на электромагнитное поле как на самостоятельную реальность, понял истинный смысл максвелловской теории.

В этой теории взаимодействие происходит не непосредственно между двумя удаленными точечными массами, а между точками поля, находящимися на бесконечно малых расстояниях друг от друга. Возмущение поля в некоторой точке вызывает изменение поля в соседних точках, которые в свою очередь передают его дальше. Таким образом, первоначальное возмущение

распространяется *с конечной скоростью* и в конце концов передается на большие расстояния.

Концепция поля уничтожала ньютонову парадигму механистического объяснения мира и ньютонову концепцию мгновенного дальнего действия. Максвелл установил, что электромагнитные возмущения распространяются в пустоте со скоростью, равной примерно 3×10^{10} см/с. Это есть скорость света (ее конечное значение уже было определено из астрономических наблюдений Ремером), поэтому Максвелл предположил, что свет является одним из видов электромагнитного излучения.

Концепция поля вытеснила потом и само понятие эфира. Это понятие казалось столь привлекательным потому, что неподвижный эфир идеально подходил для роли привилегированного тела отсчета, которое являлось бы материальной реализацией ньютоновского абсолютного пространства. С ним можно было связать абсолютную (а значит, абсолютно привилегированную) систему отсчета. Но развитие науки показало, что этим надеждам на эфир не суждено было сбыться. Оказалось, что уравнения Максвелла электромагнитного поля не ковариантны относительно преобразований Галилея: они вступали в противоречие с галилеевым принципом относительности. Противоречие в конце концов было ликвидировано с созданием частной («специальной») теории относительности.

Предпосылки и принципы частной теории относительности



Электродинамика противоречит механике. Самым простым доказательством нековариантности уравнений электромагнитного поля относительно преобразований Галилея (9.1) явился следующий установленный факт: скорость света в пустоте оказывалась одинаковой по всем направлениям. Между тем из преобразований Галилея в классической механике следует хорошо известный закон сложения скоростей: если в покоящейся системе отсчета S тело имеет скорость \vec{u} , то в системе S' , движущейся относительно S с постоянной скоростью \vec{v} , скорость тела равна $\vec{w} = \vec{u} - \vec{v}$. Это — так называемый классический закон сложения скоростей, легко получаемый дифференцированием по времени преобразований Галилея, записанных в векторной форме (13.2): $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t$. Дифференцируя это равенство, получим: $d\vec{r}/dt = d\vec{r}'/dt + \vec{v}$. Так как $d\vec{r}/dt = \vec{u}$, $d\vec{r}'/dt = \vec{w}$, то получаем: $\vec{u} = \vec{w} + \vec{v}$.

Отсюда следует: если u есть скорость света c в системе S , в которой эта скорость одинакова по всем направлениям, то в системе S' скорость света c зависит от направления: $c' = c - v$ в направлении v и $c' = c + v$ в противоположном направлении. Законы электромагнитного излучения, а потому и теория электромагнитного поля оказывались зависящими от выбора инерциальной системы отсчета.

Электродинамика оказалась противоречащей механике: для нее не выполнялся принцип относительности движения Галилея. Выходило, что теория электромагнитного поля должна формулироваться только в одной системе отсчета S , абсолютной системе покоя, единственной, в которой скорость света всюду постоян-

на. Эфир был введен в рассмотрение как тело этой абсолютной системы отсчета.

Однако механика Ньютона в XIX веке завоевала полное доверие физиков, а принцип относительности движения — в тогдашней механистической концепции — считался фундаментальным принципом природы. Было сделано много попыток преодолеть возникшую трудность — согласовать электродинамику с принципом относительности. Рассмотрим наиболее важные из этих попыток.

Пусть система S' — геоцентрическая (связанная с Землей), S — система, связанная с «неподвижным» эфиром. Земля движется по отношению к эфиру (в годичном обращении вокруг Солнца) со скоростью $v = 3 \times 10^6$ см/с. Тогда система S , связанная с эфиром, движется относительно Земли со скоростью $-\vec{v}$. Это скорость «эфирного ветра», создаваемого на поверхности Земли движением относительно нее эфира. Требовалось каким-то образом «убрать» эфирный ветер, чем-то скомпенсировать его — и тогда принцип относительности восстанавливался бы.

Передающая среда как тело отсчета. Одна из предложенных гипотез заключалась в том, что скорость света полностью определяется средой, сквозь которую свет распространяется: попав в движущуюся среду, свет «увлекается» ею и распространяется с одинаковой по всем направлениям скоростью в системе отсчета, связанной со средой. Так, свет от звезды, попав в атмосферу Земли, распространяется с постоянной скоростью относительно геоцентрической системы отсчета. Тогда скорость среды \vec{v} , прибавляясь к скорости эфирного ветра $-\vec{v}$, не изменяет скорости света: $\vec{c}' = \vec{c} + \vec{v} - \vec{v}$, так что скорость света c' в среде совпадает со скоростью света c в вакууме.

Эту гипотезу, так хорошо «убравшую» эффект эфирного ветра (даже если он существует) пришлось оставить из-за ее явного несоответствия данным наблюдений. Гипотеза увлечения света средой противоречила давно известному эффекту абберрации света звезд — отклонению наблюдаемого луча вследствие годичного вращения Земли. Отклонение наступало вследствие сложения

скоростей света и Земли. Если бы световой луч, попадая в атмосферу, увлекался бы ею, то сложения скоростей не происходило бы — не наблюдалось бы явление абберрации.

Кроме астрономических наблюдений, эффект увлечения света опровергался лабораторным опытом, еще в 1851 г. поставленным Физо. Опыт Физо, в котором измерялась скорость луча света вдоль потока среды и в противоположном направлении, показал, что хотя движение среды и влияет на скорость света, это влияние незначительно и не может быть сведено к сложению скоростей света и среды.

Баллистическая гипотеза. Как только выяснилось, что скорость света не определяется движущейся средой, была выдвинута гипотеза: скорость света определяется скоростью источника излучения, подобно тому как в баллистике скорость снаряда, вылетающего из движущегося орудия, векторно складывается со скоростью орудия.

Эта гипотеза тоже «убирала» эффект эфирного ветра: скорость света \vec{c}' , испускаемого из земной лаборатории, по отношению к лабораторной установке оказывалась равной $\vec{c}' = \vec{c} + \vec{v} - \vec{v} = \vec{c}$, где c — скорость света в вакууме (или в эфире), а \vec{v} — скорость Земли, которая сначала прибавляется вследствие того, что источник света движется вместе с Землей, а потом вычитается вследствие наличия эфирного ветра.

Эксперимент Майкельсона—Морли. Баллистическая гипотеза очень хорошо объясняла отрицательный результат знаменитого эксперимента Майкельсона—Морли (1881–1889 годы), поставленного с целью определения скорости движения Земли (в обращении вокруг Солнца) по отношению к эфиру, или, иными словами, скорости эфирного ветра. В эксперименте свет из лабораторной установки сначала выпускался в направлении движения Земли по орбите, а затем в перпендикулярном направлении. Оказалось, что движение Земли относительно эфира никак не сказывалось на движении света: соответствующая задержка времени распространения света между источником и зеркалом и

обратно в двух описанных положениях установки была получена равной нулю. Несмотря на убедительную точность эксперимента (задержка света измерялась по сдвигу интерференционных полос), движение Земли относительно эфира обнаружено не было.

Означало ли это, что самого эфирного ветра не существует? Ритц, автор баллистической гипотезы, разъяснил: нет, не означало. Результат опыта Майкельсона допускал две различные интерпретации: 1) эфирный ветер существует, и верна баллистическая гипотеза; мы видели, что эффект эфирного ветра при этом ненаблюдаем. Но не исключалась и другая, альтернативная интерпретация: 2) эфирного ветра не существует, и не верна баллистическая гипотеза. Тогда скорость света c по отношению к установке Майкельсона равна скорости света по отношению к эфиру: $c' = c$. К скорости c не прибавляется скорость Земли и не отнимается скорость эфирного ветра.

Эта интерпретация означала, что относительно любой инерциальной системы отсчета свет распространяется так же, как он распространяется относительно эфира, — одинаково по всем направлениям и с одной и той же скоростью. Не существует привилегированной (абсолютной) системы ни с точки зрения механики, ни с точки зрения электродинамики. Тогда и тело такой системы отсчета — эфир — становился физически бессмысленным понятием, не только метафизическим, но и не нужным с точки зрения физики.

Уже после создания частной теории относительности выяснилось, опять-таки из астрономических наблюдений, что баллистическая гипотеза не верна, так что первая из двух высказанных интерпретаций опыта Майкельсона не может иметь места. Это выяснилось по наблюдениям за двойными звездами. Если бы баллистическая гипотеза была справедлива, то свет, испущенный каждой из двух компонент двойной системы, складывался бы со скоростями источников. Если одна компонента в момент излучения удаляется от нас, а другая приближается к нам, то свет от них доходил бы до нас в различные моменты времени. В результате их движение в пространстве и друг относительно друга представлялось бы нам в искаженном виде: например, в

некоторых случаях на некоторых участках орбиты наблюдалось бы попятное движение звезды. Так как на самом деле таких искажений видимого движения двойных звезд не наблюдается, то гипотеза Ритца не верна.

Принцип относительности Эйнштейна. Но это, повторяем, было обнаружено уже после создания Эйнштейном и Пуанкаре частной теории относительности. До опровержения баллистической гипотезы результат опыта Майкельсона мог быть объяснен и без этой теории. Это показывает, сколь малую роль сыграл опыт в создании этой теории. Главную роль сыграл элемент умозрительный: необходимость согласования электродинамики с принципом относительности. Для этой цели понадобилось дать новую, более общую формулировку самого принципа относительности.

Расширенный принцип относительности означал теперь следующее: не только для классической механики, но и для электродинамики формулировка законов не изменяется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Этот принцип лег теперь в основание новой физической теории, объединившей описание механических и электромагнитных явлений, — «частной теории относительности» (так ее стали называть позднее, для отличия от «общей теории относительности», которая будет создана для описания гравитационных явлений). Другая, эквивалентная формулировка этого принципа гласит: все физические явления (не только механические) при одинаковых условиях протекают одинаково в любых инерциальных системах отсчета. Это значило: не только механические, но и оптические эксперименты, производимые внутри изолированной лаборатории, не могут установить, находится ли эта лаборатория в покое или движется равномерно и прямолинейно.

«Принцип относительности Эйнштейна» — это первый из двух основных постулатов частной теории относительности. Он выражал чисто умозрительное требование: теория должна быть ковариантной — не изменяющей вида своих законов — относительно определенной группы преобразований системы отсчета.

Этим требованием выражалось, что вместо одной привилегированной системы отсчета существует целый привилегированный класс систем отсчета — именно, инерциальных, так что результаты теории не зависят от преобразования одной из них в любую другую.

Второй основной постулат частной теории относительности гласил: скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета — 1) не зависит от направления, 2) постоянна по абсолютной величине.

Преобразования Лоренца. Первым шагом построения теории было: найти преобразования координат от одной инерциальной системы к другой, соответствующие новому принципу относительности, — преобразования, относительно которых новая теория должна быть ковариантной.

Ясно, что эти преобразования не могут теперь совпадать с преобразованиями Галилея (??), которые можно записать также в виде

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t, \quad (21.1)$$

т. е. как преобразования от покоящейся системы S к движущейся S' . Эти преобразования отвечают принципу относительности Галилея, которому теория электромагнитных явлений не удовлетворяет. Из этих преобразований следует классический закон сложения скоростей, которому не подчиняется свет. При выводе из этих формул закона сложения скоростей используются некоторые постулаты о свойствах пространства и времени:

1. время течет одинаково в обеих системах отсчета: $t' = t$;
2. длины отрезков между двумя точками с координатами x_1 и x_2 одинаковы в обеих системах отсчета: $\Delta x' = \Delta x$.

Это — выражения ньютоновских постулатов об абсолютности пространства и времени. От них теперь требовалось отказаться, чтобы распространение света удовлетворяло новому принципу относительности.

Для получения новых формул преобразования целесообразно ввести *пространство событий* — 4-мерное пространство, точки

которого («мировые точки» или «события») обозначаются четырьмя координатами (x, y, z, t) , где координаты x, y, z — это пространственные координаты события, а t — это определяемый по некоторым часам момент времени, в который произошло событие. Пусть одно и то же событие, например, вспышка света, в системе S имеет координаты x, y, z, t а в системе S' — координаты x', y', z', t' . Требуется найти формулы, связывающие 4 координаты события в S с 4 координатами этого же события в S' .

С помощью таких обозначений можно математически выразить тот факт, что скорость света инвариантна (одинакова в S и в S'). Для этого рассмотрим с точки зрения систем S и S' два события 1 и 2: отправления сигнала света из одной мировой точки (x_1, y_1, z_1, t_1) в другую (x_2, y_2, z_2, t_2) с точки зрения системы S и те же два события с координатами (x'_1, y'_1, z'_1, t'_1) и (x'_2, y'_2, z'_2, t'_2) с точки зрения системы S' . В системе S пройденное светом расстояние есть $c(t_2 - t_1)$, но то же самое расстояние равно также $[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2}$. Получаем зависимость между координатами обоих событий в системе S :

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 = 0. \quad (21.2)$$

Так как скорость света c в системах S и S' одна и та же, в системе S' зависимость между координатами событий будет той же самой:

$$(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2 - c^2(t'_2 - t'_1)^2 = 0. \quad (21.3)$$

Обозначим для краткости:

$$t_2 - t_1 = t_{12}, x_2 - x_1 = x_{12}, \quad (21.4)$$

$$y_2 - y_1 = y_{12}, z_2 - z_1 = z_{12}, \quad (21.5)$$

$$x_{12}^2 + y_{12}^2 + z_{12}^2 = l_{12}^2. \quad (21.6)$$

Тогда оба равенства выразятся соответственно в виде

$$(s_{12})^2 \equiv c^2(t_{12})^2 - (l_{12})^2 = 0; \quad (21.7)$$

$$(s'_{12})^2 \equiv c^2(t'_{12})^2 - (l'_{12})^2 = 0. \quad (21.8)$$

Величина s_{12} носит название *интервала* между событиями 1 и 2. Как видим, из равенства нулю интервала между событиями

в системе S следует и равенство его нулю в системе S' и наоборот. Но оба постулата теории обеспечивают большее: $(s_{12})^2 = (s'_{12})^2$, т. е. интервал между любыми событиями в любых двух инерциальных системах отсчета один и тот же, т. е. он является *инвариантом преобразования* от одной из этих систем отсчета к другой.

Мы видим, что интервал — расстояние между двумя точками в пространстве событий — определяется в нарушение теоремы Пифагора: квадрат расстояния не является суммой квадратов разностей координат. Это значит, что геометрия пространства событий не является геометрией евклидова пространства E_4 .

Пространство 4 измерений, в котором введены координаты точек x^0, x^1, x^2, x^3 и в котором квадрат радиуса-вектора x точки выражается в виде $\vec{x}^2 = (x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2$, называется *псевдоевклидовым пространством* E_4^2 (верхний индекс 2 означает разность между числом минусов и числом плюсов в этой скалярной сумме).

Если мы условимся изображать любое событие $M(t, x, y, z)$ точкой $M(x^0, x^1, x^2, x^3)$ в псевдоевклидовом пространстве E_4^2 , так что $x^0 = ct, x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z$, то пространство событий взаимнооднозначно отобразится на пространство E_4^2 и воспримет его геометрию. Сравним геометрию этого пространства с обычной трехмерной евклидовой геометрией. В евклидовом пространстве E_3 существует базис из трех единичных векторов $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$, которому отвечает квадрат вектора $\vec{x}^2 = (x^1)^2 + (x^2)^2 + (x^3)^2$. В пространстве E_4^2 имеются четыре базисных вектора $\vec{e}_\alpha, \alpha = 0, 1, 2, 3$, причем $\vec{e}_0^2 = 1, \vec{e}_1^2 = \vec{e}_2^2 = \vec{e}_3^2 = -1$, так что лишь один из них (\vec{e}_0) — вектор единичной длины, а три другие имеют длину, равную мнимой единице. Отсюда следует, что квадраты длин векторов (т. е. квадраты интервалов между различными мировыми точками) в E_4^2 могут быть не только положительными, но и нулевыми, и отрицательными. В евклидовом же пространстве они могут быть только положительными. В этом состоит принципиальное отличие псевдоевклидова пространства от евклидова.

Пространство E_4^2 делится на две части мировым конусом, расстояния между любыми двумя точками которого равны ну-

лю ($s_{12}^2 = 0$). Он называется световым конусом: его образующие — траектории лучей света. Расстояния между любыми двумя точками, лежащими внутри конуса, — только вещественные, ($s_{12}^2 > 0$). Наоборот, расстояния между точками, лежащими вне светового конуса — только мнимые ($s_{12}^2 < 0$).

Теперь можно получить искомые преобразования координат точек пространства событий при переходе от одной инерциальной системы отсчета S к другой S' . Сам переход от системы S к системе S' отвечает переходу от одного базисного репера пространства E_4^2 , \vec{e}_α , к другому, \vec{e}'_α , иными словами, повороту первого репера относительно второго. Сам же этот «поворот» в пространстве E_4^2 изображается иначе, чем поворот в пространстве E_4 на некоторый угол.

Для простоты ограничимся двумерной моделью пространств E_4^2 и E_4 , заменив их, соответственно, псевдоевклидовой плоскостью E_2^0 и евклидовой плоскостью E_2 . В плоскости E_2^0 выберем в качестве репера векторы \vec{e}_0 и \vec{e}_1 , которым отвечают координаты x^0 и x^1 . Соответствующие координаты в плоскости E_2 , отвечающие базисным векторам \vec{e}_1 и \vec{e}_2 , будут x^1 и x^2 (мнимое единичного орта \vec{e}_0 в ней нет). Поворот базисного репера в E_2 (значит, и соответствующее преобразование координат от x^1, x^2 к x'^1, x'^2) оставляет инвариантным квадрат расстояния между двумя точками:

$$(x^1)^2 + (x^2)^2 = (x'^1)^2 + (x'^2)^2. \quad (21.9)$$

Поворот же репера в плоскости E_2^0 оставляет инвариантным интервал:

$$(x^0)^2 - (x^1)^2 = (x'^0)^2 - (x'^1)^2, \quad (21.10)$$

и потому соответствующие формулы преобразования координат будут другими. А именно, они имеют следующий однозначно определенный вид:

$$x^0 = \frac{x'^1(v/c) + x'^0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad x^1 = \frac{x'^1 + x'^0(v/c)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Коэффициенты преобразования, как видим, зависят от скорости v движения системы отсчета S' относительно S , и это не

случайно. Это обстоятельство выражает тот факт, что угол поворота ортов в псевдоевклидовой плоскости зависит от скорости v : так, при $v \rightarrow c$ орты \vec{e}'_0 и \vec{e}'_1 сближаются друг с другом, стремясь к световому конусу.

Переходя к обычным обозначениям координат событий (t, x, y, z) , приводим полученные формулы к виду

$$t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad y = y'; \quad z = z' \quad (21.11)$$

(здесь выписаны формулы преобразования всех четырех координат, в предположении, что движение системы S' происходит в направлении оси x системы S , так что координаты y и z не изменяются).

Данные формулы выражают переход от координат системы S' к системе S . Обратные формулы, выражающие зависимость координат мировой точки в системе S' от ее координат в системе S , получаются из них простой заменой v на $-v$ ($-v$ — это скорость движения системы S относительно S'). Они примут вид

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad y' = y; \quad z' = z. \quad (21.12)$$

Так как величина, стоящая под корнем, не может быть отрицательной, из этих формул следует: $1 - v^2/c^2 > 0$, т. е. $v^2/c^2 < 1$, или $|v| < c$. Это значит, что скорость одной инерциальной системы отсчета по отношению к другой всегда меньше скорости c света в вакууме. Так как с каждым материальным телом можно связать систему отсчета, то никакие два тела не могут иметь относительную скорость, большую или хотя бы равную c . Это относится и к любому типу сигнала, кроме электромагнитного: только для последнего скорость распространения равна c (и, как мы знаем, одинакова для любых систем отсчета).

Полученные формулы называются *формулами преобразований Лоренца*. Они выражают принцип относительности Эйнштейна: все законы природы выражаются относительно этих преобразований ковариантным образом. А так как этот прин-

цип является расширением принципа относительности Галилея на случай электромагнитных явлений, то, очевидно, преобразования Галилея должны получаться из преобразований Лоренца как некоторый предельный случай. Сравнивая преобразования Галилея

$$t' = t ; \quad x' = x - vt ; \quad y' = y ; \quad z' = z \quad (21.13)$$

с преобразованиями Лоренца (21.12), видим, что вторые переходят в первые при $v/c \ll 1$, т. е. при скоростях значительно меньших, чем скорость света. Вот почему при достаточно малых скоростях механика Ньютона описывает движение тел со всей практически необходимой точностью.

Глава 22

Элементы релятивистской кинематики

▼

Сокращение продольных размеров движущихся тел.

Пусть на оси OX' в системе S' покоится стержень длины $l' = x'_2 - x'_1$, где x'_1 и x'_2 — фиксированные в S' абсциссы его концов. Чтобы измерить его длину в системе S , надо зафиксировать положение его концов x_1 и x_2 в один и тот же момент времени t по часам системы S . В соответствии с формулами Лоренца (21.12), координаты x'_1 , x'_2 связаны с x_1 , x_2 и временем t соотношениями

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Вычитая почленно из второго равенства первое и учитывая, что момент t в обоих выражениях один и тот же, получаем:

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (22.1)$$

или, заменяя $x_2 - x_1$ на l , а $x'_2 - x'_1$ на l' , находим соотношение

$$l = l' \sqrt{1 - (v/c)^2}. \quad (22.2)$$

Это значит, что стержень, имеющий длину l' в системе отсчета S' , в которой он покоится, имеет длину l , *меньшую* в $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ в системе S , относительно которой он движется в продольном направлении со скоростью v . Этот эффект называют *лоренцевым сокращением* движущихся тел.

Следует четко представлять себе, что лоренцево сокращение — эффект чисто кинематический. Он не связан с действием на движущее тело каких-либо продольных сил, сжимающих его в направлении движения. Этот эффект — следствие изменения геометрии трехмерного пространства, вызываемого движением системы отсчета.

Отставание движущихся часов. Возьмем в системе S' два события, происшедшие в одной фиксированной точке x', y', z' , но в разное время — в моменты t'_1 и t'_2 по часам системы S' . В системе S им отвечают значения времени t_1 и t_2 , определяемые формулами Лоренца (21.11):

$$t_1 = \frac{t'_1 + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad t_2 = \frac{t'_2 + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (22.3)$$

Вычитая из второго выражения первое и обозначив промежуток времени $t_2 - t_1 = \Delta t$, $t'_2 - t'_1 = \Delta t'$, получим:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (22.4)$$

или

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - (v/c)^2}. \quad (22.5)$$

Пусть система отсчета S' связана с некоторым объектом (телом), движущимся относительно системы S . Время $\Delta t'$, измеряемое по часам, движущимся вместе с данным объектом, называется собственным временем этого объекта и обозначается τ : $\tau = \Delta t'$. Соответствующий промежуток времени в системе S есть Δt , и можно переписать полученную формулу в виде

$$\tau = \Delta t \sqrt{1 - (v/c)^2}. \quad (22.6)$$

Она выражает релятивистский эффект: собственное время движущегося объекта всегда меньше соответствующего промежутка времени, измеренного в неподвижной системе отсчета.

По этой формуле можно рассчитать, например, что если путешественник отправляется к звезде, отстоящей от Земли на расстояние 21 световой год, на космическом корабле, движущемся со скоростью $v = 0,99 c$, то (не считая времени на ускорение корабля) он вернется домой спустя 42 года, в то время как по его собственным часам пройдет всего 6 лет. Действительно, собственное время τ путешественника будет равно 6 годам, тогда как по земным часам его брата-близнеца, оставшегося на Земле, пройдет время Δt , равное 42 годам; т. е. его брат, встретив его

после путешествия, обнаружит себя постаревшим по сравнению с братом-путешественником на 36 лет.

Это означает, что все физические процессы в движущейся системе отсчета протекают медленнее, чем в неподвижной (включая атомные процессы и даже биологический ритм жизни). В противном случае нарушился бы принцип относительности — путешественник имел бы возможность производить измерения, обнаруживающие факт движения корабля. Так, если бы космонавт во время путешествия старел бы так же быстро, как его брат-близнец на Земле, то он смог бы убедиться в этом, просто наблюдая себя в зеркало. Его брат должен постареть на 42 года — эффект, легко устанавливаемый наблюдением. Между тем эффект старения за 6 лет можно было бы не уловить вовсе.

Относительность одновременности и последовательности событий. Пусть из точки A на оси OX в системе S испускаются световые сигналы в противоположных направлениях. Они достигнут равноудаленных точек B и C в один и тот же момент времени: $t_1 = t_2$. Будут ли эти два события — прием сигналов B и C — одновременны с точки зрения системы S' ? Записав выражения для моментов t'_1 и t'_2 этих событий, следующие из формул Лоренца, и учтя равенство $t_1 = t_2$, получаем:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{v(x_1 - x_2)}{c^2 \sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (22.7)$$

Пусть абсцисса точки B меньше, чем у точки C : $x_1 < x_2$. Тогда $t'_2 - t'_1 < 0$, или $t'_2 < t'_1$: в точку C сигнал придет ранее, чем в B .

Это — неизбежное следствие отказа от ньютоновского абсолютного времени. События, одновременные в одной системе отсчета, неодновременны в другой. Можно даже показать, что при переходе в другую систему отсчета нарушается и последовательность событий: если в системе S некое событие A происходит ранее события B (т. е. $t_1 < t_2$), то может случиться, что в системе S' последовательность событий изменится, и A произойдет позже B ($t'_2 < t'_1$).

Чтобы продемонстрировать это, получим предыдущую формулу в более общем виде, т. е. не предполагая, что два события (A и B), например, две вспышки света в разных точках, произошли в одно и то же время в системе S . Итак, при $t_1 \neq t_2$ мы получим:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) + (v/c^2)(x_1 - x_2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (22.8)$$

Из этой формулы видно, что если $x_1 < x_2$ и $t_1 < t_2$, то при достаточно малом $t_2 - t_1$ числитель в правой части может стать отрицательным; и, следовательно, будет $t'_2 - t'_1 < 0$, т. е. $t'_2 < t'_1$.

На первый взгляд это кажется абсурдом. Событие A , наступившее в системе S ранее события B ($t_1 < t_2$), могло явиться причиной события B . Если в системе S' последовательность этих событий изменится, то не значит ли это, что в системе S' следствие предшествует причине?(!)

Покажем, что нарушение последовательности событий никогда не приводит к нарушению закона причинности: не может получиться так, что если в S событие A является причиной события B , то в S' причина и следствие поменяются местами. Одновременность относительна лишь для событий, происходящих в разных точках пространства: в этом случае одно событие (A) может служить причиной другого (B) лишь при том условии, что некий сигнал (возмущение), вызванный событием A , пришел к месту совершения события B не позже, чем в момент его совершения. Итак, следует показать, что если одно событие способно служить причиной другого, то последовательность таких событий одинакова в любых инерциальных системах отсчета.

Рассмотрим случай, когда событие $A(t_1, x_1, y_1, z_1)$ является причиной события $B(t_2, x_2, y_2, z_2)$. Перепишем нашу последнюю формулу в виде

$$t'_{12} = \frac{t_{12} - (v/c^2)l_{12}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (22.9)$$

и заметим, что интервал Δs_{12} между событиями должен быть вещественным: $\Delta s_{12}^2 \geq 0$. Это следует из того, что ни один сигнал (от A к B) не может распространяться со скоростью, превыша-

ющей скорость c : если u — скорость сигнала, то $u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 \leq c^2$, или $dx^2 + dy^2 + dz^2 \leq c^2 dt^2$. В координатах псевдоевклидова пространства E_4^2 это можно записать так: $(dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2 \geq 0$, или $d\vec{x}^2 \geq 0$, т. е. касательный вектор $d\vec{x}$ к мировой линии сигнала (его траектории в E_4^2) вещественный. Тем самым и Δs_{12} вещественно: геометрически это означает, что вся мировая линия сигнала лежит внутри светового конуса события A (такие линии называются *временноподобными* линиями) или на самом световом конусе (такие линии называются *светоподобными*). Но из $\Delta s_{12}^2 \geq 0$ следует: $c^2 t_{12}^2 \geq l_{12}^2$, или $t_{12} \geq (1/c)l_{12}$. Но тогда и подавно $t_{12} \geq (v/c^2)l_{12}$, так как $v/c \leq 1$; а это означает, что числитель дроби, выражающей t'_{12} , не может быть отрицательным: $t'_{12} \geq 0$, или $t'_1 \leq t'_2$. Как видим, не может случиться $t'_1 > t'_2$ — не может произойти обращения последовательности событий, что нам и требовалось доказать.

Если же события A и B не могут причинно влиять одно на другое, то интервал между ними мнимый (*пространственноподобный*): $ds_{12}^2 < 0$. Из тех же рассуждений следует, что в этом случае всегда возможно обращение последовательности этих событий за счет перехода в другую инерциальную систему отсчета. Однако это не приводит к каким-либо причинным парадоксам ввиду отсутствия какой-либо причинной взаимосвязи между событиями.

Таким образом, частная теория относительности полностью согласуется с принципом причинности. Между тем старая (ньютоновская) формулировка причинности, не согласующаяся с фактом конечного предела распространения всякого рода возмущений, приводила к неразрешимым причинным парадоксом. Метафизические постулаты ньютоновой физики (в данном случае постулат мгновенного дальнего действия) приводили к нарушениям принципа естественной причинности. Метафизика ньютоновой физики требовала, вообще говоря, новой причинности, метафизической. Естественная причинность в ней не исключалась, но переставала быть необходимой.

Релятивистская формула сложения скоростей. Классическая формула сложения скоростей гласит: скорость тела \vec{u} по отношению к покоящейся системе отсчета S («абсолютная скорость») равна векторной сумме скорости \vec{v} движения системы S' по отношению к S («переносная скорость») и скорости \vec{w} тела по отношению к системе S' («относительная скорость»). Итак, $\vec{u} = \vec{v} + \vec{w}$.

Ясно, что в релятивистской кинематике эта формула выполняться не может: при достаточно больших значениях скоростей v и w , приближающихся к скорости света c , их сумма (в случае их одинакового направления), в силу классического закона сложения скоростей, превзойдет c , чего релятивистская механика не допускает.

Пусть тело движется в том же направлении, что и система S' . Тогда векторную формулу сложения скоростей можно заменить скалярной, и в классической механике она будет иметь вид $u = v + w$. Какая формула должна придти ей на смену в теории относительности?

Простое дифференцирование формул Лоренца для координат точки по времени дает результат в виде:

$$u = \frac{v + w}{1 + vw/c^2} . \quad (22.10)$$

Когда обе скорости v и w малы по сравнению со скоростью c , знаменатель дроби в полученном выражении практически равен единице, и мы возвращаемся к формуле сложения скоростей классической механики. Зато если хоть одна из слагаемых скоростей близка к скорости света, то знаменатель существенно больше единицы — результирующая скорость растет значительно меньше u , в частности, никогда не может превзойти скорость света c . Это особенно ясно видно, если взять предельный случай: система S' движется относительно S со скоростью света $v = c$. Тогда

$$u = \frac{c + w}{1 + cw/c^2} = c , \quad (22.11)$$

т. е. в случае, если одна из слагаемых скоростей равна c , то добавление к ней любой другой скорости ее не меняет. Иначе и не

может быть — иначе нарушился бы принцип постоянства скорости света относительно всех инерциальных систем. Новая формула сложения скоростей есть выражение этого принципа.

Этот факт объяснял, почему невозможно обнаружить движение Земли относительно эфира: скорость света, одинаковая во всех инерциальных системах отсчета, «не складывалась» со скоростью движения Земли, как это должно было быть, если бы тела двигались по отношению к эфиру с некоторой конечной скоростью. Неподвижный эфир оказался лишенным признаков существования. Это была даже не метафизика, а просто химера.

Элементы релятивистской динамики



Проблема импульса. Мы изложили основные результаты релятивистской кинематики, которые необходимы для понимания принципов эйнштейновой теории тяготения. Не менее важны для понимания этих принципов также некоторые выводы релятивистской динамики.

Мы уже говорили о трудностях определения понятия силы в рамках классической механики. Нельзя ли обойтись без силы?

«Сила», действующая на частицу A , проявляет себя в изменении скорости, а это изменение скорости обусловлено ее взаимодействием с некоторой другой, удаленной частицей (телом) B . Сила, таким образом, есть форма *взаимодействия* частиц A и B : если присутствие частицы B вызывает изменение скорости A , то и присутствие A изменяет скорость B . Когда взаимодействие прекращается (частицы удаляются друг от друга), мы обнаруживаем, что происшедшее изменение *импульса* одной частицы равно по величине и противоположно по направлению изменению импульса другой: общий импульс системы из двух частиц не изменился.

Что мы понимаем под «импульсом»? Ньютон, называвший его ныне устаревшим термином «количество движения», определял его как $\vec{p} = m\vec{v}$:

$$\text{импульс} = \text{масса} \times \text{скорость} . \quad (23.1)$$

Так определенный импульс хорош вследствие своего замечательного свойства: общий импульс системы частиц не изменяется, если на систему не действуют никакие внешние силы. Иными словами, импульс в ньютоновой механике (а это значит: при движении тел с нерелятивистскими скоростями) не изменяется от

их взаимных (упругих) столкновений. В результате соударения частиц импульс каждой из них изменяется: импульс одной частицы передается другим членам системы. Но импульс системы в целом сохраняется во времени, если система изолирована (замкнута), т. е. на нее не действуют силы извне и не происходит утечки энергии системы, например, в виде тепла (отчего мы и рассматриваем только упругие соударения).

Что произойдет с импульсом системы материальных точек при переходе в систему отсчета, движущуюся относительно данной? Мы сейчас увидим, что с точки зрения наблюдателя, связанного с движущейся системой отсчета, общий импульс системы станет другим, но тоже будет оставаться постоянным.

Пусть две точки масс m_1 и m_2 имеют скорости w_1 и w_2 относительно системы отсчета S' , движущейся относительно системы отсчета S с постоянной скоростью v (как и прежде, движение точек считаем направленным по движению S' относительно S , так что сложение векторов импульсов можно рассматривать как обычное арифметическое сложение). Тогда для наблюдателя в S' импульс системы из двух точек будет равен $m_1 w_1 + m_2 w_2 = d$. В системе S , в силу классического закона сложения скоростей, $u = v + w$, так что полный импульс будет равен $m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 (v + w_1) + m_2 (v + w_2)$, а это можно записать в виде $vb + d$, где $b = m_1 + m_2$ — полная масса системы. Как видим, для наблюдателя в системе S величина импульса иная: не d , а $vb + d$. Но она тоже сохраняется во времени, поскольку массы тел m_1 и m_2 — это ньютоновы абсолюты, не зависящие от движения тел.

Картина, однако, принципиально изменится, если наблюдатель в S основывает свои наблюдения на законах релятивистской механики. Тогда он будет утверждать, что скорости тел равны

$$u_1 = \frac{v + w_1}{1 + vw_1/c^2}, \quad u_2 = \frac{v + w_2}{1 + vw_2/c^2}, \quad (23.2)$$

а соответствующий импульс системы тел $m_1 u_1 + m_2 u_2$, как легко рассчитать, не может быть записан только с помощью постоянных величин v , b и d .

Это значит: при тех условиях, при которых для наблюдателя в S' полный импульс системы тел все время остается постоянным, наблюдатель в S обнаружит изменение полного импульса со временем. Для него закон сохранения импульса не будет иметь места. Закон сохранения импульса лишается инвариантного смысла, а тем самым и статуса физического закона.

Какой мог быть выход из этого положения? Один из двух: отказаться либо от ньютоновского определения импульса, либо от закона сохранения этой величины.

Отказ от сохранения импульса лишил бы механику одного из основных ее законов. Стоило ли идти на эту жертву? Она оказывается ненужной, если принять иное, неньютоновское определение импульса, такое, при котором импульс сохранялся бы в любой инерциальной системе отсчета. Это оказалось возможным благодаря новой концепции массы, введенной Эйнштейном.

Новая концепция массы. Поскольку ньютоновский импульс при релятивистских скоростях не сохраняется, ньютоновское абсолютное понятие массы, не зависящей от движения тела, нуждается в радикальном пересмотре. Масса тела — его «мера инертности» — не абсолютна: она должна зависеть от скорости движения тела. Масса как абсолют не имеет смысла: поэтому у Ньютона она лишь коэффициент, неопределенная величина, которую удобно вводить в уравнение движения.

Новая, релятивистская концепция массы естественно порождается новой, эйнштейновской концепцией времени: относительностью времени t .

Пусть некий объект движется относительно «покоящейся» системы S с постоянной скоростью v . Связав с движущимся объектом систему отсчета S' , мы можем записать уже известную нам формулу для бесконечно малых промежутков времени в S и S' :

$$d\tau = dt\sqrt{1 - (v/c)^2}. \quad (23.3)$$

Здесь $d\tau$ — собственное время объекта, dt — время в покоящейся системе S («лабораторное время»). Легко понять, что $d\tau$,

как наименьший промежуток времени протекания физического процесса, есть инвариант преобразования координат: для любой инерциальной системы отсчета $d\tau$ одно и то же. То же самое можно сказать про массу m_0 объекта в системе S' , относительно которой он покоится. Не предпреляя пока вопрос, какова будет масса m того же объекта с точки зрения лабораторной системы отсчета S , мы можем считать его *массу покоя* m_0 инвариантом.

Тогда, очевидно, для удовлетворительного определения импульса его следует выражать через инвариантные величины — не через m и dt , а через m_0 и $d\tau$:

$$p = m_0 \frac{dx}{d\tau} = m_0 \frac{dx}{dt} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (23.4)$$

(здесь dx/dt , очевидно, есть скорость v относительного движения S и S'). Так определенное выражение будем называть *релятивистским импульсом*, в отличие от классического (ньютоновского) импульса.

Мы видим, что можно даже сохранить прежнее формальное определение импульса объекта, имеющего в лабораторной системе массу m и скорость v : $p = mv$, если только за массу движущегося объекта m принять новое выражение:

$$m_{\text{движения}} = \frac{m_{\text{покоя}}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (23.5)$$

Определив импульс через *массу движения*, мы одновременно получаем зависимость между массой тела m в состоянии движения и его массой m_0 в состоянии покоя:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (23.6)$$

где v — скорость движения тела. Это выражение для массы, справедливое уже для любых скоростей тела, называется *релятивистской массой*.

Легко показать, что определенный выше релятивистский импульс будет сохраняться при любых, в том числе релятивистских скоростях движения тел. Обозначим, как прежде, полную массу

(уже релятивистскую) системы из двух тел, движущихся относительно системы S' со скоростями w_1 и w_2 , через b :

$$\frac{m_{01}}{\sqrt{1 - w_1^2/c^2}} + \frac{m_{02}}{\sqrt{1 - w_2^2/c^2}} = b, \quad (23.7)$$

а их полный импульс (релятивистский) через d :

$$\frac{m_{01}w_1}{\sqrt{1 - w_1^2/c^2}} + \frac{m_{02}w_2}{\sqrt{1 - w_2^2/c^2}} = d. \quad (23.8)$$

Пусть величины b и d сохраняются в отсутствие внешних сил. Переходя в систему S , мы будем в ней иметь, вместо w_1 и w_2 , скорости тел в виде u_1 и u_2 , приведенные выше и записанные в соответствии с релятивистской формулой сложения скоростей. Прделав элементарные преобразования, можно убедиться, что в системе S полный релятивистский импульс $m_1u_1 + m_2u_2$ выразится в виде

$$\frac{vb + d}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (23.9)$$

Отсюда следует его сохранение в системе S , так как он выражается через постоянные v , b и d .

Соотношение между массой и энергией. Если в ньютоновской механике масса тела всегда является его инвариантной характеристикой, то в релятивистской механике такая роль отводится его *массе покоя* m_0 — «собственной массе» тела: она неизменна для данного тела — одна и та же в любой системе отсчета.

Если скорость тела v мала по сравнению со скоростью света c ($v/c \ll 1$), то его релятивистская масса $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ приближенно, с точностью до малых высших порядков относительно v/c , может быть записано как $m_0(1 + v^2/2c^2)$. Следовательно, для наблюдателя в S релятивистская масса тела $m \approx m_0 + \frac{1}{2}m_0v^2/c^2$, т. е. равна сумме собственной массы тела и величины, пропорциональной его кинетической энергии.

Как видно из этого выражения, факт увеличения массы тела m со скоростью эквивалентен тому, что увеличение кинетической энергии тела проявляется в увеличении его массы. Это

приводит нас к новому и неожиданному заключению, невозможному в классической механике: увеличение энергии тела приводит к увеличению его массы, и наоборот. Масса тела оказывается связанной с его полной энергией. Каким соотношением описывается эта связь?

Чтобы определить соотношение между релятивистской массой тела и его энергией, вернемся в 4-мерное пространство событий, описываемое геометрией псевдоевклидова пространства E_4^2 . Траектория движения материальной точки описывается в нем временноподобной мировой линией, т. е. линией, проходящей внутри светового конуса наблюдателя. Пусть \vec{x} — радиус-вектор движущейся точки. Тогда $d\vec{x}/dt$ есть вектор \vec{u} ее скорости, направленный всегда по касательной к ее траектории. Вектор \vec{u} — это вектор 4-мерного пространства: «4-вектор» скорости точки. Очевидно, $\vec{u} = d\vec{x}/dt = (d\vec{x}/ds)(ds/dt)$, где ds есть элемент дуги траектории — кривой в E_4^2 (это — элемент временноподобного интервала между двумя бесконечно близкими ее точками). Как видим, скорость \vec{u} точки пропорциональна вектору $\vec{\sigma} = d\vec{x}/ds$, который в любом положении точки на траектории направлен по касательной к ней и всюду имеет единичную длину: $|\vec{\sigma}| = 1$. Последнее следует из того, что модуль вектора $d\vec{x}$ — это расстояние между двумя бесконечно близкими точками траектории, а это расстояние есть элемент ds интервала между этими точками: $|d\vec{x}| = ds$, откуда и получается: $|\vec{\sigma}| = |d\vec{x}|/ds = 1$.

Так как $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$, а $cdt = dx^0$, то в некоторой выбранной инерциальной системе отсчета находим:

$$\sigma^0 = \frac{dx^0}{ds} = \frac{cdt}{\sqrt{c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2}}. \quad (23.10)$$

Деля числитель и знаменатель на cdt , получим:

$$\sigma^0 = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \quad (23.11)$$

где через u обозначен модуль трехмерного вектора скорости точки: $u^2 = u_x^2 + u_y^2 + u_z^2$, причем u_x, u_y, u_z — проекции этого вектора на оси пространственных координат выбранной нами системы ($u_x = dx/dt, u_y = dy/dt, u_z = dz/dt$).

Аналогично получаются три другие компоненты 4-вектора $\vec{\sigma}$ в той же системе отсчета:

$$\sigma^1 = \frac{dx^1}{ds} = \frac{dx}{ds} = \frac{1}{c} \frac{dx/dt}{\sqrt{1 - \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}} = \frac{u_x}{c\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \quad (23.12)$$

$$\sigma^2 = \frac{u_y}{c\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \quad \sigma^3 = \frac{u_z}{c\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (23.13)$$

Построим теперь в каждой точке 4-мерной траектории движущейся частицы касательный к ней 4-вектор

$$\vec{S} = m_0 c^2 \vec{\sigma}. \quad (23.14)$$

Он имеет постоянную длину $|\vec{S}| = E_0 = m_0 c^2$ (так как $|\vec{\sigma}| = 1$) и является инвариантным геометрическим объектом в пространстве событий, т. е. не зависит от выбора системы отсчета. Это объясняется тем, что значение m_0 — инвариант преобразований инерциальных систем отсчета. Для расчета компонент 4-вектора $S^\alpha = m_0 c^2 \sigma^\alpha$, $\alpha = 0, 1, 2, 3$, используем найденные выше значения компонент σ^α . Выбрав опять произвольную инерциальную систему отсчета, получаем в ней компоненты S^α :

$$\begin{aligned} S^0 &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, & S^1 &= \frac{m_0 u_x c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \\ S^2 &= \frac{m_0 u_y c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, & S^3 &= \frac{m_0 u_z c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \end{aligned} \quad (23.15)$$

Здесь компоненты S^α выражены через собственную массу точки m_0 (совпадающую с нерелятивистской, или ньютоновской ее массой). Мы помним связь собственной массы m_0 с релятивистской массой m : $m = m_0 / \sqrt{1 - u^2/c^2}$; выразим эти компоненты через m :

$$S^0 = mc^2, \quad S^1 = m u_x c, \quad S^2 = m u_y c, \quad S^3 = m u_z c. \quad (23.16)$$

Три последние (их называют пространственными) составляющие 4-вектора \vec{S} представляют собой помноженные на c составляющие релятивистского импульса $\vec{p} = m\vec{u}$ точки, движущейся

относительно выбранной инерциальной системы отсчета со скоростью \vec{u} . А что представляет собой первая (ее называют временной) составляющая S^0 ? Она имеет смысл *релятивистской энергии* материальной точки и обозначается E :

$$E = mc^2 . \quad (23.17)$$

Почему временную компоненту 4-вектора \vec{S} можно назвать энергией? Прежде всего, компонента S^0 имеет ту же размерность, что и, скажем, ньютоновская кинетическая энергия, и выражается в эргах или джоулях. Но главная причина состоит в том, что полная величина этой компоненты для любой замкнутой системы материальных точек в любой заданной системе отсчета имеет постоянное во времени значение — сохраняется при любых упругих столкновениях точек. Доказательство того, что сумма значений E для всех точек системы подчиняется закону сохранения, основано на простом геометрическом соображении: если три компоненты какого-либо 4-вектора сохраняются во всех системах отсчета, то четвертая компонента тоже должна сохраняться. Три (пространственные) компоненты вектора \vec{S} образуют, с точностью до множителя c , трехмерный вектор полного релятивистского импульса физической системы, а он, как мы знаем, сохраняется во времени в любой выбранной системе отсчета. Тогда и полная временная компонента \vec{S} тоже сохраняется.

Вектор энергии-импульса. Этим оправдано название для вектора \vec{S} : *4-вектор энергии-импульса* материальной точки. Его компоненты, вычисленные в одной конкретно выбранной инерциальной системе отсчета, определяют релятивистскую энергию и три составляющих релятивистского импульса этой точки относительно этой системы отсчета. Таким образом, энергия и импульс изображаются единым инвариантным 4-вектором: разложение его на энергию и составляющие импульса происходит лишь по отношению к выбранной системе отсчета.

Запишем в выбранной системе отсчета инвариантное свойство вектора \vec{S} — квадрат этого вектора есть константа:

$$\vec{S}^2 = E_0^2 \vec{\sigma}^2 = (m_0 c^2)^2 . \quad (23.18)$$

С другой стороны, в геометрии пространства событий квадрат этого 4-вектора записывается в виде

$$\vec{S}^2 = (S^0)^2 - (S^1)^2 - (S^2)^2 - (S^3)^2 . \quad (23.19)$$

Приравнявая эти два выражения и используя найденный вид компонент S^α , получаем:

$$m^2 c^4 - m^2 c^2 (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) = m_0^2 c^4 , \quad (23.20)$$

или

$$m^2 c^4 - m^2 c^2 u^2 = m_0^2 c^4 , \quad (23.21)$$

что дает формулу, связывающую две релятивистские величины — релятивистскую энергию $E = mc^2$ и релятивистский импульс $p = mu$:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 . \quad (23.22)$$

В силу принципа относительности Эйнштейна, релятивистская динамика точки строится одинаково в каждой инерциальной системе отсчета. Это значит: зная энергию и импульс в некоторой инерциальной системе S , можно вычислить их значения в любой другой инерциальной системе S' . Так как энергия и импульс образуют в пространстве событий инвариантный 4-вектор, то при переходе к другой системе отсчета они преобразуются соответствующим образом — по общему правилу преобразования компонент вектора в псевдоевклидовом пространстве.

Равномерное движение одной инерциальной системы относительно другой отвечает, как мы знаем, повороту ортогонального репера \vec{e}_α , $\alpha = 0, 1, 2, 3$, на заданный угол: $\vec{e}_\alpha' = A_\alpha^\beta \vec{e}_\beta$, где по индексу β предполагается суммирование от 0 до 3, так что A_α^β представляет собой некоторую ортогональную числовую матрицу 4×4 . Этому повороту отвечает преобразование координат точек (следовательно, и векторов) в виде

$$x'^\alpha = A'^\alpha_\beta x^\beta , \quad (23.23)$$

где A'^α_β — матрица, обратная к A_α^β . Беря в качестве элементов этой матрицы коэффициенты преобразований Лоренца, получим закон преобразования компонент 4-вектора энергии-импульса:

$$S'^\alpha = A'^\alpha_\beta S^\beta . \quad (23.24)$$

В соответствии с этим законом преобразования, релятивистская энергия материальной точки в одной инерциальной системе отсчета зависит не только от энергии, но и от импульса этой точки в другой инерциальной системе отсчета. То же самое относится и к релятивистскому импульсу точки: он зависит не только от импульса, но и от энергии точки в другой системе отсчета. В этой неразрывной взаимосвязи релятивистских энергии и импульса состоит реальный физический смысл их объединения в один четырехмерный вектор. Релятивистские импульс и энергия — сами по себе не инварианты преобразований систем отсчета — оказываются частями единого, более обширного целого, уже инвариантного. Это вполне соответствует тому, что в теории относительности сами пространство и время — не абсолютны, но являются частями более обширного — и уже абсолютного — целого: пространства Минковского. В этом смысле теория относительности может быть названа теорией абсолютности: она возрождает абсолютность на ином уровне — на уровне четырехмерия (пространство + время = единое целое = абсолют).

Релятивистская и ньютоновская энергии. Какова взаимосвязь между релятивистской энергией E и энергией в ньютоновской теории? При $u/c \ll 1$ выражение для E :

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (23.25)$$

можно разложить в ряд по малому параметру $\gamma^2 = u^2/c^2$, воспользовавшись, например, формулой бинома:

$$\begin{aligned} E &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \gamma^2}} = m_0 c^2 (1 - \gamma^2)^{-1/2} = \\ &= m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \gamma^2 + \frac{3}{8} \gamma^4 + \dots \right). \end{aligned}$$

Пренебрегая, вследствие малости γ , третьим и следующими членами разложения, получим приближенное выражение для E :

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 u^2 = E_0 + T_{\text{ньют}}. \quad (23.26)$$

Второе слагаемое в правой части равенства есть не что иное, как ньютоновское выражение кинетической энергии T тела, движущегося со скоростью u . Но первое слагаемое $E_0 = m_0 c^2$ ньютонова механика не знает и не изучает. Оно называется *энергией покоя* материальной точки, имеющей массу покоя m_0 . (В механике Ньютона к кинетической энергии тела может добавляться лишь произвольная постоянная величина, не нарушающая закона движения тела и называемая потенциальной энергией). Между тем при малых скоростях движения тела E_0 на столько же порядков превышает T , насколько c^2 превышает u^2 . Так, при $u = 10$ м/с энергия покоя E_0 превышает кинетическую энергию T на 15 порядков! Как видим, релятивистская энергия точки содержит в себе ее кинетическую энергию, но не равна ей, а намного ее превышает — на энергию покоя E_0 . Будучи основной по величине, энергия E_0 не проявляет себя в механических взаимодействиях.

Отсюда видно, что ньютоновское выражение $\frac{1}{2}m_0 u^2$ дает лишь приближенное значение кинетической энергии (энергии движения) точки, удовлетворительное лишь для малых скоростей движения. При больших скоростях оно должно быть заменено релятивистским выражением

$$\begin{aligned} T = E - E_0 &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - m_0 c^2 = \\ &= m_0 c^2 \left[\left(1 - \frac{u^2}{c^2} \right)^{-1/2} - 1 \right], \end{aligned}$$

которое следует называть *релятивистской кинетической энергией*.

Это выражение кинетической энергии справедливо для частиц, движущихся с любыми скоростями. Напротив, если бы мы записали кинетическую энергию по ньютоновскому образцу $T = m u^2/2$, то эта формула была бы справедлива лишь для медленно движущихся частиц, для которых можно приближенно положить $m = m_0$.

Как видно из полученной формулы, релятивистская кинетическая энергия движения частицы безгранично возрастает

при стремлении скорости частицы к скорости света. Поэтому, даже если бы мы располагали неограниченными ресурсами энергии, мы никогда не смогли бы разогнать частицу до скорости света.

Релятивистская энергия механической системы. Формула $E = mc^2$ для релятивистской энергии позволяет дать новую, релятивистскую интерпретации массы частицы (материальной точки). Она показывает, что наличие у частицы энергии E означает наличие у нее массы E/c^2 , и наоборот, наличие массы m означает наличие энергии mc^2 . Таким образом, масса, которая в классической механике интерпретируется либо как мера инертности тела (второй закон Ньютона), либо как мера его гравитационного действия (закон всемирного тяготения), в релятивистской механике выступает в новой функции: это есть *мера энергосодержания* тела, независимо от его инертных или гравитационных свойств. В частности, любое тело обладает энергией даже в состоянии покоя: это его энергия покоя m_0c^2 . Универсальность взаимосвязи массы и энергии проявляется в том, что «энергосодержание» тела включает в себя любой вид энергии, заключенной в теле, в том числе, например, внутриядерной энергии, освобождающейся при ядерном взрыве (что и подтверждается при расчетах взрывов атомных бомб).

Хотя мы часто употребляли понятия «материальная точка» или «частица», но нигде не использовали ни точечных свойств тела, ни «элементарность» частицы. Поэтому формула для релятивистской энергии применима и к любому сложному телу, состоящему из многих частиц, причем под скоростью u мы понимаем скорость его движения как целого, а под его релятивистской массой — его массу как целого. И тогда очевидно, что релятивистская энергия тела — всегда положительная величина, непосредственно связанная с его массой. В этой связи можно заметить, что в классической механике положительной является только кинетическая энергия тела, тогда как полная (сохраняющаяся) энергия — кинетическая плюс потенциальная — может быть и отрицательной.

Пусть механическая система как целое покоится, и пусть M_0 — ее масса покоя. Если она состоит из свободно движущихся частиц, то ее релятивистская энергия равна сумме релятивистских энергий входящих в ее состав частиц. Совсем иную картину мы имеем в случае, когда частицы сложного тела (системы) взаимодействуют друг с другом. Тогда полная энергия $M_0 c^2$ сложного тела содержит, помимо энергии покоя входящих в его состав частиц, их кинетическую энергию (они могут двигаться внутри замкнутой системы), а также энергию их взаимодействия друг с другом (пример — энергия ядерного взаимодействия частиц, образующих ядро атома). Таким образом, энергия $M_0 c^2$ тела не равна сумме $\sum_k m_{0k} c^2$, где m_{0k} — масса покоя k -ой частицы тела. Отсюда прямо следует, что масса M_0 покоящегося тела не равна сумме масс покоя его составных частей: $M_0 \neq \sum_k m_{0k}$. Это означает, что в релятивистской динамике не выполняется закон сохранения массы. Это еще одно ее отличие от классической механики: масса сложного тела не равна сумме масс его частей. Вместе с тем релятивистская энергия замкнутой системы сохраняется, если принимать во внимание и энергию покоя системы. Если не учитывать во всех системах энергию покоя в составе полной энергии, то невозможно удовлетворить закону сохранения импульса и энергии во всех системах отсчета. Этот урок, преподнесенный нам релятивистской физикой, никак не предполагался в физике Ньютона.

Системы взаимодействующих частиц можно разделить на два типа: системы, которые могут самопроизвольно распадаться, и системы связанные, т. е. обладающие запасом прочности. Если система распадается, то ее релятивистская энергия частично переходит в кинетическую энергию освободившихся частиц; для этого, следовательно, необходимо $M_0 c^2 > \sum_k m_{0k} c^2$, или $M_0 > \sum_k m_{0k}$, — тело может самопроизвольно распадаться лишь на части, сумма масс покоя которых меньше массы покоя тела. Напротив, если $M_0 < \sum_k m_{0k}$, то тело устойчиво по отношению к распаду и самопроизвольно не распадается. Для осуществления распада (например, атомного ядра на составляющие его частицы) необходимо в этом случае сообщить телу извне энергию, по

крайней мере равную разности $(\sum_k m_{0k} - M_0) c^2$. Эта энергия, равная наименьшей работе, требуемой для разложения тела на составные части, называется *энергией связи* тела: $E_{\text{св}}$. Положительная величина

$$\Delta m = \sum_k m_{0k} - M_0 = \frac{E_{\text{св}}}{c^2} . \quad (23.27)$$

называется *дефектом масс* сложного тела.

Как видим, в релятивистской механике масса и энергия системы частиц зависят от ее состава и внутреннего состояния. В случае связанной (прочной) системы, например, атомного ядра, сумма масс покоя свободных протонов и нейтронов всегда больше массы покоя образованного из них ядра.

Ускоренная система отсчета и гравитационное поле



Принцип эквивалентности. Частная теория относительности отвергла понятие эфира и уничтожила веру в абсолютное пространство Ньютона. Метафизический характер абсолютного пространства становился очевидным, поскольку были развенчаны все идеи его материальной реализации. Но вместе с тем была подорвана и вера в преимущественный характер инерциальных систем отсчета. Выяснилось, что они сами метафизичны: реализовать их какими-либо телами на бесконечном протяжении вообще невозможно. Инерциальные системы могут реализовываться лишь приближенно (одним из примеров такой реализации является гелиоцентрическая система отсчета).

Естественно возникло сомнение: могут ли такие системы отсчета претендовать на какую-либо привилегированность, подобную той, какой они обладали в ньютоновской механике? Из этого сомнения и возникла новая теория тяготения. «Существенное достижение общей теории относительности, — писал много позднее Эйнштейн, — заключается в том, что она избавила физику от необходимости вводить ‘инерциальную систему’ (или ‘инерциальные системы’). Это понятие неудовлетворительно по той причине, что оно без какого-либо обоснования выделяет из всех мысленно возможных систем координат некоторые системы».

Принцип относительности Эйнштейна (в частной теории относительности) требовал независимости *всех* законов природы от движения одной инерциальной системы отсчета по отношению к другой. Таким образом, и частная теория относительности выделяла бесконечный класс инерциальных систем отсчета как физически преимущественный. Неудовлетворенность этим обстоятельством привела к тому, что Эйнштейн сразу же после

создания частной теории относительности задался вопросом: «Нельзя ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением?» Иными словами, Эйнштейн захотел расширить класс *допустимых* систем координат — таких, для которых выполняется принцип относительности. Этим самым он пытался расширить и саму формулировку принципа относительности. Сделать это ему позволил закон равенства инертной и тяжелой масс: именно в связи с этим он им так пристально интересовался.

Эйнштейн в своей «Творческой автобиографии» объяснял потом свой замысел следующим образом: «Мне пришло в голову: факт равенства инертной и тяжелой масс или, иначе, тот факт, что ускорение свободного падения не зависит от природы падающего вещества, допускает и иное выражение. Его можно выразить так: *в поле тяготения (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве без тяготения, если в нем вместо 'инерциальной' системы отсчета ввести систему, ускоренную относительно нее*». Этот принцип был назван Эйнштейном *принципом эквивалентности*.

«Лифт Эйнштейна». Для иллюстрации эквивалентности ускорения и тяжести Эйнштейн предложил свой знаменитый мысленный эксперимент с лифтом («лифт Эйнштейна»). Человек, находящийся в покоящемся лифте, может обычным методом определить ускорение свободного падения на поверхности Земли. Он может это сделать, измеряя, например, время, в течение которого тело падает на пол лифта с высоты 100 см. Тогда ускорение падения тела выразится хорошо известной простой формулой: $g = 2 \times 100/t^2$, что даст приблизительно значение $g = 981 \text{ см/с}^2$. Допустим, что человек в лифте не имеет возможности получать информацию извне. Может ли он сделать заключение, что он сам и кабина лифта находятся в покое? Оказывается, нет, потому что он может рассуждать также следующим образом: «Я вижу, что все тела в кабине испытывают ускорение в 981 см/с^2 , пока они не будут остановлены столкновением с полом

кабины. Так как это ускорение совершенно не зависит от выбора тела (от его индивидуальных свойств, в частности, от его вещества и от его массы), то вряд ли можно думать, что ускорения этих тел соответствуют каким-либо реальным силам, действующим на эти тела. Сила инерции также сообщает всем телам одно и то же ускорение. Вероятно, моя система отсчета (связанная с кабиной) не является инерциальной системой, а по каким-то мне неизвестным причинам движется вверх относительно инерциальной системы с ускорением в 981 см/с^2 . Поэтому те тела внутри кабины, которые не принуждены участвовать в этом ускоренном движении, подчиняются закону инерции и отстают от этого движения, пока не наталкиваются на пол кабины».

Из этого следует, что наблюдатель, находящийся в закрытой кабине, не в состоянии отличить влияние тяготения от эффекта ускоренного движения. Находясь в кабине, стоящей на поверхности Земли (рис. 24.1), наблюдатель ощущает свой обычный вес, и замечает, что все предметы одинаково ускоряются по направлению к полу. Теперь представим себе, что рассматриваемая кабина — не лифт, а ракета, снабженная реактивным двигателем и движущаяся в космическом пространстве. Если она вместе с наблюдателем движется с постоянным ускорением, в точности равным гравитационному ускорению у поверхности Земли, то наблюдатель снова обнаружит, что все свободные предметы падают на пол с тем же самым ускорением, и опять почувствует свой нормальный вес. В такой закрытой кабине невозможны никакие эксперименты, которые позволили бы наблюдателю отличить явления, связанные с тяготением, от явлений, характерных для ускоренного движения. Внутри небольшой замкнутой кабины эффекты гравитации и ускоренного движения неразличимы.

В этом смысле тяготение подобно силе инерции — фиктивной силе, возникающей в результате ускорения системы отсчета, в которой производится наблюдение. Тогда возникает вопрос: не является ли тяготение лишь «кажущейся силой»? Нельзя ли его устранить переходом в подходящую систему отсчета — таким же способом, каким мы устраняем силы инерции?

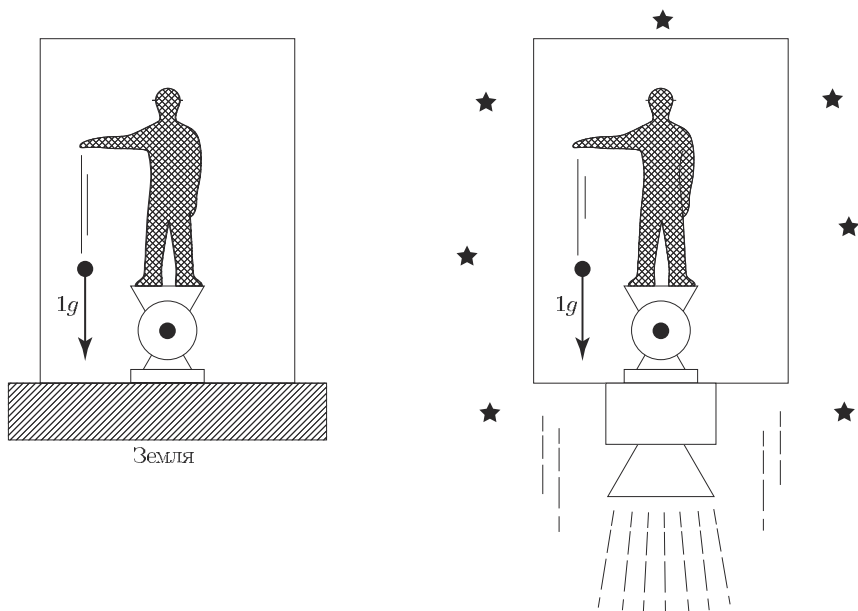


Рис. 24.1. Эквивалентность тяготения и ускорения. Наблюдатель в закрытой кабине не может сказать определенно, стоит ли он на поверхности Земли (слева) или движется в космосе с ускорением, равным ускорению свободного падения у земной поверхности

Снова представим себе закрытую со всех сторон кабину — на этот раз кабину лифта (рис. 24.2). Если удерживающий ее трос вдруг оборвется, то кабина вместе со всем, что в ней находится, начнет свободно падать под действием силы тяжести, причем все тела в ней будут ускоряться совершенно одинаково. Наблюдатель, находящийся внутри такой кабины, не почувствует веса своего тела, а окружающие его предметы будут свободно «парить» в воздухе, не испытывая ускорения в направлении пола. Мы получим то, что мы уже называли состоянием *невесомости*. Все тела в лифте потеряют вес. Это состояние — такое же, как и состояние свободного падения в космическом пространстве вместе с космическим кораблем. Астронавты на борту космического корабля имеют такие же гравитационные массы, как и на Зем-

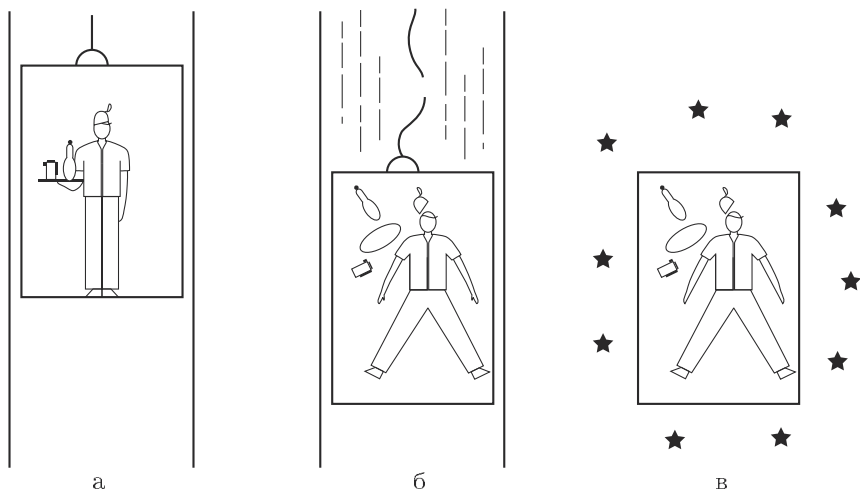


Рис. 24.2. Свободное падение. Наблюдатель, находящийся в неподвижном лифте, весит 70 кг (а). Если трос лифта вдруг оборвется, то лифт и все, что в нем находится, начнут свободно падать под действием поля тяготения Земли (б). Так как сам лифт и все его содержимое падают с одинаковым ускорением, наблюдатель не чувствует собственного веса (давления веса своего тела на пол кабины) и испытывает, таким образом, ощущение невесомости. Никакие эксперименты, проводимые в кабине, не позволят наблюдателю определить, падает ли он вместе с кабиной лифта или свободно парит в космическом пространстве вдали от поля тяготения Земли (в)

ле, но в полете становятся невесомыми. В полете они находятся в инерциальной системе отсчета, в которой проявляет себя только инертная масса. В этой системе отсчета их *ускорение* свободного падения g обратилось в нуль — значит, обратился в нуль их вес: $p = mg = 0$, и их гравитационная масса никак себя не проявляет. Поэтому, какие бы опыты наблюдатель ни проводил внутри кабины, он не сможет с их помощью установить, падает ли кабина на Землю или свободно парит в космическом пространстве.

Между тем человек, наблюдающий эту картину, например, свободно падающий лифт, со стороны, увидит, что все тела внутри кабины лифта ускоряются точно так же, как и она сама. Для

него движение предметов, находящихся в лифте, относительно его пола тоже отсутствует. Но он для себя зафиксировал, что лифт и все тела в нем имеют вес, так как падают ускоренно на Землю. Он зафиксировал проявление их гравитационной массы, заставляющей тела притягиваться к Земле.

Так как эффекты тяготения и ускоренного движения (с одинаковым для всех тел ускорением g) одинаковы, то, как и писал Эйнштейн, принцип эквивалентности есть лишь другое выражение закона равенства инертной и гравитационной масс для любых тел. Поэтому этот закон многие физики просто принимают за иную формулировку принципа эквивалентности.

Из рассмотренного примера с лифтом видно, что «силу» тяготения можно создавать или устранять, выбирая подходящую систему отсчета.

В свободно падающем лифте справедливы все законы механики Ньютона. В частности, любое тело будет двигаться там по инерции, с одной и той же скоростью и прямолинейно, пока не ударится о стену кабины. Поэтому свободно падающая кабина представляет собой *локальную* (т. е. местную) инерциальную систему отсчета. Этот факт позволил Эйнштейну расширить его прежний принцип эквивалентности. В прежней формулировке (сейчас она называется *слабым* принципом эквивалентности), он говорит о неразличимости явлений гравитации и ускоренного движения в закрытой кабине. Расширенная формулировка, называемая *сильным* принципом эквивалентности, утверждает, что *все законы природы имеют одинаковый вид и в кабине свободно падающего лифта, и в любой другой локально-инерциальной системе отсчета*. Сильный принцип эквивалентности устанавливает *равноправность всех свободно падающих систем для постановки любых физических экспериментов*.

Обобщение принципа относительности. Рассуждения, приведшие к этому принципу на рассмотренных мысленных экспериментах, можно проделать в общем случае для двух систем отсчета S_1 и S_2 . Пусть S_1 движется с ускорением в направлении своей оси X , и пусть ее ускорение (постоянное во

времени) равно a . Предположим, что S_2 покоится, но находится в однородном (т. е. одинаковом во всей рассматриваемой области пространства) гравитационном поле, которое сообщает всем телам ускорение $-a$ в направлении той же оси X . Так как в гравитационном поле все тела ускоряются одинаково, то физические законы относительно системы S_1 не должны отличаться от законов, описываемых в системе S_2 . Поэтому нет оснований полагать, что системы отсчета S_1 и S_2 в каком-либо отношении отличаются друг от друга.

Таково было рассуждение Эйнштейна в его первой работе (1907 г.), в которой он начал построение общей теории относительности. В ней он уже сделал важнейший для построения теории вывод: «В дальнейшем мы будем предполагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета. *Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета*».

Следует заметить, что принцип эквивалентности (в обеих формулировках — слабый и сильный) справедлив только в достаточно малых объемах пространства, где силу тяжести можно считать постоянной. Если кабина достаточно велика, то в ней поле тяжести Земли уже не будет однородным, и в ней будут наблюдаться так называемые приливные эффекты: пол кабины, падающей на Землю, будет расположен ближе к центру Земли, чем потолок, поэтому частица, начавшая падение вблизи потолка, испытает меньшее ускорение, чем та, которая начала падать вблизи пола; в результате эти две частицы будут медленно расходиться.

Это определяет *локальный* характер принципа эквивалентности. Строго говоря, свободно падающую систему отсчета можно уподобить инерциальной системе только в бесконечно малой окрестности падающей точки. Принцип эквивалентности не мог быть использован для описания произвольных, неоднородных или изменяющихся во времени полей тяготения. Эйнштейн хорошо понимал стоявшую перед ним трудность создания теории произвольного гравитационного поля.

Тем не менее, с принципа эквивалентности началось создание теории, которую очень многие до сих пор считают непревзойденной вершиной в теоретической физике.

Этим был сделан первый шаг к отказу от инерциальных систем как физически преимущественных, или привилегированных систем отсчета. С завершением эйнштейновской теории эти системы отсчета были полностью изгнаны из употребления как нереализуемая и потому ненужная идеализация.

Одновременно этим был сделан шаг к полевой концепции тяготения: силы дальнего действия будут заменены *полем* тяготения.

Гравитационное поле — не скалярное



После победы полевой концепции над ньютоновой концепцией дальнего действия в умах многих ученых создалось представление о возможности описания всех явлений физики на основе электромагнитной теории. Так возникли попытки всеобщего электромагнитного синтеза, призванного заменить прежнюю механистическую картину мира. Естественно, этот синтез должен был включить в себя и явления тяготения. Физики захотели вывести гравитацию из теории электромагнитного поля, иначе говоря, создать электромагнитную теорию тяготения. Однако попытки такого рода, предпринятые Максвеллом, Лоренцом и другими, были неудовлетворительны либо в теоретическом аспекте (связанном с нарушением закона сохранения энергии), либо в отношении соответствия с наблюдениями (известная неудача с объяснением аномалии в смещении перигелия Меркурия).

До открытия принципа эквивалентности Эйнштейн, а также Пуанкаре и Нордстрем пытались строить полевую теорию тяготения иного рода: в рамках частной теории относительности (такие теории стали называться *релятивистскими* полевыми теориями; сейчас их также называют лоренц-ковариантными). Этот подход казался Эйнштейну перспективным ввиду того, что даже классический потенциал тяготения Ньютона оказалось возможным представить как *скалярное* поле, т. е. поле с одной единственной составляющей. Такая релятивистская скалярная теория легко могла быть сделана инвариантной по отношению к преобразованиям Лоренца. Итак, естественной представлялась следующая «релятивистская программа» построения теории гравитационного поля: полное физическое поле состоит из скалярного поля (тяготение) и векторного поля (электромаг-

нитное поле). Эта программа строилась уже вне рамок электромагнитного синтеза: гравитационное поле не выводилось в нем из электромагнетизма, а описывалось как самостоятельная и независимая от него реальность.

Эйнштейн отказался от реализации этой программы, как только открыл принцип эквивалентности. Дело в том, что она оказалась противоречащей этому принципу. Действительно, как следует из частной теории относительности, инертная масса физической системы при увеличении ее полной энергии (в частности, при увеличении кинетической энергии, т. е. скорости тела) должна возрастать. Принцип эквивалентности утверждал, что тяжелая масса тела *всегда* равна его инертной массе, даже если эта инертная масса обусловлена внутренней энергией тела: известные опыты Саузерна с радиоактивными веществами (1910 г.) показали, что тяжелая масса равна инертной, хотя последняя была в значительной степени обусловлена энергией связи. Отсюда следовало, что *вес* системы зависит вполне определенным образом от ее полной энергии. Но энергия E и масса m тела, согласно частной теории относительности, эквивалентны: $E = mc^2$. Принцип же эквивалентности утверждает, что ускорение падения тел не зависит от массы m , значит и от полной энергии E . Эйнштейн, таким образом, дал принципу эквивалентности формулировку, которая вынуждала его для описания тяготения выйти за рамки частной теории относительности.

Гравитация и инерция. Принцип Маха



Два представления о пространстве. В истории физики, начиная с древности и до сих пор, были выдвинуты лишь два представления о физическом пространстве. Одно из них — представление об абсолютном пространстве, когда считается, что физическое пространство само является самостоятельной сущностью (субстанцией). Такого представления придерживались в древности Аристотель и атомисты (Левкипп, Демокрит), а в Новое время — Галилей, Ньютон, Декарт. Расхождение между ними состояло лишь в том, что древние атомисты, а также Галилей и Ньютон считали такое пространство пустым (*вакуумом*), а Аристотель и Декарт — заполненным средой (*пленумом*).

Другое представление о пространстве сейчас называется *релятивистским*. В древности оно было представлено пифагорейцами и элеатами (вспомните в особенности Зенона), а в Новое время оно возродилось в трудах Г. Лейбница (1646–1716) и Дж. Беркли (1685–1753). Они считали, что в физическом пространстве любое положение относительно, как относительно и любое движение. По Лейбницу, ни у пространства, ни у времени нет самостоятельного существования: «пространство» — это всего лишь разделение тел, а «время» — лишь последовательность событий. Беркли замечал, что движение любого тела можно представить, лишь определив его направление, а последнее в свою очередь имеет смысл лишь относительно какого-нибудь другого тела. Поэтому, кроме данного движущегося тела, необходимо предполагать наличие еще какого-то другого.

Это — весьма ясное выражение принципа относительности. Епископ Беркли развивает его следующим образом: «Пусть име-

ется две сферы и, кроме них, не существует ничего материального. Тогда никак нельзя представить себе вращения этих двух сфер вокруг их общего центра тяжести. Но допустим, что внезапно создано Небо с неподвижными звездами в нем; тогда мы сразу же сможем представить себе движение сфер, определяя мысленно их положения относительно различных участков Неба».

Относительность ускорений. Эти слова были написаны спустя почти столетие после Галилея. Что они содержат нового по поводу относительности движения? Новым было то, что рассматривалось ускоренное — вращательное движение. Рассматривались системы отсчета ускоренно движущиеся, такие, в которых механика Галилея–Ньютона утрачивает смысл. Речь шла о некоем обобщении принципа относительности на случай неинерциальных систем отсчета. В словах Беркли содержалось предвосхищение некоторого принципа, называемого *принципом Маха*, который позволял говорить о возможности обобщения понятия относительности. Этот принцип, сформулированный Эрнстом Махом (1838–1916) еще в 1872 г., был использован Эйнштейном в качестве второго важнейшего эвристического принципа при создании теории тяготения. (Именно Эйнштейн назвал этот принцип именем Маха.)

Э. Мах обращает внимание на то, что движение даже простейшей механической системы, состоящей из двух взаимодействующих масс, невозможно описать, если отвлечься от остального мира. Влиянием на тела всей остальной Вселенной Мах объясняет появление сил инерции тел — сил, возникающих при переходе в ускоренную систему отсчета; например, той силы, которая заставляет искривляться поверхность воды в ньютоновском вращающемся ведре.

«Когда тело вращается относительно неподвижных звезд, — писал Э. Мах, — то возникают центробежные силы; если же оно вращается относительно какого-то другого тела, но не вращается относительно неподвижных звезд, то никаких центробежных сил не появляется». Это — идея о том, что вращение тела относительно неподвижных звезд эквивалентно вращению этих звезд

вокруг тела. В обоих случаях вращение одинаково, т. е. относительно. Э. Мах утверждал, что всякое движение тел относительно, будь это движение поступательное или вращательное.

Ньютон считал ускоренное движение абсолютным: вода в его ведре вращается относительно неподвижного абсолютного пространства — само пространство не может вращаться относительно ведра. Мах трактует тот же ньютоновский опыт с ведром противоположным образом. Вода в ведре вращается не относительно пустого пространства, а относительно всех удаленных масс Вселенной («неподвижных звезд»), и это вращение не абсолютное, а относительно: его можно заменить вращением всей Вселенной относительно ведра, т. е. относительно системы отсчета, жестко связанной с вращающимся ведром.

Для Эйнштейна идея Маха явилась вторым основанием (после принципа эквивалентности) для расширения принципа относительности на случай неинерциальных систем отсчета.

Гравитация и инерция — это одно? Эвристическая ценность принципа Маха для Эйнштейна этим не ограничилась. Проиллюстрируем идею Маха на следующей модели. Представим себе Солнце и падающее на него тело ничтожной в сравнении с ним массы (рис. 26.1). Система из этих двух тел находится во Вселенной, в которой на больших расстояниях имеются большие количества вещества. С точки зрения Маха, можно высказать два физически равноценных утверждения:

- 1) данное тело падает на Солнце;
- 2) тело покоится, а Солнце падает на него.

Если Солнце падает на тело, то можно предположить, что падает (иначе говоря, подвергается ускорению) все вещество — все остальные массы, расположенные во Вселенной на больших расстояниях. Оба утверждения эквивалентны: речь идет лишь о выборе системы отсчета.

Э. Мах предположил, что гравитационная сила, действующая на малое тело в той системе координат, где оно не ускорено

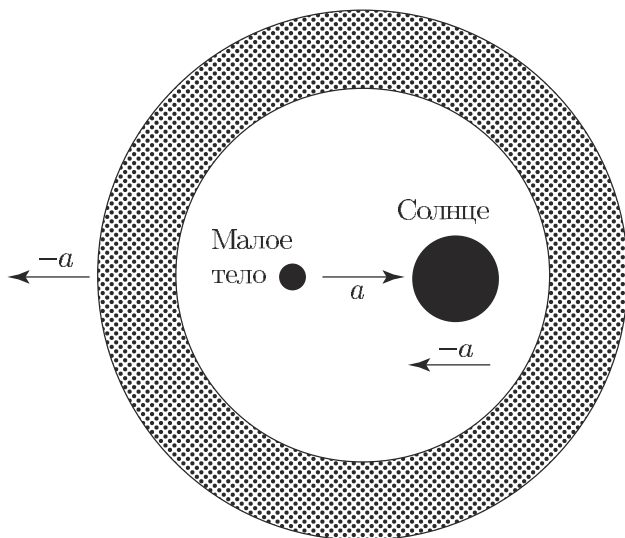


Рис. 26.1. Простая модель Вселенной, содержащая малое тело, гравитационно притягивающееся к Солнцу. Все остальное вещество Вселенной представлено в виде массивной оболочки, расположенной на большом расстоянии. Можно либо малое тело рассматривать как ускоренное относительно покоящейся массивной оболочки и почти покоящегося Солнца, либо удаленное вещество и Солнце считать ускоренными относительно покоящегося малого тела

и стоит на месте, распадается на две — на гравитационное притяжение со стороны Солнца и на гравитационное взаимодействие с удаленными звездами, веществом остальной Вселенной. Эту вторую *гравитационную* силу Э. Мах назвал силой инерции.

В этой модели существенны два момента. Во-первых, сила инерции считается гравитационной силой: *инерция есть гравитация*. При рассмотрении законов физики в двух системах координат, одна из которых является ускоренной по отношению к другой, та сила, которая в одной системе координат была силой инерции, в другой системе может выступать в качестве силы тяготения. Иначе говоря, силы инерции и гравитационные силы взаимопревращаемы — они являются проявлением одной и той

же сущности¹. Во-вторых, сила инерции порождена гравитационным взаимодействием тела с веществом, находящимся во Вселенной на больших расстояниях. Если это вещество удалить, то, согласно Маху, сила инерции должна исчезнуть. Э. Мах предлагает, таким образом, вариант объяснения природы этой таинственной силы. *Сила инерции любого тела обусловлена его гравитационным взаимодействием со всеми удаленными массами Вселенной* — таково выражение «принципа Маха». Еще проще его можно выразить совсем короткой фразой: материя там определяет инерцию здесь.

Из принципа Маха уже как вторичный эффект вытекает закон Галилея — независимость ускорения от состава падающего тела. Выбранная специальная система отсчета в данной модели такова, что малое тело в ней покоится. Это значит, что в этой системе отсчета (гравитационная) сила инерции уравновешена непосредственным (гравитационным) притяжением со стороны Солнца. Сумма этих двух сил — результирующая сила — равна нулю и останется равной нулю при замене этого тела любым другим. Следовательно, в этой системе отсчета как свинцовый, так и резиновый грузы будут покоиться, а в какой-либо другой системе отсчета они будут иметь одинаковое ускорение.

По Ньютону, сила инерции тела порождается действием на него абсолютного пространства. Э. Мах сформулировал свой Принцип для того, чтобы показать: инерция порождается не пустым пространством, а массами, содержащимися в пространстве. Пустое пространство бессодержательно: пространство может обладать только такими свойствами, которые обусловлены наличием в нем материи.

¹ В окончательной формулировке общей теории относительности выяснилось, что гравитация в общем случае не сводится к инерции. Эффекты гравитации могут быть заменены действием сил инерции не для любых, а только для однородных полей тяготения. Это можно выразить и по-другому, сказав что гравитация эквивалентна инерции лишь в ограниченных (строго говоря, в бесконечно малых) областях пространства. Идея Маха была для Эйнштейна лишь эвристической идеей, не более! Мы еще вернемся к вопросу о том, в какой мере «принцип Маха» выполняется в строгой эйнштейновской теории тяготения.

Эйнштейн понял эту мысль Маха. Из нее возникла мысль Эйнштейна о зависимости свойств пространства от распределения и движения материи.

Метафизика принципа Маха. Э. Мах, как мы знаем, активно боролся против ньютонианской метафизики. Свой Принцип он использовал для ниспровержения метафизического абсолютного пространства Ньютона, но мы помним и то, что разрушение метафизики Ньютона влечет за собой разрушение его физики. Физическая теория не может обойтись без метафизических гипотез, хотя, по мировоззрению ее создателя, эти гипотезы часто скрыты, т. е. не формулируются в явном виде. Может быть, и Мах, борясь против метафизики, *неявно* вводил в физику метафизический элемент?

Остается фактом, что в течение всего XX века «принцип Маха» так и не получил единодушного признания со стороны физиков. Эйнштейн подчеркивал гносеологический (философский) характер этого принципа: различные ученые по-разному оценивали его роль и значение в физике в зависимости от их собственных философских воззрений. Так, Вигнер был уверен, что принцип Маха занял прочное место в методологии науки; другие (например, Дирак) считали, что этот принцип физически непонятен и, следовательно, стоит вне всякого настоящего физического знания.

Не случайно многие ученые (например, Р. Дикке) указывали, что принцип Маха никто однозначно так и не сформулировал «количественным образом», т. е. математически. Каждый из исследователей воспринимал принцип Маха в рамках той или иной физической модели, лишь качественно выражающей суть этого принципа (одна такая модель была здесь представлена на рис. 26.1). «У Маха много лиц — почти столько же, сколько было исследователей, рассматривавших принцип Маха», — писал Р. Дикке в статье «Многоликий Мах». Этим принцип Маха напоминает метафизический принцип инерции, который тоже оказалось невозможно сформулировать строго научно. Это неудивительно: источники сил инерции ненаблюдаемы. Если они суще-

ствуют, то либо находятся на бесконечности (Мах лишь условно называет их «неподвижными звездами»), либо они — вся Вселенная. Но и «бесконечность», и «вся Вселенная» — метафизические, недоступные познанию понятия. Принцип Маха по своему существу — принцип метафизический.

Как ни изгонял Мах метафизику в дверь, она пролезла все-таки в окно.

Эрнст Мах



Это был единственный человек, которого Эйнштейн называл своим учителем. Благодаря ему Эйнштейн впервые получил место штатного профессора в Карловом университете (Прага), ректором которого Э. Мах состоял дважды, в 1879–1880 и в 1883–1884 гг.

Происхождения он был незнатного: подданный Австро-Венгрии, он родился в 1838 г. в деревеньке Хрлица, на юге Чехии — теперь это окраина города Брно. Мать его была дочерью дворника, работавшей в епископском хозяйстве, отец — деревенским учителем. Начальное образование родители могли дать сыну только в монастырской гимназии, но монахи не оценили способностей мальчика, и отцу пришлось забрать сына из школы, чтобы самому обучать его ремеслу, классическим языкам и математике.

Мах и Эйнштейн были чем-то сродни: и того и другого еще в раннем детстве, в возрасте 4 или 5 лет, поразила идея физической причинности. Маленькому Эйнштейну показали тогда компас, и он вдруг задумался над причиной, толкающей стрелку компаса всегда в одном направлении. Маленького Маха потрясло другое видение — водяная мельница с ее хитросплетением зубчатых колес. Идея разумного причинного устройства мира не покидала обоих ученых до самого конца их жизни. По словам Эйнштейна (в некрологе, написанном в год смерти Маха в 1916 г.), Эрнст Мах был рожден, как птица для полета, для радостного созерцания и познания мира, и «эта способность была развита у него настолько сильно, что он до глубокой старости смотрел на мир любопытными глазами ребенка».

Жизнь Э. Маха не была устлана розами, но он сформировал свою жизнь сам, своими упорством и целеустремленностью. Получив в 22-летнем возрасте в Венском университете степень доктора философии, он уже в 1864 г. — профессор университета в Граце, где имеет собственную физическую лабораторию, но главная его научная деятельность прошла в Праге, в немецком университете имперской провинции Богемия (с 1888 г. Карлов университет был разделен на две части — немецкую и чешскую). За 28 лет пребывания в Праге Эрнст Мах воспитал всех будущих преподавателей физики университета. В 1895 г. он, однако, возвращается в Вену, где получает кафедру философии.

Так кто же он был по преимуществу — физик или философ? Он был и то, и другое, он не отделял физику от философии. Физический закон не существовал для него без философской интерпретации; философия становилась пустым делом без физических знаний. Удивительна целостность этой натуры, подчинившей физику философии, т. е. осмыслению мира. Он создает теорию сверхзвукового движения, открывает процесс, названный потом ударными волнами. «Конус Маха», «число Маха» — этими понятиями пользуются теперь летчики реактивной авиации. Вместе с тем открытый закон для него не самоцель — пусть пользуются его законом, но сам он его открывает не для практических целей: его интересуют возможности познания. В каком смысле для нас существует движение? Мы ведь ничего не имеем кроме ощущения движения. Первые работы Э. Маха так и названы «Об ощущении движения» (1875 г.), «Анализ ощущений» (1886 г., переведена на русский в 1907 г.). Реальны только ощущения и связи между ними, и настоящая цель науки — не познание объективного мира, а логическое упорядочение наших ощущений.

На этих идеях Маха возникнет потом огромная философская школа — «логический позитивизм» (знаменитый Венский кружок). Реальны ли атомы? Мах осмеливался утверждать, что не знает этого, хотя понятие атома было введено еще древними греками. Это, однако, была метафизика, с которой непримиримо боролся Эрнст Мах. Его философским принципом был принцип

экономии мышления: не вводите в физику чуждые ей абсолютные понятия, не доступные измерительной проверке.

Мах шел, казалось бы, против прогресса в физике: о реальности атомов говорили уже открытия Рентгена, супругов Кюри, Больцмана, Планка. Эйнштейн, объяснивший броуновское движение атомов, уже не мог сомневаться в их реальности. Отчего же Мах выступал против очевидности?

Понял его лучше всех Эйнштейн, когда написал, что Мах был «человек, обладавший редкой независимостью взглядов и оказавший огромное влияние на гносеологическую ориентацию естествоиспытателей нашего времени». Мах хотел смотреть на мир своими и только своими глазами, хотя бы все окружающие считали его сумасшедшим. Именно этот взгляд Маха (его «гносеологическая ориентация») потряс догматическую веру в механицизм.

Э. Мах был первый, кто решительно распатал галилеево-ньютоновскую парадигму научного знания, казавшуюся большинству физиков абсолютно незыблемой, и способствовал победе новой, квантово-релятивистской парадигмы. Он проложил Эйнштейну путь к созданию новой теории тяготения. Эйнштейн не только признавал огромную эвристическую роль принципа Маха в создании общей теории относительности, но и допускал, что Мах сам мог построить эту теорию: «Мах... был недалеко от того, чтобы придти к общей теории относительности. И это за полвека до ее создания!» (Эйнштейн). Но разве в XIX веке, при полном торжестве ньютоновой гравитационной теории, проблема тяготения могла вызвать у кого-нибудь интерес?

Ну, а независимость дерзких взглядов Маха, которую особенно мог оценить Эйнштейн, приводила лишь к тому, что большинство ученых относились к нему с нескрываемой враждебностью. Даже Макс Планк отверг его идеи, возмущенный, вероятно, независимостью взглядов Маха на религию: Мах был антиклерикал — отвергал официальное церковное учение.

Свобода Маха от общепринятых идейных взглядов, говорит Эйнштейн, а также его человеколюбивое отношение к окружающим защитили его от болезни, пощадившей в Германии

лишь немногих, — от националистического фанатизма. Поэтому он стал врагом для нацистов, изгонявших всякое напоминание о нем. Он не стал пророком ни в своем отечестве (Австрии), ни в чужих — ни в Германии, ни в СССР.

Такова судьба всех независимых и свободных духом людей. Ньютон, Мах и Эйнштейн отличались тем, что творили науку, находясь практически в изоляции от научного мира, еще не созревшего для восприятия их мыслей. Это были гении-одиночки, намного опережавшие свое время. И когда Эйнштейн говорит об огромном влиянии Маха на ученых «нашего времени», то тут некоторая натяжка: это *на него* лично Мах оказал огромное влияние, тогда как другие современники или не хотели, или не умели оценить его. Правда, Эйнштейн уточняет: «Я думаю, что даже те, кто считает себя противником Маха, *вряд ли признают*, сколько высказанных им идей они, так сказать, впитали с молоком матери».

Даже сейчас идеи Маха не оценены полностью, и можно сказать, что их творческое воздействие на науку будет продолжаться и в будущем. Это видно из того, какую роль Мах придавал ньютоновой концепции дального действия, *несмотря на ее метафизичность* и на то, что в его время эта концепция опровергалась абсолютным большинством ученых: в этом и проявлялась независимость его взглядов от общепринятых мнений. Оглядываясь на начавшуюся после Ньютона борьбу между сторонниками дального действия и близкого действия, Мах писал в своей книге «Познание и заблуждение»: «Мысль Ньютона о силах, действующих на расстоянии, была великим умственным достижением, которое позволило в течение одного столетия создать стройную математическую физику».

Поскольку Мах по философскому мирозерцанию был позитивист, т. е. смотрел на науку не как на способ познания объективного мира, а как на способ логического упорядочения наших ощущений, то слово «махист» для философов-материалистов в СССР стало синонимом классового врага: за «махизм» сажа-

ли в тюрьмы и расстреливали¹. Как позитивист, Мах выступал и против материализма, и против метафизики. Выступая против метафизики, он даже выдвинул еще один, чисто философский принцип, называемый *принципом наблюдаемости*: понятия, недоступные операционально-измерительной проверке (например, пространство как абсолют, или эфир), следует изгонять из теории. Но отношение Маха к дальнодействию еще раз характеризует метафизический аспект его собственного мировоззрения, сколь бы категорически он от него ни отрекался.

Дальнодействие было вытеснено из физики максвелл-лоренцевой теорией поля (как оказалось, временно). Однако, при возникновении теории поля в сознании физиков еще отсутствовало понятие атома. С открытием атома, а потом и с открытием квантов (частиц) электромагнитного поля стало ясно, что никакая среда не может служить прямым посредником для передачи взаимодействия. Атомы и кванты, расположенные пусть даже на очень малых расстояниях друг от друга, все же не могут находиться в постоянном соприкосновении. Расстояния между ними конечны — действие всегда передается от одной частицы среды к другой *на расстоянии*.

Еще до открытия атома Мах выступил за концепцию дальнодействия, в поддержку старой традиции Гаусса и Клиффорда. Он уже тогда сознавал, что концепция дальнодействия — не ошибочная и еще вернется в науку.

Время подтвердило правоту Маха. В настоящее время в рамках концепции дальнодействия оказалось возможным сформу-

¹ В пригороде Брно (ныне Чехия) на фасаде дома, где родился Э. Мах, в 1938 г. была помещена памятная доска в связи с празднованием его столетней годовщины. После оккупации Чехии нацистской Германией выяснилось, что новым властям память о Махе совсем неужидна. Доска была снята и вновь водружена на место лишь после изгнания оккупантов в 1945 г. Но после провозглашения в стране социализма прокоммунистическая власть опять приказала убрать мемориальную доску, причем на этот раз она исчезла совсем: все ее поиски в канун празднования 150-летия со дня рождения Маха не привели к успеху. В 1988 г. была изготовлена и установлена новая мемориальная доска. Как видим, научные идеи Маха оказались не нужны ни нацистскому, ни социалистическому режимам.

лизовать как теорию электромагнитных взаимодействий, так и теорию гравитационных взаимодействий, ничем не уступающие полевым теориям Максвелла и Эйнштейна.

Говорить об этом в конце XIX века, когда прочно утвердилось близкодействие, значило прослыть безумцем. Такая участь несбывшегося пророка была уготована Маху. Между тем он провидел современные теории *прямого межчастичного взаимодействия*, основанные на принципе так называемого запаздывающего дального действия — передачи сигналов без промежуточной среды, но с конечной скоростью.

Эрнст Мах не хотел слепой веры в атомы; но сейчас можно сказать, что своими идеями он стоял у истоков не только общей теории относительности, но и квантовой физики. А что касается реальности понятия «атом», то квантовая физика сама пришла к представлению об атоме, близкому к пониманию Маха. «Атомы — не вещи», — написал, например, один из создателей квантовой механики Вернер Гейзенберг, и в этом с ним соглашался Нильс Бор. Дело в том, что учение об излучении и строении атома не сводится ни к каким прежде знакомым «классическим» представлениям, когда мы описываем вещи с помощью понятий их места, их скорости или их протяженности. Само понятие положения тел в пространстве или изменения их во времени потеряло прежний смысл. Так, вследствие известного квантового «соотношения неопределенностей», нельзя говорить о траектории электрона в атоме, потому что эту траекторию в принципе невозможно наблюдать, какой бы сильный микроскоп ни был изобретен для этой цели. Прежнее наглядное пространственно-временное описание процессов, происходящих в атоме, невозможно: эти процессы не являются более предметами опыта, т. е. непосредственного опыта в смысле классической физики. Их можно понимать как предметы нового научного опыта, включающего в себя также ненаблюдаемые, запредельные элементы, поэтому атомы можно рассматривать как постигаемую современной физикой метафизическую реальность. Как видим, Эрнст Мах отрицал реальность атомов весьма

логично: это — метафизика, а Мах стремился изгнать из физики все метафизическое.

В заключение этой главы коснемся все-таки вопроса, почему же многие физики считали себя по философскому мировоззрению позитивистами (к ним относятся даже очень крупные ученые, такие как Мах и Шрёдингер). Многим физикам даже вообще кажется, что им философия не нужна. Физик может не быть философом, когда физическая теория уже построена. Пользуясь готовой техникой для расчета наблюдаемых эффектов, можно быть позитивистом, считая критерием истинности теории исключительно ее соответствие с фактами наблюдений. Тогда можно забыть о метафизических сущностях, потому что они-то как раз недоступны никаким наблюдениям. Так, при расчете орбиты небесного тела по закону всемирного тяготения можно забыть о том, что этот закон формулируется для ненаблюдаемого (метафизического) абсолютного пространства. По этой причине физики склонны забывать про философские начала, требовавшиеся для создания их науки. Философия требуется физикам именно в переломные периоды развития их науки — в такие моменты, когда одна физическая парадигма сменяется другою. Мы уже видели, что тот же Э. Мах для разрушения прежней парадигмы употребил и метафизические понятия, и свой в полном смысле метафизический Принцип. Тут он был не позитивист, а настоящий метафизик.

На пути к теории: новые проблемы



Как математически описать гравитационное поле? Мы видели, по какой причине Эйнштейну пришлось отказаться от построения теории тяготения в рамках частной теории относительности: в ней не мог реализоваться открытый им принцип эквивалентности. Это исключало возможность релятивистского описания тяготения с помощью одного (скалярного) потенциала Φ .

В то же время гравитационное поле принципиально отлично и от полей векторного типа, например, от электромагнитного поля, описываемого в пространстве Минковского 4-мерным векторным потенциалом A_μ , где μ пробегает 4 значения: $\mu = 0, 1, 2, 3$. Отличие гравитационного поля от электромагнитного проявляется уже в том, что электромагнитные заряды могут как притягиваться, так и отталкиваться друг от друга, в то время как гравитационные «заряды» (массы) только притягиваются.

Возникает вопрос: какого рода та математическая величина, которой выражается потенциал (или потенциалы) гравитационного поля?

Какова допустимая группа преобразований? Эйнштейн вовсе не отказывался от созданной им частной теории относительности (в отличие, например, от Абрагама, который считал, что частная теория относительности не может быть верной, потому что тяготение никак не может быть описано в ее рамках). Избранная Эйнштейном программа построения теории была связана не с отказом от преобразований Лоренца, а с их обобщением: принцип эквивалентности требовал расширения допустимой «группы преобразований» координат. В соответствии с этим принципом, в качестве допустимых должны рассматри-

ваться не только инерциальные, но и равноускоренные (поступательно движущиеся) системы отсчета.

Другим эвристическим принципом, которому следовал А. Эйнштейн, был принцип Маха. Он требовал расширения принципа относительности не только на поступательно движущиеся, но и на вращающиеся системы отсчета.

В соответствии с этими условиями, надо было заменить *линейные* лоренцевы преобразования на некоторые другие — в общем случае нелинейные, так как переход от одной системы отсчета к другой, ускоренно движущейся по отношению к первой, не может быть представлен преобразованием координат, линейным относительно координаты времени.

Найдя допустимую группу преобразований и сформулировав соответствующий обобщенный принцип относительности, требовалось потом написать уравнения гравитационного поля, которые отвечали бы этому принципу относительности, т. е. сохраняли бы свой вид при всех допустимых преобразованиях. В соответствии с полевым подходом, эти уравнения должны были иметь вид дифференциальных уравнений в частных производных по координатам и времени от гравитационных потенциалов (именно такие уравнения описывают передачу взаимодействий от одной точки к другой, находящейся в непосредственной с ней близости).

Ограниченность принципа эквивалентности. Принцип эквивалентности утверждает, что равномерно ускоренная система отсчета эквивалентна постоянному однородному внешнему полю. В таком же смысле неравномерно ускоренная, поступательно движущаяся система отсчета эквивалентна однородному, но переменному во времени гравитационному полю. Согласно принципу эквивалентности, такие поля по своему воздействию тождественны полю инерциальных сил.

Но мы уже знаем, что принцип эквивалентности строго выполняется лишь в ограниченных участках пространства. Нетрудно заметить, что на больших расстояниях поля инерциальных сил, которым эквивалентны неинерциальные системы отсчета, все же не вполне тождественны истинным гравитационным по-

лям. Истинное гравитационное поле (например, поле тяготения Земли) существует и в инерциальной системе отсчета, например, в гелиоцентрической, тогда как силы инерции возникают лишь в ускоренно движущихся системах: они исчезают, как только мы от ускоренно движущейся системы отсчета снова переходим к инерциальной.

Кроме того, гравитационное поле убывает с расстоянием от создающих его тел: на бесконечности гравитационное поле неограниченно уменьшается, хотя и нигде не исчезает. Инерциальные силы, напротив, на бесконечности или неограниченно возрастают пропорционально расстоянию (как, например, центробежные силы во вращающейся системе отсчета) или, в крайнем случае, остаются конечными по величине (так, поле, которому эквивалентна ускоренная прямолинейно движущаяся система отсчета, одинаково во всем пространстве, в том числе и на бесконечности).

Ввиду указанного различия в поведении гравитационных и инерциальных сил на больших расстояниях, истинные гравитационные поля в больших участках пространства невозможно исключить никаким выбором системы отсчета, пусть даже эта система отсчета — инерциальная, в которой силы инерции исчезают.

Единственное, чего можно достичь надлежащим выбором системы отсчета, — это исключить действие гравитационного поля на данную частицу; сделать это можно лишь в таком участке пространства, который достаточно мал для того, чтобы в нем можно было считать поле однородным. Принцип эквивалентности утверждает, что это можно сделать путем выбора ускоренно движущейся системы отсчета, ускорение которой было бы равно тому ускорению, которое приобретает частица, помещенная в рассматриваемом участке поля. В этом проявляется отмеченный локальный характер принципа эквивалентности.

А как же описывать произвольные гравитационные поля, неоднородные, изменяющиеся во времени и на сколь угодно больших расстояниях? Принцип эквивалентности недостаточен для ответа на этот вопрос.

Неметрический характер координат. В инерциальной системе отсчета пространство является однородным и изотропным и описывается геометрией Евклида. В таком пространстве координаты имеют ясный геометрический смысл: разность координат двух точек определяет расстояние (длину отрезка) между этими точками, а время имеет ясный физический смысл: разность значений времени, показываемых часами, определяет промежутки времени между событиями.

Совсем иная картина возникает в ускоренно движущейся системе отсчета. В ней пространство перестает быть однородным и изотропным, время утрачивает свой равномерный ход. Поэтому возникают вопросы:

- 1) какой геометрией описывается это пространство?
- 2) какой смысл имеют в нем координаты точек и значения координаты времени?

Переход от инерциальной системы отсчета к ускоренной в корне изменяет саму координатную систему. В однородном изотропном пространстве мы всегда можем выбрать прямоугольную («декартову») систему координат, причем переход от одной прямоугольной системы координат к другой совершается только с помощью линейных преобразований. Переход же в ускоренную систему отсчета, совершаемый с помощью нелинейных преобразований, приводит к тому, что с телом этой системы отсчета нельзя связать прямоугольных координат. В ускоренной системе отсчета возможны только *криволинейные* системы координат, а в них координаты теряют свой привычный метрический характер, а время — свой привычный физический смысл.

Вопрос о смысле координат в ускоренной системе отсчета долго мучил Эйнштейна. Он даже говорил, что решение этого вопроса на целые годы задержало построение теории тяготения: «не так легко освободиться от представления, что координаты имеют прямой метрический смысл».

Разрешение всех этих вопросов могло быть дано лишь на основе новой принципиальной идеи. Такой новой идеей стала идея о связи гравитации с геометрией.

Гравитация и геометрия



«Диск Эренфеста». В 1909 г. вышла короткая заметка П. Эренфеста, в которой доказывался парадоксальный результат: абсолютно твердый цилиндр (или диск) невозможно привести во вращение вокруг его центральной оси, так как это противоречило бы частной теории относительности. В самом деле, если бы диск вращался, то длина его окружности, вследствие лоренцева сокращения, уменьшалась бы, в то время как его радиус, будучи перпендикулярным направлению линейной скорости вращения его точек, оставался бы без изменения. Отношение длины окружности диска к его диаметру перестало бы равняться числу π . Этот мысленный эксперимент составляет содержание так называемого «парадокса Эренфеста».

Равномерно вращающаяся система отсчета — это аналог равноускоренной системы отсчета. Эйнштейн воспринял этот парадокс как доказательство того, что при переходе в ускоренную систему отсчета евклидовы метрические соотношения нарушаются: геометрия пространства перестает быть евклидовой. Но равноускоренная система отсчета эквивалентна однородному гравитационному полю. Это наводило на мысль о связи гравитационного поля с геометрией пространства: *гравитационное поле вызывает отклонение геометрии пространства от евклидовой.*

Геометрия и истина. Как возможно, чтобы пространство описывалось различными, исключаяющими одна другую геометриями — евклидовой и какой-то другой? Не противоречит ли это логике? Или хотя бы здравому смыслу? Ведь тогда непонятно, что вообще считать истиной в науке о свойствах пространства.

Задайте математику вопрос: что в математике есть истина? Например, истинны ли такие высказывания, как «сумма внут-

ренного углов треугольников равна 180 градусов» или «квадрат длины гипотенузы равен сумме квадратов длин катетов»? Математик ответит вам: в гиперболической геометрии Лобачевского — Больяи сумма углов треугольника всегда меньше 180 градусов, в сферической геометрии Римана — всегда больше 180 градусов. Второе высказывание (теорема Пифагора) также не есть истина ни в одной из этих двух геометрий. Из всех известных геометрий оба приведенные высказывания истинны только в одной, самой древней, — геометрии Евклида.

С появлением геометрий, отличных от геометрии Евклида, зашаталось само понятие истины в математике. Со времен древних греков абсолютная истинность математических высказываний гарантировалась *доказательством*, основанным на принципе дедукции и аристотелевой формальной логике. Формальная логика используется и по сей день, на каждом шагу при выводе любой теоремы. Не случайно поэтому Н. Бурбаки (коллективный «автор» энциклопедического курса современной математики) утверждает: «математики всегда верили, что доказывают истины, или истинные высказывания», добавляя к этому: «то, что было доказательством для Евклида, остается доказательством и в наших глазах».

Видимо, следует внести уточнение в слова Бурбаки: математики могли верить, что доказывают абсолютные истины, лишь до 1829 г., когда Н. И. Лобачевский (1792–1856) открыл первую неевклидову геометрию; а если быть совсем точным — до 70-х годов XIX века, настолько затянулось признание новой геометрии среди математиков. С этого момента абсолютная истина исчезла, по крайней мере из геометрии: одно и то же утверждение в одной из геометрий могло быть верным, а в другой — ложным.

Неевклидовы геометрии. Обе геометрии — старая и новая — различались в своих основаниях (аксиоматиках) лишь формулировкой одной аксиомы — о параллельных. Аксиома Евклида (его пятый постулат) утверждала то, что уверенно отвечает на экзамене школьник: через точку в плоскости, не лежащую на данной прямой, можно провести одну и только одну прямую, параллельную данной. Между тем соответствующая аксиома геомет-

рии Лобачевского гласит, что через эту точку можно провести более одной прямой, не пересекающей данную, а геометрия Римана утверждает, что вообще не существует непересекающихся прямых.

По историческим свидетельствам, уже со времен античной древности математиков смущала не совсем полная *очевидность* V постулата Евклида, и многие высказывали предположение, что V постулат — не аксиома, а теорема, т. е. что он может быть выведен из остальных аксиом евклидовой геометрии.

На протяжении более двух тысячелетий огромным количеством математиков были предложены различные «доказательства» V постулата. Итог им всем подвел Лобачевский: они «могут назваться только пояснениями, но никак не в полной мере строгими математическими доказательствами». Безуспешность многовековых усилий математиков привела Лобачевского к мысли, что V постулат Евклида *не может быть доказан*; его нельзя вывести из остальных аксиом, потому что он от них независим. Тогда можно было сделать дерзкое, «сумасшедшее» предположение, которое и сделал Лобачевский и, независимо, Гаусс и Бolyai. Они предположили, что если в основу геометрии положить не V постулат Евклида, а его отрицание, оставив при этом все остальные аксиомы Евклида неизменными, то получится совсем новая и столь же непротиворечивая геометрия.

Так и получилось: в новой геометрии, которую особенно широко развил Лобачевский, не находилось никаких противоречий. Но следовало ли отсюда, что их в ней не найдется? Формальная логика неумолима: из двух исключających друг друга геометрий только одна может быть истинной. Значит, в одной из этих геометрий должно заключаться противоречие. Между тем в геометрии Евклида не было обнаружено ни одного противоречия за все 2200 лет ее существования. Было очевидно: противоречие должно найтись в новой геометрии.

К общему огорчению, в новой геометрии после 40 лет специальных поисков не удалось обнаружить ни одного внутреннего противоречия, т. е. ни одной теоремы, которую можно было бы получить в этой геометрии вместе с утверждением, отри-

чающим эту теорему. Более того, было доказано, что если геометрия Лобачевского противоречива, то противоречива и геометрия Евклида. Удалось найти модель («интерпретацию») новой геометрии в рамках старой. Этим самым между обеими геометриями был установлен изоморфизм (соответствие), из которого следовало, что любое противоречие в одной из геометрий неизбежно влекло бы за собой такое же противоречие в другой. Иными словами, в логическом отношении новая геометрия была столь же совершенной, как и традиционная евклидова геометрия, не больше, но и не меньше. А поскольку в логической непогрешимости геометрии Евклида решительно никто не сомневался, то оба полученных доказательства (интерпретации Ф. Клейна, 1871 г., и А. Пуанкаре, 1882 г.) так и стали называть — «доказательствами непротиворечивости геометрии Лобачевского».

Основная идея этого доказательства может быть наглядно проиллюстрирована на случае двумерной геометрии (планиметрии) Лобачевского. Построим модель этой двумерной геометрии в виде геометрии на некоторой кривой поверхности — гиперboloиде — в трехмерном евклидовом пространстве (рис. 29.1). При этом будем заменять понятия прямых (кратчайших линий в мире Евклида) на *геодезические линии* — линии кратчайшей длины

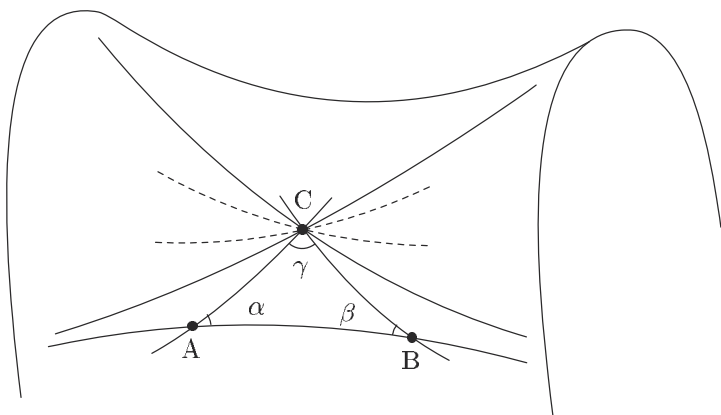


Рис. 29.1. Двумерная модель пространства Лобачевского

на гиперboloиде (этими линиями являются кривые — гиперболы, образующие гиперboloид). Тогда все утверждения относительно прямых в геометрии Лобачевского перейдут в соответствующие утверждения о свойствах «прямых» — кратчайших линий на гиперboloиде. Так, на рис. 29.1 пояснено отрицание V постулата Евклида. Через точку C , не лежащую на выбранной гиперболе AB , проходят две гиперболы, которые не пересекаются с AB . Следовательно, все другие гиперболы, изображенные штриховыми линиями, не будут пересекать AB . На рис. 29.1 изображен также треугольник ABC , образованный пересечением трех гипербол. Легко понять, что сумма его углов $\alpha + \beta + \gamma$ меньше 180 градусов. По указанным причинам первую неевклидову геометрию (геометрию Лобачевского) в литературе часто называют гиперболической.

Аналогичную, и даже более простую интерпретацию можно построить для «сферической» геометрии Римана. Как и для геометрии Лобачевского, проиллюстрируем ее на двумерной модели (рис. 29.2). Вместо прямых евклидова пространства в сферической геометрии Римана также выступают геодезические — кратчайшие линии на сфере: таковыми являются дуги больших кругов. Из рис. 29.2 видно, что понятие параллельных линий, содержащееся в V постулате Евклида, в сферической геометрии вообще теряет всякий смысл, ибо любая дуга большого круга, проходящая через точку C , лежащую вне линии AB , обязательно пересекает линию AB , причем в двух точках. Из рис. 29.2 также видно, что сумма углов треугольника ABC , образованного пересечением трех «прямых» — трех дуг большого круга, — всегда больше 180 градусов.

Все, что было здесь проиллюстрировано для двумерной геометрии (планиметрии) Римана, остается справедливым и для ее стереометрии. Самым существенным моментом трехмерного пространства Римана является конечность его объема, так что, двигаясь все время в одном и том же направлении — вдоль «прямой», — в конце концов мы возвращаемся в первоначальную точку. Эта идея Римана привела потом к постановке вопроса о конечности физического пространства.

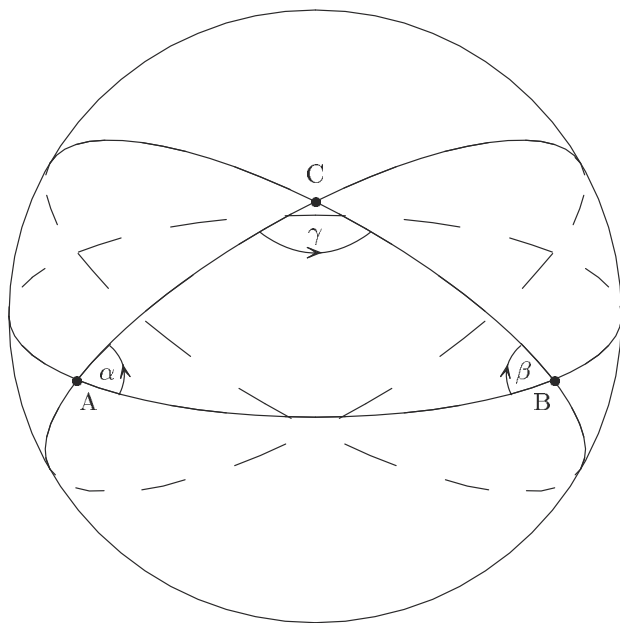


Рис. 29.2. Двумерная модель пространства Римана.

Теперь можно ответить на поставленный выше вопрос: как возможны различные геометрии? Геометрии Евклида, Лобачевского и Римана существенно различны потому, что они описывают не одно пространство, а совершенно различные по своим свойствам пространства. Евклидова геометрия описывает «плоское» пространство, тогда как геометрии Римана и Лобачевского — это геометрии так называемых *искривленных* пространств. Первая из них описывает пространство постоянной положительной кривизны (трехмерная сфера), а вторая — пространство постоянной отрицательной кривизны (трехмерный гиперboloид).

Геометрия и опыт. К идее о возможности неевклидовой геометрии еще ранее Лобачевского пришел К. Ф. Гаусс (1777–1855), но он не решился опубликовать свои результаты, боясь, видимо, что они вызовут неприятие со стороны математиков (так это и случилось с Лобачевским: его результаты были признаны —

причем не в России, а в Европе — лишь через 20 лет после его смерти).

Убедившись в возможности непротиворечивой геометрии, отличной от евклидовой, Гаусс, в отличие от И. Канта, не считал более геометрические истины плодом человеческого «чистого разума». Развеялось, как дым, представление И. Канта о том, что пространство априорно — лежит вне опыта ощущений, так что структура пространства изначально присуща человеческому разуму. Оказалось, что пространство лежит не вне опыта ощущений, но вне чистого разума. Разум не может сказать нам, какая из геометрий истинна: «необходимость нашей (евклидовой) геометрии не может быть доказана, по крайней мере человеческим умом для человеческого ума» (Гаусс).

Гаусс и Лобачевский признали, что принципы (постулаты) геометрии должны выводиться не из человеческого ума, а из человеческого опыта. Только физический опыт мог теперь дать ответ на вопрос, какая геометрия истинна, т. е. описывает реальное физическое пространство. Геометрия становилась *частью физики*. И Гаусс, и Лобачевский предложили каждый свой способ экспериментальной проверки геометрии физического пространства. Гаусс измерял сумму углов треугольника, образованного тремя горными вершинами, а Лобачевский выбрал значительно больший треугольник: его вершинами были астрономическая обсерватория на Земле и две далекие звезды.

Однако ни измерения Гаусса, ни астрономические наблюдения Лобачевского не дали и, как нам теперь хорошо известно, не могли тогда дать ответ на поставленный вопрос. Дело было даже не в недостаточной точности астрономических измерений в те годы (как часто думают). Дело было в том, что связь геометрии с наблюдениями определялась закономерностями не открытой еще тогда общей теории относительности. Только учет ее эффектов позволил бы правильно рассчитать эксперимент. Между тем теория Эйнштейна непосредственно вскрыла связь геометрии с распределением и движением масс, еще не известную ни Гауссу, ни Лобачевскому.

Понятие о многообразии. Риманова геометрия



Гаусс проложил дорогу новой идее, развитой потом его учеником Г. Б. Риманом (1826–1866), который известен не только открытием сферической геометрии, но и еще более важным открытием *дифференциальной геометрии пространств любого числа измерений*. Эти пространства были названы *n -мерными многообразиями*, или *римановыми пространствами*.

Гаусс построил теорию так называемой внутренней геометрии двумерных кривых поверхностей. Обычно мы изучаем геометрию на поверхности, например, на сфере, считая последнюю частью трехмерного евклидова пространства. Но отвлечемся от того, что сфера вложена в пространство, — будем рассматривать поверхность сферы как пространство само по себе. Для изучения такого *искривленного* пространства нельзя использовать прямолinéйные координаты: выбирают криволинейные координаты — например, на сфере удобно выбрать географические широту и долготу (систему криволинейных координат иногда называют «картой», по образу и подобию географической карты). Гаусс показал, что геометрия такого двумерного пространства, т. е. измерение в нем длин, углов и площадей полностью определяется заданием следующей *квадратичной формы* относительно дифференциалов координат:

$$ds^2 = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2, \quad (30.1)$$

где u, v — криволинейные координаты на поверхности, а коэффициенты E, F, G — функции координат u и v .

Величина ds называется *линейным элементом*, или *метрикой* поверхности. Она выражает расстояние между двумя точка-

ми, координаты которых u и v отличаются на бесконечно малые величины.

Гауссовы понятия и методы описания двумерных поверхностей оказалось возможным непосредственно перенести на трехмерные искривленные пространства. Такое пространство, вообще говоря, неоднородно, ибо свойства его изменяются от точки к точке (в двумерном случае это выражается в том, что коэффициенты в формуле (30.1) — не постоянны, а зависят от координат точки). Поэтому свойства такого пространства задаются локально, через расстояние ds между бесконечно близкими точками. Этот подход получил название дифференциальной геометрии, в отличие от геометрии пространства в целом, которую рассматривал Евклид.

Искривленные пространства стали называться *многообразиями*: именно, элементарное многообразие — это любое множество точек, на котором можно ввести систему криволинейных координат — «карту», с точностью до перехода в любую другую «карту» в окрестности данной точки. В целом же многообразие может быть покрыто не одной картой, а набором карт («атласом» карт). Тогда геометрия любого трехмерного многообразия задается квадратом бесконечно малого расстояния в виде

$$\begin{aligned} ds^2 = & g_{11}dx^1{}^2 + g_{12}dx^1dx^2 + g_{13}dx^1dx^3 \\ & + g_{21}dx^2dx^1 + g_{22}dx^2{}^2 + g_{23}dx^2dx^3 \\ & + g_{31}dx^3dx^1 + g_{32}dx^3dx^2 + g_{33}dx^3{}^2, \end{aligned} \quad (30.2)$$

где g_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) — функции криволинейных координат x_1, x_2, x_3 из выбранной «карты»; $g_{ij} = g_{ji}$, и правая часть положительна при всех значениях g_{ij} .

Выражение (30.2) для ds^2 представляет собой обобщение формулы Евклида

$$ds^2 = dx^1{}^2 + dx^2{}^2 + dx^3{}^2, \quad (30.3)$$

которую в свою очередь можно рассматривать как трехмерный вариант теоремы Пифагора. Как видим, в евклидовом пространстве коэффициенты g_{ij} постоянны: $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$, $g_{ij} = 0$

при $i \neq j$. Это означает, что евклидово пространство однородно: его свойства одинаковы в любой точке. Допуская зависимость коэффициентов g_{ij} от координат, Риман тем самым учитывал, что свойства многообразия меняются от точки к точке.

Обобщая потом эти рассуждения, Риман в 1854 г. построил дифференциальную геометрию произвольных n -мерных «искривленных» пространств, или n -мерных многообразий («риманова геометрия»). Геометрические свойства римановых многообразий, меняясь от одной точки к другой, полностью определяются метрикой — квадратичной формой от дифференциалов криволинейных координат в какой-либо «карте». Заметим, что сами эти координаты геометрического смысла не имеют — замена их на любые другие n координат ничего не меняет в описании геометрических свойств многообразия. Геометрия многообразия не зависит от выбора «карты». Непосредственный геометрический смысл имеют коэффициенты квадратичной формы g_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$). Они и определяют линейный элемент ds , задающий геометрию риманова пространства.

Пространства общей теории относительности



Псевдориманово пространство-время. В связи с утратой криволинейными координатами прямого физического смысла оказалось весьма трудно предвидеть, какова та математическая структура, которою следует описывать гравитационное поле.

Однако вспомним, что Эйнштейн обобщал, а не отвергал частную теорию относительности, которая объединила трехмерное пространство и одномерное время в единый комплекс — 4-мерное пространство, называемое пространством Минковского. Пространство Минковского (или «плоское пространство-время») — это 4-мерное многообразие E_4^2 , в котором квадрат интервала между двумя событиями (мировыми точками) может быть записан в виде:

$$(\Delta s)^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta l)^2 = \overset{\circ}{g}_{\alpha\beta} \Delta x^\alpha \Delta x^\beta . \quad (31.1)$$

Греческие индексы здесь и в дальнейшем принимают четыре значения: 0, 1, 2, 3, причем $c\Delta t = \Delta x^0$ и Δx^i ($i = 1, 2, 3$) — разности моментов времени и декартовых координат точек, в которых происходят два события, а $\overset{\circ}{g}_{\alpha\beta}$ — так называемый *метрический тензор* пространства Минковского:

$$\overset{\circ}{g}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} . \quad (31.2)$$

Здесь и далее используется известное «правило суммирования» Эйнштейна, упрощающее запись соотношений: по любым двум повторяющимся (в одном и том же слагаемом) индексам подразумевается сумма слагаемых в пределах тех значений, которые

принимают такие индексы. Напомним, что пространство Минковского является *псевдоевклидовым* (иногда говорят — квазиевклидовым) 4-мерным многообразием (евклидовым оно было бы, если бы все знаки при единицах в матрице (31.2) были одинаковыми). Инвариантным (одинаковым) во всех инерциальных системах отсчета остается не в отдельности Δt (промежуток времени) и Δl (расстояние), а интервал Δs .

Идея о связи гравитации с геометрией пространства естественным образом должна была трансформироваться в идею описания гравитационных полей с помощью геометрии 4-мерного пространства. В этом новом аспекте гравитационные эффекты связывались с отклонением геометрии 4-мерного пространства-времени от «плоской», или псевдоевклидовой геометрии.

Это значило, что гравитационное поле следовало описывать через геометрию совсем нового 4-мерного многообразия V_4 . В отличие от пространства Минковского E_4^2 , это многообразие — не плоское, а искривленное. Этот факт выражается в том, что если в пространстве E_4^2 всегда можно выбрать специальную, привилегированную «карту», такую, в которой коэффициенты $g_{\alpha\beta}$ будут постоянными величинами, — это будут величины (31.2), а соответствующая карта есть система прямоугольных координат, реализующая инерциальную систему отсчета, — то в многообразии V_4 это невозможно: в нем прямоугольных координат не существует (мы это уже видели на примере двумерного многообразия — сферы S_2).

Не следует забывать также, что Эйнштейн искал *полевую* теорию гравитации, которая к тому же должна была содержать в себе частную теорию относительности как предельный случай. В соответствии с локальным характером принципа эквивалентности, в бесконечно малой окрестности каждой мировой точки (события) выполняется закон инерции. Это значит, что в окрестности мировой точки всегда может быть введена так называемая *локально-инерциальная* система координат — такая, в которой метрика имеет вид (31.2). Разница со случаем частной

теории относительности состоит в том, что такой вид метрика принимает только локально, а не во всем многообразии V_4 . Поэтому квадрат интервала ds^2 выражается уже не через конечные приращения, а через дифференциалы координат — в виде квадратичной формы с постоянными коэффициентами:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = dx^{0^2} - dx^{1^2} - dx^{2^2} - dx^{3^2}. \quad (31.3)$$

Метрика (31.3) есть предельный случай метрики, или линейного элемента ds многообразия V_4 , квадрат которого в общем случае имеет вид

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta, \quad (\alpha, \beta = 0, 1, 2, 3), \quad (31.4)$$

где коэффициенты $g_{\alpha\beta}$ уже не постоянны: они являются функциями координат x^i ($i = 1, 2, 3$) и времени ($x^0 = ct$). Метрика (31.3) реализуется только в «касательном» (плоском) пространстве данной мировой точки, подобно тому как плоская метрика $ds^2 = du^2 + dv^2$ реализуется лишь в касательной плоскости к сфере S_2 .

Четырехмерное многообразие, метрика которого в любой заданной мировой точке может быть приведена к псевдоевклидову виду (31.3), называется *псевдоримановым пространством*. Касательное пространство к нему в любой точке есть пространство Минковского. Это значит, что в каждой точке псевдориманового пространства существует свой световой конус, разделяющий для наблюдателя, находящегося в этой точке, временноподобные линии от пространственноподобных.

Эйнштейн уже к 1912 году осознал то, что явилось полным переворотом в учении о тяготении: тяготение существует благодаря тому, что физическое пространство есть 4-мерное псевдориманово пространство, не сводящееся *в целом* к пространству Минковского. Однако понадобилось еще три года, прежде чем теория была завершена.

Причиной задержки являлся осознанный Эйнштейном неметрический характер криволинейных координат. Дело было в том, что криволинейные координаты возможно вводить

не только в искривленном, но и в плоском (евклидовом или псевдоевклидовом) многообразии. Метрика плоского многообразия приобретала тогда в нем общий вид (31.4), характерный для искривленного многообразия. Однако очевидно, что такой вид метрики обусловлен исключительно введением криволинейных координат. Между тем, как нам уже известно, геометрия многообразия не может зависеть от выбора карты — системы координат на нем.

Возникла задача: как отделить нефизический эффект, связанный с выбором карты и не влияющий на геометрию, от геометрического эффекта, имеющего физическое проявление в виде поля тяготения? Или, иначе: как по заданному виду метрики $g_{\alpha\beta}$ в некоторой карте определить, отвечает ли она плоскому или искривленному многообразию?

Гравитация как поле кривизны пространства-времени.

Поясним эту проблему на примере плоского пространства-времени E_4^2 , в котором метрика всюду может быть записана в прямоугольной системе координат в виде (31.3). При переходе к любой другой инерциальной системе отсчета (т. е. при преобразовании Лоренца) интервал ds , как мы знаем, сохраняет тот же самый вид. Однако, если мы перейдем (во всем пространстве-времени) к неинерциальной системе отсчета, то ds^2 уже не будет суммой квадратов четырех координат. В качестве примера посмотрим, какой вид примет интервал (31.3) при переходе к равномерно вращающейся системе координат. Пусть x, y, z, t — координаты точки в инерциальной системе отсчета, x', y', z', t — ее координаты в системе отсчета, равномерно вращающейся вокруг оси z (совпадающей с осью z'). Формулы перехода имеют вид:

$$x = x' \cos \Omega t - y' \sin \Omega t, \quad y = x' \sin \Omega t + y' \cos \Omega t, \quad z = z', \quad (31.5)$$

где Ω — угловая скорость вращения. Подставляя эти выражения в уравнение (31.3), получаем для интервала в новой системе ко-

ординат выражение:

$$ds^2 = \left[c^2 - \Omega^2 (x'^2 + y'^2) \right] dt^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2 + 2\Omega y' dx' dt - 2\Omega x' dy' dt . \quad (31.6)$$

В одном и том же пространстве — пространстве Минковского — мы записали один и тот же квадрат интервала в двух разных видах: (31.3) и (31.6). Различие между ними — в том, что коэффициенты $g_{\alpha\beta}$ в квадратичной форме (31.3) постоянны, а аналогичные коэффициенты в квадратичной форме (31.6) являются функциями координат: метрика (31.6) имеет такой же общий вид, как и метрика (31.4) в искривленном 4-мерном многообразии V_4 .

Функции $g_{\alpha\beta}$ образуют так называемый тензор второго ранга (по числу индексов). Этот тензор симметричен: $g_{\alpha\beta} = g_{\beta\alpha}$ (вследствие симметричности квадратичной формы), так что из 16-ти компонент этого тензора, если его записать по типу матрицы (31.2), независимых будет только 10. Подробнее понятие тензора мы разъясним чуть позже.

Криволинейные координаты x^α ($\alpha = 0, 1, 2, 3$) утрачивают физический смысл — поэтому физический смысл интервала естественно переносится на компоненты тензора $g_{\alpha\beta}$. Он носит название *метрики* пространства-времени, потому что именно он, а не координаты имеет подлинный метрический смысл. Будучи функциями координат и в общем случае также времени, они образуют *поле*. Что это за поле? Нельзя ли придать ему какой-либо наглядный смысл?

Легко понять, что если применить преобразование, обратное к преобразованию (31.5), т. е. перейти из вращающейся системы отсчета снова в инерциальную, то метрика (31.6) снова примет вид (31.3) — компоненты метрики станут постоянными. Это и есть характерное свойство инерциальной системы отсчета: из всех возможных систем отсчета инерциальные — это те, в которых значения $g_{\alpha\beta}$ становятся постоянными. В криволинейных координатах в плоском пространстве-времени функции $g_{\alpha\beta}$ не могут быть постоянными, но их зависимость от координат

и времени возникает *только вследствие перехода в ускоренную систему отсчета*. Если связывать с ними какой-либо наблюдаемый физический эффект, то это будет эффект поля сил инерции. Силы инерции — таковы, что их можно «оттрансформировать», т. е. обратить в нуль переходом в инерциальную систему отсчета.

Пространство Минковского с интервалом вида (31.1) часто называли пространством «без поля» (имелось в виду — без гравитационного поля: описание поля тяготения сразу же требовало перехода к неинерциальной системе отсчета). Эйнштейн расширил понятие поля. Пустое пространство, т. е. пространство без поля, не существует. Нет «абсолютного пространства», нет вообще пространства какместилища тел, существующего независимо от материи и поля (а так понималось пространство и в классической механике, и в частной теории относительности). Согласно новому взгляду Эйнштейна на гравитацию, пространство-время существует как структурное свойство гравитационного поля. Гравитационное поле, следовательно, присутствует даже в пространстве Минковского, но это — поле специального вида, которое стали называть *галлилеевым* полем. Это такое поле, которое в инерциальной системе отсчета принимает постоянное значение и выражается матрицей (31.2). Оно проявляет себя в инерции тел: в таком поле тела движутся равномерно по прямым. В неинерциальной (криволинейной) системе отсчета, с непостоянными коэффициентами $g_{\alpha\beta}$, это поле проявляет себя в виде сил инерции. Можно сказать, коэффициенты $g_{\alpha\beta}$ играют в данном случае роль гравитационных потенциалов для сил инерции.

Как видим, общая метрика вида (31.4) может характеризовать и истинное гравитационное поле, и фиктивное поле сил инерции. Как по заданному виду функций $g_{\alpha\beta}$ определить, описывают ли они истинное гравитационное поле в заданной *конечной* области пространства? (В бесконечно малой окрестности точки, как мы знаем, гравитационное поле не отличается от поля сил инерции). Математически вопрос ставится так. Если задана метрика $g_{\alpha\beta}$, то существует ли система отсчета (она, очевидно, будет инерциальной), в которой метрика примет галиле-

ев вид (31.2)? Если бы это было всегда возможно, то, очевидно, «гравитационное поле» сводилось бы только к галилееву полю либо к полю сил инерции. Интуитивно можно догадаться, что это возможно не всегда — мы уже видели, что на больших расстояниях гравитационные поля принципиально отличаются и от галилеева поля, и от сил инерции. Следовательно, требуется найти критерий, позволяющий отличать истинное гравитационное поле от фиктивных полей сил инерции.

Решение гравитационной проблемы сводилось уже к чисто математической задаче. «С этой задачей в голове, — вспоминает Эйнштейн, — я навестил в 1912 г. моего старого студенческого друга Марселя Гроссмана, который тем временем стал профессором математики в Швейцарском политехникуме».

Разобравшись в этой математической проблеме, Гроссман сообщил Эйнштейну, что эта проблема уже была решена Риччи и Леви-Чивитой в теории n -мерных многообразий, основы которой были заложены Риманом и Кристоффелем. Ответ внешне был простым: метрика $g_{\alpha\beta}$ галилеева в том и только том случае, если тензор Римана $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$, составленный из первой и второй частных производных от $g_{\alpha\beta}$, равен нулю.

Математически тензор Римана удобно выражать через *символы Кристоффеля* $\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}$, связанные с метрикой $g_{\alpha\beta}$ в виде¹

$$\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} = \frac{1}{2}g^{\mu\nu} \left(\frac{\partial g_{\alpha\nu}}{\partial x^{\beta}} + \frac{\partial g_{\beta\nu}}{\partial x^{\alpha}} - \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x^{\nu}} \right). \quad (31.7)$$

¹ Заметим, что в этих формулах мы употребляем как нижние («ковариантные»), так и верхние («контравариантные») индексы. Операция поднятия или опускания индексов употребляется в исчислении Римана–Риччи для удобного получения скаляров из тензорных величин. Так, для этой цели в выражении для скаляра — интервала (31.4) — мы употребили дифференциалы координат с верхними индексами: $dx^{\alpha} = g^{\alpha\mu}dx_{\mu}$. Как видим, сама эта операция осуществляется с помощью метрического тензора $g_{\alpha\beta}$, называемого ковариантным тензором, или с помощью обратной матрицы — контравариантного метрического тензора $g^{\alpha\beta}$.

Тогда сам тензор Римана может быть представлен формулой¹

$$R^{\lambda}_{\alpha\nu\mu} = \frac{\partial \Gamma^{\lambda}_{\alpha\mu}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial \Gamma^{\lambda}_{\alpha\nu}}{\partial x^{\mu}} + \Gamma^{\sigma}_{\alpha\mu} \Gamma^{\lambda}_{\sigma\nu} - \Gamma^{\sigma}_{\alpha\nu} \Gamma^{\lambda}_{\sigma\mu} . \quad (31.8)$$

Эйнштейну стало ясно: истинное гравитационное поле — это поле тензора Римана. Когда оно отсутствует, мы имеем лишь поле фиктивных сил (или отсутствие всяких сил — в галилеевом случае). Если же $R_{\alpha\beta\gamma\delta} \neq 0$, то в данной области имеет место истинное гравитационное поле. В этом случае метрика не может принять галилеев вид (31.2) во всей области: к такому виду метрику можно привести лишь в одной мировой точке.

Что же касается поля тензора $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$, то «оттрансформировать» его (обратить в нуль преобразованием системы отсчета) нельзя даже ни в одной точке. Это вытекает из характерных тензорных свойств величины $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$: вследствие специального тензорного закона преобразования этой величины при переходе в другую систему отсчета выполняется правило — если эта величина в данной мировой точке равна нулю хотя бы в одной системе отсчета, то она в этой точке будет равна нулю и в любой другой системе отсчета. И наоборот: если $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ отличен от нуля хотя бы в одной системе отсчета, то он отличен от нуля и в любой другой.

По этой причине тензор Римана называют также *тензором кривизны* пространства-времени — он характеризует искривленность многообразия в целом, а следовательно, это есть основная величина, характеризующая гравитационное поле. Гравитационное поле есть поле тензора кривизны пространства-времени.

Так была уловлена математическая величина, описывающая гравитационное поле. Тензор Римана отличен от нуля во всех точках искривленного пространства-времени и в любой системе отсчета — этим и объясняется, почему гравитационное поле универсально. Так было получено, наконец, объяснение «всемирности» тяготения. И так была впервые вскрыта *природа* гравитационного поля: тяготение есть искривленность пространства-

¹ Тензор $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ получается из приведенного здесь тензора (31.8) с помощью опускания индекса: $R_{\alpha\beta\gamma\delta} = g_{\alpha\lambda} R^{\lambda}_{\beta\gamma\delta}$.

времени. Из-за специальных свойств симметрии тензора Римана (он симметричен по каждой паре индексов (α, β) и (δ, γ) и не меняется также при перестановке самих этих пар индексов), из 256 компонент этого тензора в 4-мерном пространстве независимыми являются только 20. Комплекс из этих 20 величин есть гравитационное поле. Этот результат был опубликован в совместной статье Эйнштейна и Гроссмана 1913 года.

Уравнения гравитационного поля



Эвристический характер их поиска. Найдя математическую величину, характеризующую гравитационное поле, требовалось получить уравнения, которые описывают закон тяготения — закон, который должен был придти на смену закону Ньютона. Одновременно, согласно известному уже нам принципу соответствия, эти уравнения должны были представлять обобщение закона Ньютона — содержать этот закон в качестве предельного частного случая.

Мы не будем выводить здесь уравнения гравитационного поля. И не только потому, что это выходит за рамки данной книги. Главное в том, что основные уравнения физики, такие как уравнения Ньютона, Максвелла, Эйнштейна и другие, не выводились, а открывались. Всякий раз, когда говорят об их выводе, на самом деле либо вводят некие постулаты или принципы, эквивалентные этим уравнениям, и от них приходят к самим уравнениям, либо формулируют ряд наводящих (эвристических) положений, которые лишь поясняют, упрощают восприятие этих уравнений. Именно по этому последнему пути шел Эйнштейн. Этот путь подобен ньютоновскому методу индукции. В своих поисках Эйнштейн меньше всего стремился к исходной аксиоматической стройности и логичности вывода. Гипотеза, а не вывод, конструкция, а не дедукция — так можно было охарактеризовать способ, с помощью которого Эйнштейн пришел к своим уравнениям гравитационного поля.

Например, чисто логически, из вида метрики (31.4), характеризующей потенциалы сил инерции, нельзя было сделать вывод, что такой же точно вид имеют и потенциалы гравитационного поля. Эйнштейн принял это не как вывод, а как гипотезу —

превратил $g_{\alpha\beta}$ в гравитационные потенциалы, подчинив их дополнительному условию $R_{\alpha\beta\gamma\delta} \neq 0$. При этом условия коэффициенты $g_{\alpha\beta}$ из метрики *плоского* пространства-времени, записанной в неинерциальной системе отсчета, превращались в *риманову* метрику, описывающую линейный элемент ds искривленного 4-мерного многообразия.

Лишь придя к уравнениям гравитационного поля на основе чисто эвристических (стало быть, не выводимых, а гипотетических) идей, Эйнштейн мог сформулировать стройную и математически очень изящную теорию, в основу которой легли его *открытые* (не выведенные) уравнения поля. Только после этого стало возможно говорить уже о дедуктивном построении общей теории относительности и даже о ее аксиоматике.

Общая ковариантность. Какой вид должны были иметь уравнения гравитационного поля? Прежде всего они должны были сохранять свой вид при допустимых преобразованиях координат, определяющих новый, обобщенный принцип относительности. Эта новая группа преобразований должна была содержать нелинейные преобразования, т. е. стать обобщением группы линейных преобразований Лоренца.

В ускоренной системе отсчета координаты и время утрачивают свой привычный физический смысл: это уже не координаты в смысле классической механики и даже в смысле частной теории относительности, потому что они уже не являются координатами обычного евклидова пространства. При отождествлении гравитационного поля с псевдоримановым многообразием эти координаты становились криволинейными координатами многообразия: мы знаем, что при описании его геометрических свойств выбор этих координат безразличен. Из этого следовало, что при описании гравитационного поля физический смысл имеют вообще не координаты: мы измеряем линейкой и часами не разности координат и не разности моментов времени, а лишь инвариантный интервал ds 4-мерного пространства-времени.

Если криволинейные координаты утрачивают физический смысл, то безразлично, какую из криволинейных систем коор-

динат выбрать: все координатные системы оказываются равноценными. Нет вообще никакой физически преимущественной системы координат — допустимы любые системы координат. Это давало основание расширить группу допустимых преобразований на произвольные, в общем случае нелинейные, однозначные непрерывные преобразования. Такая группа преобразований координат называется *группой общей ковариантности*. Отвечающий ей принцип относительности был назван Эйнштейном *общим принципом относительности*, в отличие от *специального*, основанного лишь на линейных (лоренцевых) преобразованиях и лежащего в основе частной теории относительности. Отсюда произошло и название новой теории тяготения — общая теория относительности (ОТО).

Уравнения гравитационного поля, которые следовало теперь получить, должны были быть *общековариантными*, или ковариантными относительно произвольных (с точностью до некоторых необходимых требований) преобразований.

Если *инвариантность* уравнений относительно некоторых преобразований координат означает неизменность их вида при этих преобразованиях, то *ковариантность* означает, что при переходе к другой координатной системе каждый их член изменяется одинаковым образом. Это оказалось связанным с тем, что гравитационное поле потребовалось описывать особой математической величиной — *тензором*. Такие величины при переходе к другой системе координат преобразуются строго определенным образом.

Тензоры на многообразии. Второе требование к уравнениям гравитационного поля можно было высказать так: они должны быть тензорными. Это вытекало из геометрического смысла гравитационного поля, описываемого 4-мерным многообразием. Если в частной теории относительности (группа Лоренца) можно было написать инвариантное уравнение уже для простейшей величины — скалярного поля, то в новой теории тяготения, требовавшей более широкой группы непрерывных преобразований координат, инвариантные уравнения поля существуют только

для более сложной математической структуры — не для скаляра и не для вектора, а для *симметричного тензора*. С чисто математической точки зрения это, конечно, усложняло теорию. Но требование расширения группы преобразований диктовалось не математическими, а физическими доводами: они вынуждали принести более простую структуру поля в жертву более общему принципу относительности.

Тензор (точнее, *тензорное поле*) на многообразии — это совокупность величин, называемых компонентами тензора, заданных в каждой точке многообразия и преобразующихся при замене «карты» (системы криволинейных координат) вполне определенным, а именно линейным и однородным образом. Так, метрический тензор $g_{\alpha\beta}$ в данной мировой точке \mathcal{P} при произвольной замене координат $x^\alpha = f^\alpha(x'^\beta)$ преобразуется по закону

$$g'_{\mu\nu}(\mathcal{P}) = \frac{\partial x^\alpha}{\partial x'^\mu}(\mathcal{P}) \frac{\partial x^\beta}{\partial x'^\nu}(\mathcal{P}) g_{\alpha\beta}(\mathcal{P}) \quad , \quad (32.1)$$

где $\frac{\partial x^\alpha}{\partial x'^\mu}$, $\frac{\partial x^\beta}{\partial x'^\nu}$ — частные производные от прежних координат по новым, вычисленные в точке \mathcal{P} , а по повторяющимся индексам α и β в формуле (32.1), как обычно, подразумевается суммирование. Аналогичный закон преобразования можно записать для любого тензора, в том числе для тензора четвертого ранга — тензора Римана $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$.

Из линейного однородного закона преобразования типа (32.1) для тензора следует, что тензор, отличный от нуля в одной карте, будет отличен от нуля и в любой другой. Отсюда, в частности, следует тот факт, что тензор кривизны никаким преобразованием координат нельзя обратить в нуль ни в одной точке.

Дифференциальная структура законов физики. Далее, уравнения поля должны быть дифференциальными уравнениями второго порядка относительно гравитационных потенциалов.

Как показывает развитие физики, законы нашего мира таковы, что все основные уравнения, выражающие эти законы, содержат вторые производные. Так, уравнения электромагнитного поля Максвелла записываются через первые производные

от тензора электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$, компонентами которого являются составляющие напряженностей электрического (\vec{E}) и магнитного (\vec{H}) полей. Но сам тензор $F_{\mu\nu}$, выражается в свою очередь через первые производные от векторного потенциала A_μ электромагнитного поля:

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu}, \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3). \quad (32.2)$$

Таким образом, уравнения Максвелла записываются через вторые производные от 4-векторного потенциала электромагнитного поля в пространстве Минковского.

Так же обстоит дело и с уравнениями механического движения: слева в них стоит вторая производная — ускорение материальной точки d^2x/dt^2 . Для материальной точки, движущейся в поле тяжести центрального тела массы M , ускорение (g) может быть выражено через гравитационный потенциал $\Phi = kM/r$ (k — гравитационная постоянная Ньютона, r — расстояние материальной точки от центрального тела). Действительно, так как $g = kM/r^2$, а производная от потенциала $d\Phi/dr = -kM/r^2$, то $g = -d\Phi/dr$. По этой причине ускорение свободного падения g в ньютоновской теории можно называть напряженностью поля сил тяжести, аналогичной напряженности $F_{\mu\nu}$ электромагнитного поля, которая также выражается через первые производные электромагнитного потенциала.

Отсюда уже видно, что ньютоновскую теорию тяготения можно формулировать в понятиях поля — для этого достаточно лишь снять ньютоново требование мгновенной передачи взаимодействий. В электростатике силовые линии электрического поля всегда заканчиваются на зарядах, создающих поле, причем на заряде Q заканчивается $4\pi\lambda Q$ силовых линий (λ — это постоянная в законе Кулона $F_{12} = \lambda e_1 e_2 / r^2$). Точно так же можно представлять себе «силовые линии» ньютоновского гравитационного поля: на «заряде» (гравитационной массе) M заканчивается $4\pi kM$ силовых линий, где k — ньютоновская гравитационная постоянная.

Тогда закон тяготения Ньютона допускает полевое выражение, в полной аналогии с законом электростатического взаимодействия, в виде следующего дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 4\pi k \rho . \quad (32.3)$$

Решение уравнения (32.3) выражает гравитационный потенциал как функцию точки пространства, в котором распределена материя с плотностью ρ .

Уравнение (32.3), полученное Пуассоном еще в 1813 году, известно как *уравнение Пуассона*. Оно является дифференциальным выражением ньютоновского закона тяготения. В частном случае, отвечающем области пространства, в которой непосредственно не присутствуют источники поля тяготения, т. е. $\rho = 0$, правая часть обращается в нуль, и мы получаем *уравнение Лапласа*, известное с 1782 г.: $\Delta \Phi = 0$, где $\Delta \Phi$ (Δ — *оператор Лапласа*) обозначает выражение, стоящее в левой части (32.3).

Остается загадкой, каким образом уравнения Лапласа и Пуассона могли быть получены еще до создания полевой теории Максвелла. Правда, они относились только к статическим гравитационным полям, и после создания электромагнитной теории выяснилось, что уравнения Лапласа и Пуассона описывают также статические электрическое и магнитное поля. Так или иначе эти уравнения, вследствие своего полевого характера, привели к мысли о полевой природе гравитации и возможности динамического обобщения гравитационных уравнений Лапласа и Пуассона. В преддверии теории относительности математическая формулировка ньютоновского закона тяготения в виде уравнения (32.3) явилась мостом к полевой теории тяготения.

Построение уравнений гравитации. Уравнение (32.3) не инвариантно относительно преобразований Лоренца: оно инвариантно относительно преобразований Галилея. Пуанкаре и Нордстрем полагали, что для построения релятивистской полевой теории тяготения достаточно было оставаться в рам-

ках частной теории относительности — для этого требовалось видоизменить уравнение (32.3) так, чтобы обеспечить его лоренц-инвариантность: прибавить к левой части слагаемое $-(1/c^2)\partial^2\Phi/\partial t^2$.

Эйнштейн, понявший нереализуемость программы построения теории гравитации в рамках частной теории относительности, расширил принцип относительности до общей ковариантности. Общая ковариантность требовала, чтобы в обеих частях уравнений гравитационного поля стояли тензоры: только общий тензорный закон преобразования соответствовал произвольным преобразованиям координат. В правой части (32.3) вместо скалярной величины — плотности масс — должен стоять тензор. Так как из частной теории относительности мы знаем, что инертная масса тела эквивалентна энергии ($E = mc^2$), то в правую часть надлежало вместо плотности массы поставить тензор плотности энергии источников, создающих гравитационное поле. Такой тензор был уже построен в рамках частной теории относительности: это тензор энергии-импульса $T_{\mu\nu}$. Для простейшего источника поля — непрерывно распределенной пылевидной материи — тензор энергии-импульса имеет вид

$$T_{\mu\nu} = \rho c^2 u_\mu u_\nu. \quad (32.4)$$

Здесь ρ — плотность масс, c — скорость света в вакууме, а u_μ — (ковариантный) вектор 4-скорости частицы, направленный по касательной к мировой линии этой частицы (геометрический смысл его компонент разъясняется в главе 23, посвященной релятивистской динамике).

Выражение (32.4), имеющее тензорный вид, остается тензорным и при любых общековариантных преобразованиях. Поэтому соотношение (32.4) для тензора энергии-импульса сохраняется и в общей теории относительности.

В левой части уравнений вместо $\Delta\Phi$ тоже должен стоять тензор, причем тензор, определяющий собой геометрические свойства 4-мерного многообразия. Чтобы служить обобщением величины $\Delta\Phi$, этот тензор должен, очевидно, выражаться через вторые производные от гравитационных потенциалов, на этот раз

не только по координатам (x^1, x^2, x^3) , но и по времени (x^0) . Роль гравитационных потенциалов теперь играют не одна скалярная величина, а 10 компонент метрического тензора $g_{\alpha\beta}$.

В качестве «строительного материала» для построения левой части мы имеем 10 компонент метрики $g_{\alpha\beta}$, а также 40 первых производных от $g_{\alpha\beta}$ по четырем координатам. Вместо них удобнее воспользоваться 40 символами Кристоффеля, выражающимися через первые производные от метрики в виде формулы (31.7). Между тем простейший тензор в римановой геометрии, который можно построить из компонент метрического тензора, его первых и вторых производных, — это тензор Римана $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$. Из него путем так называемой операции «свертывания» (суммирования по повторяющемуся индексу) получается только один тензор второго ранга — тензор Риччи

$$R_{\alpha\beta} = R^{\lambda}_{\alpha\lambda\beta} \quad (32.5)$$

и только один мировой скаляр

$$R = R_{\alpha\beta} g^{\alpha\beta} . \quad (32.6)$$

Тогда гравитационные уравнения примут, наконец, тот вид, в котором Эйнштейн получил их в 1915 г.:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}R g_{\alpha\beta} = \kappa T_{\alpha\beta} . \quad (32.7)$$

Здесь $\kappa = 8\pi k/c^4$ — *гравитационная постоянная Эйнштейна*, выражающаяся через гравитационную постоянную Ньютона k и скорость света в вакууме c . Второй член в левой части добавляется из того соображения, чтобы ее «расходимость» в смысле абсолютного дифференциального исчисления (т. е. дивергенция) тождественно равнялась нулю. Этим обеспечивается выполнение локального закона сохранения тензора энергии-импульса из правой части.

Основная идея общей теории относительности. Физическая идея построения уравнений Эйнштейна нуждается в пояснении. Эти уравнения выражают тесную взаимосвязь между геометрией 4-мерного пространства-времени (левая часть) и

распределением и движением масс (правая часть). Это одна из ключевых эвристических идей общей теории относительности, к которой Эйнштейн пришел на основании принципа Маха. Но не только Мах был предшественником Эйнштейна в этом отношении. «Риман, — писал Эйнштейн, — пришел к смелой мысли, что геометрические отношения тел могут быть обусловлены физическими причинами. Таким образом, путем чисто математических рассуждений он пришел к мысли о неотделимости геометрии от физики: эта мысль нашла свое фактическое осуществление 70 лет спустя в общей теории относительности, которая соединила в одно целое геометрию и теорию тяготения». Но, придя к таким соображениям, Риман еще не мог разглядеть, какие именно физические явления должны быть связаны с неевклидовостью геометрии.

Позднее В. Клиффорд (1845–1879) высказал уже вполне конкретные гипотезы о возможной связи физических свойств материи со свойствами искривленного пространства (Клиффорд говорил только о пространстве: о пространстве-времени тогда еще никто не мог говорить). К числу физических причин, которые могут привести к изменению кривизны пространства, Клиффорд называл теплоту, свет, электромагнитное поле. Клиффорд еще не высказывался о гравитации как проявлении искривленности. Однако он уже высказал гипотезу о возможной связи электромагнитного поля и геометрии пространства — факт, который теперь непосредственно следует из общей теории относительности. Все три отмеченные Клиффордом физических фактора, вызывающих изменение кривизны, нашли потом естественное воплощение в общей теории относительности.

Клиффорд предвосхитил не только идею новой теории гравитации, но и идею построения единой геометрической теории всех полей и материи. В 1876 г. он опубликовал работу с весьма неожиданным для того времени названием «О пространственной теории материи» (слово «поле» еще не вошло тогда во всеобщее употребление). В ней он писал:

«... Изменение кривизны пространства — это то, что в действительности происходит при том явлении, которое мы называ-

ем движением материи, как весомой, так и эфира; в *физическом мире не имеет места ничего, кроме этого изменения*, подчиняющегося (возможно) закону непрерывности.

Это не что иное, как выдвижение программы полной геометризации всей материи.

Осуществлению этой программы Эйнштейн посвятит потом 30 последних лет своей жизни.

Получив в 1915 г. свои уравнения (32.7), Эйнштейн вначале надеялся, что они уже описывают в единой форме любые физические поля. Основанием для этой мысли было то, что тензор энергии-импульса, стоящий в правой части уравнений, выражал энергию и импульс *любой* материи и *любого* поля, кроме *гравитационного*. Однако Эйнштейн убедился, что его уравнения дают геометрическое представление только для гравитационного поля (как искривленность пространства-времени). Если левая часть этих уравнений — чисто геометрическая, то правая часть не была еще геометризована. «Правая часть, — писал Эйнштейн, — включает в себя все то, что не может быть пока объединено в единой теории поля». Эйнштейн до конца жизни считал свои уравнения (32.7) «лишь временным выходом из положения», потому что они «искусственно отрывали поле тяготения от единого поля еще неизвестной структуры».

Несмотря на пессимистический взгляд самого Эйнштейна на свои уравнения, они до сих пор (уже без малого столетие) остаются последним словом в науке о тяготении. Познавательное значение их не только не исчерпано, но, видимо, будет раскрываться все глубже и глубже. А пока основную идею общей теории относительности лучше всего можно выразить словами авторов известной монографии «Гравитация» Ч. Мизнера, К. Торна и Дж. Уилера: *«Пространство воздействует на материю, указывая ей, как двигаться. Материя в свою очередь оказывает обратное действие на пространство, указывая ему, как искривляться»*.

Математическая структура уравнений тяготения. Система уравнений (32.7) — это система из десяти уравнений —

по числу компонент симметрического тензора второго ранга в 4-мерном пространстве. (В действительности число независимых уравнений сокращается до шести ввиду четырех тождеств, которым подчиняется тензор Риччи $R_{\alpha\beta}$, называемых тождествами Бьянки).

Обычно в этих уравнениях правая часть, а именно тензор энергии-импульса материи или полей, например, электромагнитного поля, считается заданным. Это значит, что по заданному распределению и движению масс требуется путем интегрирования уравнений (32.7) найти метрику $g_{\alpha\beta}$ пространства-времени, искривляемого этими массами (полями).

Так как левая часть уравнений Эйнштейна (32.7) выражается через вторые частные производные от метрики $g_{\alpha\beta}$, то эти уравнения есть система дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка относительно $g_{\alpha\beta}$, линейных лишь относительно вторых производных от метрики, но нелинейных по отношению к первым производным. Интегрирование таких систем уравнений — задача столь сложная, что общий метод ее решения до сих пор в математике не разработан. Пока что найдены лишь отдельные частные решения, отвечающие наиболее простым источникам гравитационного поля.

Движение в гравитационном поле



О природе тяготения. Настало время дать ответ на вопросы, поставленные нами в самом начале обзора:

- что есть «сила тяжести»?
- почему тела на Земле падают вниз?
- и почему планеты не падают на Солнце, а движутся по эллипсам?

Ньютон абсолютизировал «силу тяжести», рассматривая ее как одну из исходных субстанций. Но мы уже видели, сколь противоречиво и по существу метафизично понятие силы тяжести и вообще «силы» в ньютоновой механике. Что касается движения планет, то Ньютон вывел законы этого движения, *постулировав*, но не объяснив свой закон тяготения. От объяснения причины обратно-квадратичной зависимости силы притяжения от расстояния Ньютон отказался.

Между тем вопрос о причине притяжения (причем только притяжения) тел привлекал внимание многих ученых уже с XVII века: вспомним декартову теорию вихрей. С XVIII века, когда механистическая ньютонова парадигма уже прочно утвердилась, ученые хотели дать прямое механическое обоснование притяжения, без привлечения метафизических гипотез и без идеи Бога: физики боялись метафизики и религии.

Механистические гипотезы, выдвигавшиеся для этой цели, были разного типа: атомистические, эфирно-ударные и эфирно-волновые. Последним отдали дань даже такие выдающиеся ученые, как Гук, Гюйгенс, а потом Бернулли и Эйлер. Сам Ньютон вначале пытался дать на этом пути объяснение природы тяжести, пока не убедился, что этот путь бесплоден.

Наибольшей популярностью с 1782 г. пользовалась атомистическая гипотеза Лесажа. Суть ее была в том, что мировое пространство заполнено мельчайшими твердыми частицами (в них нетрудно угадать демокритовы атомы), движущимися с огромными скоростями во всевозможных направлениях. Размеры этих частиц очень малы по сравнению с расстояниями между ними, так что их взаимные столкновения практически исключались. Отдельное тело, подвергаясь хаотической бомбардировке со стороны огромного множества этих частиц, должно оставаться в равновесии. Если же по соседству с ним находится второе тело, то часть потока атомов, падающих на первое тело, задерживается (поглощается) этим вторым телом, в результате чего возникает равнодействующая сила, толкающая первое тело по направлению ко второму. Точно такое же экранирующее действие первого тела приводит к другой силе, «толкающей» к нему второе тело. При некоторых определенных предположениях о скоростях частиц гипотеза Лесажа могла объяснить притяжение тел в соответствии с законом Ньютона.

Различные варианты этой гипотезы — эфирные и газовой-кинетические — предлагались в течение XIX века целым рядом авторов. Общим пороком всех этих гипотез являлась их искусственность: все они создавались специально (по латыни говорят — *ad hoc*) для объяснения притяжения тел и потому неизбежно приходили к противоречию с другими физическими явлениями или принципами. Так, эфирно-волновые гипотезы не могли объяснить происхождение и сохранение волн в эфире. И все без исключения механические гипотезы, как указал Пуанкаре, приходили в противоречие с законом сохранения энергии.

Вслед за этими попытками механического объяснения природы тяготения последовали электромагнитные модели гравитации (о которых уже шла речь), также не приведшие к успеху.

Эйнштейн впервые отказался от попыток объяснения гравитации путем сведения ее к какой-то иной сущности: механической, электромагнитной или (как у Ньютона) божественной. Он увидел в гравитации лишь проявление некоторого свойства пространства-времени, а именно его искривленности.

Тяготение — не сила. По Эйнштейну, тело движется не под действием других тел, а под действием пространства: именно оно «указывает» телу, как ему двигаться. Но тогда нет более необходимости говорить о «силе тяжести», действующей на тело со стороны других тел: тела движутся не под действием силы. Гравитационное поле — это не поле каких-либо сил, подобных электромагнитному полю, в котором на тела действует *сила* Лоренца.

Только теперь, по устранении силы из гравитации, отпала необходимость объяснять падение тел действующей на них силой. Исчез логический порочный круг с определением «силы тяжести».

Мы стоим на Земле и ощущаем свой *вес*, поэтому нам кажется, что на нас действует сила — «сила тяжести» — со стороны Земли. Но это заблуждение: на нас действует контактная сила — сила реакции опоры, или давления со стороны земной поверхности. «Вес» возникает как противодействие этой реакции опоры, уравнивающее ее и позволяющее нам оставаться в состоянии покоя. Но представьте, что опора исчезла — Земля разверзлась под вами, и вы летите вниз, в глубокую шахту. Ваш «вес» вдруг исчез, потому что ему больше нечего уравнивать: любой парашютист, падающий камнем вниз, скажет вам, что до раскрытия парашюта он не испытывал действия никакой силы. Куда же девалась «сила тяжести» Земли? Никуда не девалась, потому что ее никогда не было.

Свободно падая, мы находимся в локально-инерциальной системе отсчета: в ней тело движется по инерции — без действия сил. Вспомним падающий лифт: любое тело, которое вы выпустите с некоторой скоростью в любом направлении, будет двигаться равномерно и прямолинейно, пока не столкнется со стенкой лифта. Для внешнего наблюдателя мы падаем с ускорением, но в нашей собственной системе отсчета тела и мы сами не подвержены ускорению. «Сила» устранена выбором системы отсчета.

Пусть космонавт находится в космическом корабле или плавает в Космосе около него. Чувствует ли он какую-либо «силу тяготения»? Ни малейшей. Чувствует ли эту силу корабль? Нет.

Тогда зачем говорить о ней? Можно считать, что и космонавт, и корабль пересекают область пространства-времени, в которой не действуют никакие силы: движение в этой области является идеально прямым, т. е. происходит по инерции.

Математически в теории Эйнштейна это выражается в том, что символы Кристоффеля — см. формулу (31.7) — в любой точке псевдориманова пространства обращаются в нуль выбором локально-галилеевой системы отсчета (а ее можно выбрать в любой мировой точке). Символы $\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}$ в общей теории относительности являются математическим выражением «силы»: они выражаются через первые производные от потенциалов — метрики $g_{\alpha\beta}$. Существенно, что символ Кристоффеля — *не тензор*: он преобразуется не по однородному закону, и потому его можно обратить в нуль в данной точке выбором подходящей системы координат. «Сила» уничтожима — неуничтожимо поле $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$, которое математически не имеет силового характера: оно выражается через первые и *вторые* производные от потенциалов. Это поле есть тензор, и потому оно неустранимо преобразованием координат.

Поле присутствует всюду, и потому оно универсально; сила существует лишь как координатный эффект — она появляется, лишь когда мы переходим от локально-инерциальной системы отсчета к любой другой. Если угодно, «сила тяжести» присутствует в теории Эйнштейна, но присутствует как сила инерции и потому фиктивна.

Что касается планет, то они движутся в поле тяготения Солнца без всяких «опор» — они всегда свободно «падают» на Солнце. Почему же они так и не упали на него? Очевидно, потому, что и на них со стороны Солнца не действует никакая сила. Что же заставляет планеты двигаться вокруг Солнца по криволинейным замкнутым орбитам?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо вспомнить: Солнце указывает пространству, как ему искривляться, а пространство указывает планетам, как им двигаться. Что же указывает псевдориманово пространство? По каким траекториям движутся в нем тела?

Геодезические линии. Идеальная прямая — это наикратчайший путь между двумя точками в евклидовом пространстве. В искривленном пространстве тоже есть свои кратчайшие пути между двумя точками, только они уже не являются прямыми. Они называются *геодезическими линиями*. Вспомним, что евклидово пространство взаимнооднозначно отображается на пространство Лобачевского или пространство Римана, причем так, что прямые евклидова пространства переходят в геодезические линии искривленного пространства. Но пространства Лобачевского и Римана — это пространства постоянной кривизны: в них кривизна не изменяется при переходе от точки к точке. А как обстоит дело с псевдоримановым пространством произвольной кривизны? В них тоже имеются строго определенные линии экстремальной длины — геодезические.

Одним из первых результатов общей теории относительности было доказательство того факта, что *пробное тело*, т. е. тело достаточно малой массы, чтобы самому не оказывать заметного гравитационного действия на центральное тело, всегда движется в поле этого тела по геодезическим линиям — линиям наименьшей (строго говоря, экстремальной) длины. Геодезические линии в псевдоримановом пространстве описываются уравнениями

$$\frac{d^2 x^\mu}{ds^2} = -\Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{ds} \frac{dx^\beta}{ds}, \quad (33.1)$$

где ds — линейный элемент пространства-времени, а $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ — символы Кристоффеля. Это уравнение имеет вид второго закона Ньютона: слева стоит 4-мерный вектор ускорения мировой точки, а справа — «сила». Перейдем в мировой точке, на которой в данный момент находится пробное тело, к локально-инерциальной системе отсчета. В ней, как мы знаем, символы $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ обратятся в нуль — тогда уравнения (33.1) примут вид $d^2 x^\mu/ds^2 = 0$. «Сила» исчезла — уравнения (33.1) приняли вид уравнения прямой в 4-мерном пространстве.

Этот результат полностью соответствует характеру псевдориманова пространства: локально, в окрестности любой точки, оно является псевдоевклидовым, и в этой окрестности геодези-

ческие линии совпадают с прямыми. Это и оправдывает их название как линий наименьшей длины: в любой малой окрестности точки они действительно совпадают с кратчайшей линией — прямой.

Приведем наглядную иллюстрацию движения тел по геодезической на примере двумерной модели 4-мерного пространства-времени — модели, которую можно изобразить даже на листе бумаги. Будем изображать искривленное пространство-время в виде поверхности яблока (рис. 33.1). Пусть яблоко упало около нас в саду, и мы решили рассмотреть его поверхность через увеличительное стекло. Мы увидим, как по его поверхности бегают муравьи. По какому принципу муравьи выбирают свой путь? Прочертите на яблоке путь какого-либо муравья, затем снимите

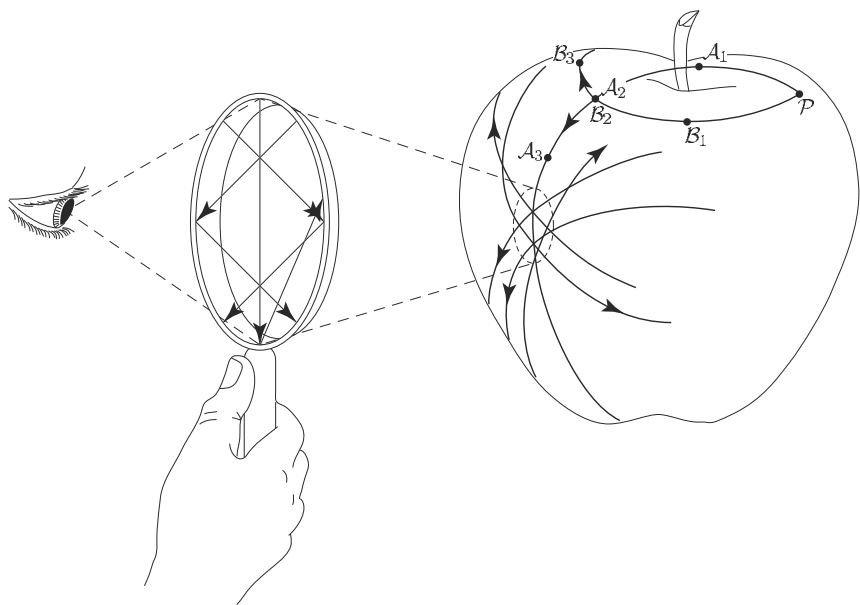


Рис. 33.1. Представление римановой геометрии пространства-времени в виде двумерной геометрии на поверхности яблока. Геодезические, вдоль которых на поверхности яблока ползают муравьи, являются символическим изображением мировых линий, вдоль которых в пространстве-времени движутся свободные частицы

кожуру яблока и распрямите ее на доске — вы увидите, что на ней путь муравья прямой, словно луч лазера. Этот же путь, очерченный уже не на доске, а на поверхности яблока, есть геодезическая — прямейшая линия на этой поверхности. Муравьи выбирают наиболее целесообразный — кратчайший — путь движения по искривленной поверхности. Локально, на малом участке поверхности яблока, эти геодезические совпадают с прямыми.

А как ведут себя геодезические линии на больших участках многообразия? Посмотрим на двух муравьев, отправившихся из точки P поверхности многообразия в направлениях, отличающихся друг от друга. Их пути случайно пролегли вблизи углубления в верхней части яблока, по разные стороны от него. Каждый из муравьев старался бежать по яблочной коже как можно прямее — он следовал вдоль своей геодезической. Однако из-за кривизны углубления их пути сначала пересеклись, а затем разошлись в совершенно разных направлениях. Муравьи движутся так, будто что-то притягивает их к яблочному черенку, так что можно было бы поверить и в ньютоновскую силу, действующую на расстоянии. Но муравью нечем руководствоваться при выборе своего пути, кроме *локальной* геометрии поверхности, по которой он ползет. А это и есть полевая концепция Эйнштейна, подразумевающая, что причиной всех физических явлений является локальное воздействие. Она принципиально отличается от ньютоновского подхода с его действием на расстоянии.

Согласно полевой концепции Эйнштейна, траектория частицы определяется локальной геометрией пространства-времени в том месте, где она находится. Физика проста именно при локальном анализе. Так же просты и «указания» геометрии: двигаться как можно прямее, по геодезической линии. Это хорошо иллюстрируется на рис. 33.1. В любой достаточно малой области пространства-времени геометрию можно приближенно считать плоской, и на двумерной поверхности яблока это представлено почти прямолинейными отрезками геодезических, хорошо видимыми через увеличительное стекло. Это и иллюстрирует «локально-плоский» характер геометрии пространства-времени. С другой стороны, в протяженных областях проявляется уже

кривизна многообразия (4-мерного пространства-времени в случае реального физического мира; криволинейной двумерной геометрии в случае яблока). Так, две геодезические \mathcal{PA}_1 и \mathcal{PB}_1 , выходящие под некоторым углом друг к другу из одной точки \mathcal{P} , начинают сближаться, затем пересекаются и расходятся в совершенно различных направлениях. Траектории пересекаются только вследствие кривизны пространства-времени в целом, т. е. в больших масштабах (говоря иначе, *глобально*). Кривизна пространства-времени в целом воздействует на материю, и это приводит к пересечению первоначально расходящихся геодезических линий. Материя со своей стороны воздействует на геометрию пространства-времени, и это приводит к искривлению пространства-времени вследствие концентрации массы, которая символически представлена черенком яблока. В черенке яблока как бы сосредоточена масса: она и приводит к углублению на поверхности яблока. На языке римановой геометрии это можно выразить так: концентрация массы (например, масса Солнца) приводит к искривлению пространства времени в целом.

В теории Ньютона этот эффект приписывается силовому воздействию на расстоянии со стороны центра притяжения — Солнца. В теории Эйнштейна вызываемое Солнцем искривление пространства-времени в целом приводит к искривлению геодезических. Планеты в поле тяготения Солнца движутся без силового воздействия — по прямейшим линиям, т. е. по геодезическим. В пространстве, рассматриваемом глобально (в целом), эти геодезические линии являются кривыми линиями — замкнутыми траекториями, по которым планеты вращаются вокруг Солнца.

Эффекты ОТО. Гравитационные волны



Как распространяется гравитационное взаимодействие?

В полевом подходе, предусматривающем близкое действие, взаимодействие распространяется с конечной скоростью от одной точки к другой, близлежащей. В такого рода концепции для распространяющегося взаимодействия используются понятия «волна», или «импульс», или «сигнал», передающийся от точки к точке. Так, говоря о распространении электромагнитного взаимодействия, мы используем понятие «световой сигнал». Луч света, который мы сейчас можем рассматривать даже в виде частиц — фотонов, отразившись от зеркала, попадает на сетчатку нашего глаза, физиологическим раздражением которой он вызывает в нашем мозгу наше собственное изображение. Мы говорим: световой *сигнал* достиг сетчатки глаза. А какими «сигналами» передается гравитационное взаимодействие?

Никаких «гравитационных сигналов» такого рода не существует. Переносчик гравитации вообще не есть волна или частица, распространяющиеся в пространстве и передающие взаимодействие: это есть сама геометрия физического пространства. Под «физическим пространством» понимается псевдориманово 4-мерное пространство V_4 , иногда называемое *миром*. Точки этого пространства («мировые точки»), фиксируемые четырьмя координатами x_0, x_1, x_2, x_3 , имеют тот же смысл, что и в частном случае, когда пространство V_4 есть пространство Минковского E_4^2 : они называются событиями, так что V_4 — это тоже пространство событий.

Мы знаем, что планета Нептун была открыта по наблюдениям за возмущениями орбиты Урана. Отчего возникают эти «возмущения»? Теория Ньютона отвечала: от силы притяжения со

стороны Нептуна. В этой теории ничего не говорится о распространяющихся «гравитационных сигналах» от Нептуна: в ней взаимодействие распространяется мгновенно. Но интересно, что и полевая теория Эйнштейна (в этом смысле подобная максвелловской), тоже не говорит о «сигналах» или «импульсах», действующих на Уран со стороны Нептуна. Она дает такое объяснение: сближения Нептуна с Ураном приводят к изменению расположения масс в Солнечной системе, которое в свою очередь вызывает изменение создаваемой Солнцем кривизны физического пространства; а это изменение кривизны приводит к изменению геодезических линий, в том числе орбиты Урана.

Однако, псевдориманово пространство V_4 отличается от псевдоевклидова пространства E_4 не только искривленностью. Сама эта искривленность зависит от времени: компоненты тензора кривизны являются функциями всех четырех координат, в том числе и координаты $x^0 = ct$. Физически это связано с тем, что метрика, а значит и кривизна пространства-времени зависит от масс — источников поля, расположение и движение которых определяются значениями их пространственных координат и моментов времени.

Тот факт, что поле кривизны $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ зависит от времени, означает, что это поле (а оно и есть гравитационное поле) может «колебаться», причем эти колебания могут быть *запаздывающими* — в полной аналогии с запаздывающими потенциалами в электродинамике, отождествляемыми с электромагнитными волнами.

Можно, стало быть, говорить о «волнах кривизны» пространства-времени, или *гравитационных волнах*, которые, возможно, позволили бы возродить представление о гравитационных сигналах, распространяющихся с конечной скоростью.

Может показаться странным — говорить о «распространяющемся» пространстве-времени. Но гравитационное взаимодействие тем и отличается от всех других взаимодействий, что пока только оно одно геометризовано. Поэтому и гравитационные волны, если они будут открыты, — это «волны» особого типа: вол-

ны, представляющие собой как бы распространяющуюся «рябь» кривизны на фоне физического пространства.

Гравитационное волновое уравнение. Гравитационные волны еще не обнаружены на эксперименте — возможно, из-за слабости их воздействия на принимающее устройство (детектор), по сравнению с электромагнитными волнами. Но трудность их обнаружения заключается не только в недостаточной чувствительности детекторов — гравитационных антенн. Сама разработка теории гравитационных волн наталкивается на существенные трудности, от которых свободна хорошо разработанная теория электромагнитных волн.

Ввиду отсутствия в пространстве V_4 выделенных систем отсчета, любой реальный физический процесс, в том числе распространение гравитационных волн, должен описываться независимо от выбора системы координат. Это значит, что само уравнение, описывающее распространение волн (*волновое уравнение*), должно иметь общековариантный вид, т. е. должно быть тензорным уравнением. Мы уже знакомы с трудностью отделения чисто гравитационных эффектов от эффектов *инерциальных* — сил инерции, создаваемых выбором системы отсчета. Может получиться, что за гравитационные волны мы принимаем поле некоторых фиктивных волн, связанных, например, с выбором колеблющейся, подобно волне, системы отсчета. Это тоже будут «волны», но волны фиктивных сил инерции: это не физический эффект, а лишь эффект выбора системы отсчета. Такой эффект иногда называют *координатным* эффектом: он исчезает при выборе другой системы отсчета.

В классической электродинамике, построенной теперь уже на базе частной теории относительности, существует класс привилегированных — декартовых систем отсчета: в них строится теория электромагнитных волн, и в них же рассчитывается эксперимент по их приему (детектированию). В такой системе отсчета волновой процесс для любого элемента поля ψ («волновой функции») описывается следующим дифференциальным уравнением

в частных производных второго порядка (оно записано здесь для пустоты, вне области расположения источников волн):

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0, \quad (34.1)$$

или, короче, $\partial\psi = 0$, где ∂ — дифференциальный оператор, называемый *оператором Даламбера*. Простейшее решение этого уравнения в виде функции от $t - r/c$ допускает ясную физическую интерпретацию, как обычная волна, знакомая нам из повседневного опыта, причем величина c является скоростью распространения волны.

Уравнение (34.1) лоренц-ковариантно, но никак не ковариантно по отношению к произвольным системам отсчета (которые тоже могут быть введены в пространстве Минковского). В неинерциальной системе отсчета волновой характер этого уравнения исчезает — «исчезают» волны. Они могут теоретически рассматриваться и экспериментально приниматься только в декартовой системе отсчета. В общей теории относительности декартовых координат нет — волновое уравнение (34.1) в ней не имеет смысла. Чтобы говорить о гравитационных волнах, требуется построить общековариантное обобщение уравнения (34.1), подобно тому как уравнения гравитационного поля Эйнштейна (32.7) строились как общековариантное обобщение уравнения Пуассона (32.3). В частности, требуется получить общековариантное выражение для оператора Даламбера. Эта задача не имеет до сих пор однозначного решения (многочисленные предложенные варианты решений мы здесь приводить не будем). Проще говоря, мы до сих пор не имеем ответа на вопрос: какое псевдориманово пространство следует называть полем гравитационных волн?

Единственное, из чего мы можем исходить при определении гравитационно-волнового поля, — это аналогия с полем электромагнитных волн, которые тоже можно описывать в тензорной форме, с помощью тензора Максвелла $F_{\mu\nu}$. Но нет полной аналогии между тензором Максвелла $F_{\mu\nu}$ и тензором Римана $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ — даже по своей алгебраической структуре они слишком различны.

Выбор системы отсчета важен и в гравитации. Тем не менее, несмотря на отсутствие строгой теории, экспериментальные и наблюдательные поиски гравитационных волн ведутся с 60-х годов XX века. Они имеют некоторое обоснование в том, что решение любой расчетной задачи всегда в действительности производится в какой-то выбранной системе отсчета. Несмотря на отсутствие привилегированной системы отсчета в общей теории относительности, решение конкретной физической задачи всегда связано с некоторым упрощением или приближением — как говорят, *идеализацией* физической ситуации. Приблизительно, как мы уже видели, для описания динамики Солнечной системы удобно воспользоваться идеализированной (в действительности не существующей) инерциальной системой отсчета, связанной с центром Солнца.

Такую идеализированную систему отсчета, по-разному выбираемую для решения разных физических задач, можно уже считать физически преимущественной перед другими, потому что в этой системе отсчета можно ставить вопрос о сравнении теоретических выводов с наблюдениями.

Тем более можно использовать конкретную систему отсчета в задачах, где теория хорошо разработана, например, в задаче о движении тел (в частности, планет) в центральном гравитационном поле другого тела (например, Солнца).

Эффекты ОТО. Черные дыры



Решение Шварцшильда. Исторически первое (и простейшее с точки зрения вычислений) решение уравнений Эйнштейна было получено уже в 1916 г., сразу же после создания общей теории относительности, Карлом Шварцшильдом. Оно описывало гравитационное поле самого простого источника — компактной сферически-симметричной массы, например, Солнца, для области пространства-времени, не содержащего сам источник. Поэтому оно может быть использовано для изучения геодезических линий — траекторий, по которым планеты движутся вокруг Солнца. Для области, не содержащей масс, тензор энергии-импульса обращается в нуль, и тогда уравнения Эйнштейна принимают вид

$$R_{\alpha\beta} = 0 ; \quad \alpha, \beta = 0, 1, 2, 3 . \quad (35.1)$$

Для определения метрики $g_{\mu\nu}$ соответствующего гравитационного поля требуется проинтегрировать эти уравнения, предварительно записав их как дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка относительно компонент $g_{\mu\nu}$. Для этой цели используем соответствующую идеализацию и отвечающую ей систему отсчета, называемую шварцшильдовой. В данной задаче используется следующая идеализация:

- 1) считаем, что во всем мире не существует других масс, кроме единственного центрального источника (не считая пробных тел, не создающих поля);
- 2) полагаем, что гравитационное поле само является сферически-симметричным, или изотропным, т. е. не зависящим от выбора направления, проходящего через центр источника;

- 3) учитываем, что гравитационное поле неограниченно уменьшается с удалением от источника на бесконечность; это условие выражают еще по-другому, говоря, что пространство-время должно быть *асимптотически плоским* — стремиться на бесконечности к метрике Минковского;
- 4) согласно принципу соответствия требуется, чтобы гравитационные потенциалы — метрика $g_{\mu\nu}$ — в соответствующем предельном случае переходили в ньютоновский гравитационный потенциал Φ .

С учетом второго условия сами уравнения (35.1) требуют, чтобы гравитационное поле было статическим — неизменным во времени. Тогда задача сводится к уравнению в обыкновенных производных, которое уже достаточно легко интегрируется, причем константы интегрирования определяются с помощью третьего и четвертого условий.

Начало системы отсчета, естественно, выбирается в центре источника поля, а пространственные криволинейные координаты, определяющие положение заданной мировой точки, выбираются сферическими: радиальная координата r и две угловые координаты ϕ и θ , подобные широте и долготе на сфере. Так как поле на бесконечности должно быть плоским, то метрика ds^2 должна при $r \rightarrow \infty$ переходить в ds_∞^2 — метрику Минковского, которую также следует представить в сферических координатах:

$$ds_\infty^2 = c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) . \quad (35.2)$$

Не вдаваясь в детали интегрирования уравнений, выпишем окончательный результат — метрику гравитационного поля Шварцшильда. Она имеет вид

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_g}{r}} - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) . \quad (35.3)$$

Здесь через r_g мы обозначили уже знакомую нам постоянную величину, ранее найденную, хоть и не строгим образом, Лапласом уже в ньютоновской теории, — гравитационный радиус: $r_g = 2km/c^2$, где m — масса источника. Величина r_g получается как постоянная интегрирования уравнений, и при определении

ее значения мы использовали принцип соответствия: четыре эйнштейновских потенциала

$$g_{00} = 1 - \frac{r_g}{r}, \quad g_{11} = -\frac{1}{1 - \frac{r_g}{r}}, \quad g_{22} = -r^2, \quad g_{33} = -r^2 \sin^2 \theta \quad (35.4)$$

в предельном случае должны давать ньютоновский гравитационный потенциал.

Чтобы убедиться, что метрика (35.3) удовлетворяет принципу соответствия, следует продемонстрировать, каким образом из этой метрики получается предельный случай — ньютоновский гравитационный потенциал, а следовательно и ньютоновский закон тяготения. Ньютоновский предельный случай отвечает предположению, что скорости всех тел значительно меньше скорости света c , а это, в свою очередь, оказывается возможным только в случае слабых гравитационных полей, т. е. таких, для которых компоненты $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ малы по сравнению с 1. Элемент, выражающий в эйнштейновом гравитационном поле «силу», — это символ Кристоффеля $\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}$. При его вычислении для центрально-симметричных слабых гравитационных полей обнаружится, что отличными от нуля являются только компоненты, выражающиеся через g_{00} , а именно, компоненты вида $\partial g_{00}/\partial x^i$, $i = 1, 2, 3$. Сопоставляя эти выражения с ньютоновской силой $F = -\partial\Phi/\partial r$, легко убедиться, что ньютоновский потенциал связан только с одной компонентой метрического тензора, g_{00} , причем это приближенное соотношение имеет вид

$$g_{00} = 1 - \frac{2\Phi}{c^2}. \quad (35.5)$$

Наконец, из вида метрики (35.3) сразу следует, что она удовлетворяет и условию асимптотической евклидовости: при $r \rightarrow \infty$ она переходит в метрику Минковского (35.2).

Сингулярности. Уже при первом взгляде на метрику (35.3) видно, что она теряет смысл при $r = 0$ и при $r = r_g$, потому что знаменатели дробей в (35.3) обращаются в нуль. Такого рода точки, в которых физические или геометрические характеристики поля обращаются в бесконечность, называются *сингулярными* («особыми») точками поля.

Сингулярность (особенность) при $r = 0$, называемая *центральной сингулярностью*, вполне ясна: она встречается и в теории Ньютона, и в электростатике (особенность выражения для силы Кулона в начале координат $r = 0$). Она обусловлена идеализацией, связанной с рассмотрением точечных источников поля. При этой идеализации она неустранима никаким преобразованием системы отсчета. Совсем другой характер имеет особенность при $r = r_g$. Точки, удовлетворяющие этому условию, образуют целую сферу, называемую *сингулярной сферой Шварцшильда*. На этой сфере g_{00} обращается в нуль, а g_{11} — в бесконечность, так что можно было бы подумать, что не существует реальных (сферических) тел, геометрический радиус которых был бы меньше r_g , т. е. таких тел, которые целиком находились бы внутри своей сферы Шварцшильда. (Именно такие тела имел в виду Лаплас, говоря об источниках света, которые навсегда остаются для нас невидимыми. Свет не может выйти из-за сферы Шварцшильда во внешнее пространство). Это как будто бы подтверждается тем соображением, что внутри сингулярной сферы (при $r < r_g$) коэффициент g_{00} — см. (35.4) — становится отрицательным, и потому меняет знак — становится отрицательным — сам линейный элемент ds^2 . Это означало бы, что частицы внутри сингулярной сферы выходят вовне светового конуса, т. е. движутся уже не по временноподобным, а по пространственноподобным линиям, что противоречит частной теории относительности.

Несложное рассуждение покажет нам ошибочность этого представления. Лаплас был все равно прав, хотя и не знал метрики Шварцшильда.

Вычисления показывают, что инварианты (скаляры), составленные из компонент тензора кривизны, при $r = r_g$ не имеют особенностей, т. е. остаются конечными. Это наводит на мысль, что сингулярность при $r = r_g$ обусловлена выбором системы отсчета. Эта сингулярность имеет место лишь в статической (жесткой) системе отсчета Шварцшильда, в которой записана метрика (35.3).

Горизонт событий. Любое решение уравнений Эйнштейна — метрика $g_{\mu\nu}$ — всегда представлено в конкретной системе отсчета, а следовательно, отражает не только свойства гравитационного поля, но и эффекты, которые связаны с выбранной системой отсчета и исчезают, если перейти в другую систему отсчета. Однако эти эффекты (типа сил инерции) вполне реальны и наблюдаемы. В данном случае выбор системы отсчета Шварцшильда, связанной с неподвижным телом отсчета — центральной массой, — приводит к тому, что для внешнего наблюдателя ни одна частица (пробное тело) не может достигнуть сферы $r = r_g$. Такие недостижимые, с точки зрения внешнего наблюдателя, сферы называют *горизонтами событий*.

Мы знаем, что многообразие в целом далеко не всегда можно покрыть одной картой. В частности, статическая шварцшильдова система координат может быть введена только в области пространства вне сингулярной сферы. При $r \leq r_g$ не существует статического тела отсчета, с которым можно было бы связать эту систему координат. Однако внутренняя область сингулярной сферы может быть покрыта другой картой, уже нестатической. Впервые преобразование координат от шварцшильдовой карты к новой, нестатической карте было найдено в 1938 г. Ж. Леметром. Это преобразование включает зависимость новых пространственных координат x^i от старой временной координаты x^0 ; это и означает, что новая система отсчета не является неподвижной. Эта система отсчета — деформирующаяся (сжимающаяся).

Обе эти системы отсчета «перекрывают» друг друга на сфере Шварцшильда, причем в карте Леметра сингулярность на этой сфере отсутствует. Метрика Шварцшильда в этой новой карте будет иметь вид, совсем не похожий на (35.3) (мы его здесь приводить не будем): коэффициенты $g_{\mu\nu}$ будут в ней уже функциями времени. Можно представить, что с каждой из этих двух карт связан свой наблюдатель: неподвижный внешний наблюдатель и наблюдатель, движущийся вместе с движущейся (сжимающейся) системой отсчета. Этот последний наблюдатель как бы свободно падает на центр $r = 0$ в своей, «падающей» вместе с ним системой отсчета.

Неизбежность двух различных карт — систем отсчета — для центрально-симметричного гравитационного поля приводит к разительному различию наблюдаемых эффектов для статического и свободно падающего наблюдателей. С одной стороны, это — яркая иллюстрация роли выбора системы отсчета. Но, с другой стороны, сам факт, что в области $r \leq r_g$ статическая система отсчета *невозможна*, отражает не координатный, а физический, следовательно, наблюдаемый эффект. Окажется, что по часам внешнего наблюдателя свободно падающий наблюдатель никогда не достигнет горизонта — сферы Шварцшильда. Этот удивительный результат следует из формулы общей теории относительности для истинного промежутка времени τ между двумя событиями. Получим эту формулу.

Рассмотрим два бесконечно близких события, происходящих в одной и той же точке пространства, т. е. при $dx^i = 0$, $i = 1, 2, 3$. Тогда интервал ds между этими двумя событиями есть $cd\tau$, где $d\tau$ — элементарный промежуток истинного времени. Полагая $dx^1 = dx^2 = dx^3 = 0$ в общем выражении $ds^2 = g_{\alpha\beta}dx^\alpha dx^\beta$, находим, что $ds^2 = c^2 d\tau^2 = g_{00} (dx^0)^2$, откуда $d\tau = \frac{1}{c} \sqrt{g_{00}} dx^0 = \sqrt{g_{00}} dt$. Тогда для времени между двумя событиями в одной и той же точке пространства получаем:

$$\tau = \int \sqrt{g_{00}} dt . \quad (35.6)$$

Так как g_{00} в общем случае зависит от координат точки пространства, из выражения (35.6) следует, что истинное время в разных точках пространства течет по-разному. Уже в частной теории относительности переход в другую систему отсчета приводит к изменению хода часов. В общей теории относительность истинное время течет различным образом в разных точках пространства даже в одной и той же системе отсчета.

В системе отсчета Шварцшильда, с учетом выражений (35.4), имеем

$$\tau = \int \sqrt{1 - \frac{r}{r_g}} dt , \quad (35.7)$$

т. е. собственное время течет по-разному для наблюдателей, находящихся на разных расстояниях r от центра. При приближе-

нии свободно падающего наблюдателя к сфере Шварцшильда ($r \rightarrow r_g$) его собственное время — в системе отсчета внешнего наблюдателя — стремится к нулю: его часы останавливаются. Внешний наблюдатель никогда не сможет увидеть, что какое-либо тело когда-либо достигнет сферы Шварцшильда.

Гравитационный коллапс. В нестатической (деформирующей-ся) системе отсчета выражение для g_{00} будет иным, и расчет по формуле (35.7) даст совсем иной результат: наблюдатель за *конечное* собственное время τ не только пересечет сферу Шварцшильда, но и достигнет центральной точки $r = 0$.

Нестатическая система отсчета Леметра не покрывает еще всю область пространства-времени $r \neq 0$. В 1960 г. М. Крускал ввел другую нестатическую систему отсчета, которая покрывает уже все пространство-время *вплоть до* $r = 0$. Только в этой системе отсчета возможно говорить о принципиальной достижимости центральной сингулярности.

Если вне сферы Шварцшильда линейный элемент положителен ($ds^2 > 0$), а внутри нее — отрицателен ($ds^2 < 0$), то, конечно, на самой сфере он равен нулю: $ds^2 = 0$. Это означает, что сфера Шварцшильда состоит из *изотропных* линий, являющихся траекториями световых лучей. Образующая светового конуса каждой точки этой сферы лежит на самой сфере. С другой стороны, это означает также, что при переходе от внешней области сингулярной сферы к внутренней радиальная координата r и временная t меняются местами. Воображаемый наблюдатель, движущийся в космическом корабле и пересекший сферу $r = r_g$, уже не сможет повернуть свой корабль назад: там координата r уже становится временем, а время нельзя повернуть вспять. Поэтому наблюдатель неумолимо будет приближаться к центральной сингулярности, и никакая сила не сможет заставить его остановиться. Точно так же никакая сила не сможет заставить испущенный наблюдателем луч света выйти из-под сферы $r = r_g$. Таково свойство сжимающейся системы отсчета: в ней из-под шварцшильдовой сферы не выходят никакие сигналы. В этой системе отсчета и частицы, и лучи света могут пересекать сферу Шварцшильда только в одном направлении —

внутрь, и раз пройдя туда, уже никогда обратно выйти не могут. Это явление — неизбежное падение всех частиц, попавших под сферу Шварцшильда, на центральную сингулярность, — называется *гравитационным коллапсом*.

Коллапсары. Может ли массивное тело, неограниченно сжимаясь, полностью уйти под свою сингулярную сферу? (Для звезды солнечной массы радиус этой сферы — около 3 км).

Исследование релятивистского условия равновесия звезд показывает, что для звезды достаточно большой массы может не существовать равновесного статического состояния. Это случается с массивными звездами, в которых закончились термоядерные реакции, служащие источником их излучения. Сила внутреннего светового давления не может более уравновешивать силы гравитационного сжатия — в этом случае звезда должна неограниченно сжиматься. При этом все ее частицы достигнут центра за конечное собственное время (они и образуют тело сжимающейся системы отсчета). Но процесс сжатия звезды под шварцшильдовой сферой ненаблюдаем из внешней системы отсчета. Моменту прохождения поверхностью звезды этой сферы отвечает время $t = \infty$ внешнего наблюдателя. То, что для падающего на центр звезды наблюдателя происходит за конечное время, для внешнего наблюдателя не произойдет никогда. Никаких логических противоречий в этом нет: это — относительность хода времени в своем крайнем выражении.

Таким образом, с точки зрения удаленного наблюдателя гравитационный коллапс приводит к возникновению как бы навек «застывшего» тела, от которого не приходят в окружающее пространство никакие сигналы. Оно «застыло» не потому, что находится в равновесии (ибо равновесия нет), но потому, что для внешнего наблюдателя на горизонте «застыло» (остановилось) время, подобно тому как на остановившемся кинокадре мы можем видеть «застывшее» состояние падения прыгуна в воздухе. Такой объект называется *коллапсаром*, или черной дырой.

Звезды, имеющие к концу жизни массу меньше двух-трех масс Солнца, обычно сжимаются, превращаясь в сверхплотные объекты — белые карлики или нейтронные звезды. Одна-

ко у многих звезд масса значительно превышает три массы Солнца, и ничто не может предотвратить их коллапс в будущем. Современная физика не умеет описывать состояние вещества в сингулярности: вещество там сжато до бесконечной плотности бесконечно сильным гравитационным полем, кривизна пространства-времени бесконечна, и привычные законы природы теряют смысл.

Между тем процесс образования черной дыры отнюдь не требует бесконечной плотности вещества и подчиняется известным законам природы. Например, звезда массой в десять масс Солнца в момент, когда в процессе коллапса ее радиус окажется равным радиусу сферы Шварцшильда, будет иметь плотность 10^{14} г/см³.

Средняя плотность вещества нейтронных звезд около 10^{15} г/см³. Поскольку нет сомнений в существовании нейтронных звезд, то, очевидно, вещество может быть сжато до таких значений плотности, при которых реально возникновение черной дыры, и даже еще больших.

В астрофизике предел звездной массы не определен, тогда как радиус сферы Шварцшильда пропорционален массе звезды. Например, черная дыра, образовавшаяся вследствие коллапса звезды массой 10^8 солнечных масс, имела бы радиус около 300 млн. км, т. е. вдвое больше радиуса земной орбиты. А средняя плотность вещества при этом была бы приблизительно равна плотности воды. Итак, для формирования черной дыры не требуется сверхплотного состояния вещества. Вот почему Лаплас был прав, когда писал, что, возможно, «самые большие светящиеся тела во Вселенной будут для нас невидимыми».

Как же убедиться в существовании объектов, которые нельзя непосредственно наблюдать? Коллапсар, ничего не излучая в пространство, взаимодействует с внешним миром. С точки зрения общей теории относительности это взаимодействие осуществляется единственным способом — через его *статическое* гравитационное поле. Ибо всякое сферически-симметричное гравитационное поле вне самого тела — статическое. Это — утверждение общей теории относительности («теорема Биркгофа»). Попытки наблюдательного доказательства существования ко-

ллапсаров основаны в первую очередь на их притягательном действии на другие небесные тела. И если будет замечено, что какая-то звезда обращается вокруг «пустого места», можно с уверенностью сказать — там находится черная дыра.

Вопрос обнаружения черных дыр. Наблюдательная астрономия показала, что внешнее статическое поле тяготения — это не единственное средство, с помощью которого черная дыра может «заявить» о своем существовании.

Массивная звезда, истратившая свой запас термоядерных источников излучения, при некоторых условиях может перейти в одно из равновесных состояний — состояние очень плотного объекта: белого карлика или, при большей плотности, нейтронной звезды. Уже давно были обнаружены двойные звездные системы (например, источник Лебедь X-1), испускающие сильное рентгеновское излучение, — *рентгеновские пульсары*. Они названы так потому, что один из компонентов этой двойной системы (всегда являющийся очень компактным источником исключительно большой плотности) есть пульсар, отождествляемый с нейтронной звездой. Из звезды-спутника происходит падение вещества на пульсар (*аккреция* вещества). Вследствие огромной плотности вещества пульсара его гравитационный потенциал настолько велик, что освобождаемая при падении вещества энергия превышает ту, которую оно могло бы дать даже за счет ядерных реакций. Отсюда — сильный поток излучения в рентгеновском диапазоне спектра.

Однако позднее были обнаружены и другие рентгеновские источники, про которые уже нельзя было сказать, что аккреция от звезды-спутника происходит на нейтронную звезду. Для двойного объекта, обнаруженного в Магеллановом Облаке, мощность излучения столь велика, что оно не позволило бы падать веществу, если бы масса компактного источника была недостаточно велика. Массу труднонаблюдаемого компактного объекта можно определить по создаваемому им внешнему полю тяготения, действующему на звезду-спутник. Большая масса (более 10 солнечных масс) компактного источника показывает, что он не может быть нейтронной звездой: тут мы имеем дело с источ-

ником, не находящемся в равновесном состоянии, — невидимым объектом, черной дырой. Вещество падает на нее от видимой звезды-спутника не прямо, а по круговым орбитам, с определенным вращательным моментом. Падающая частица может подойти к черной дыре на такое расстояние, где она будет втянута и упадет на нее, но лишь после того, как она в результате падения и столкновения с другими частицами отдаст достаточную часть своей гравитационной энергии и своего момента вращения.

Так черная дыра заявляет о своем существовании в двойных рентгеновских объектах. К настоящему времени известно уже более 10 рентгеновских двойных систем, содержащих массивные (с массой более 3 солнечных масс) компактные источники — «кандидаты» в черные дыры. Ни у одного из них не наблюдается феномена рентгеновского пульсара, характерного для аккрецирующих нейтронных звезд. Это может рассматриваться как наблюдательный аргумент (хотя, разумеется, еще не как окончательное доказательство) в пользу того, что наблюдаемые кандидаты в черные дыры действительно являются черными дырами, предсказываемыми общей теорией относительности.

Эффекты ОТО. Космология



Гравитация — основа космологии. Космология — это учение о Вселенной как целом, включающее в себя теорию всей охваченной наблюдениями области (Метагалактики) как части Вселенной.

Гравитационное взаимодействие является самым слабым из известных взаимодействий. К примеру, гравитационное притяжение двух протонов в $e^2/kM^2 \sim 10^{36}$ раз меньше их электростатического отталкивания. Всем нам знакомое макроскопическое проявление гравитации (например, наш собственный «вес») является столь значительным лишь в результате существования огромных скоплений масс, например, большой массы Земли.

Однако гравитационное поле, в отличие от электромагнитного, нигде не экранируемо и присутствует всюду во Вселенной. В отличие от электромагнетизма, гравитационные «заряды» только притягиваются, а не отталкиваются, поэтому действие больших скоплений масс, накапливаясь, в больших космических масштабах может приводить к исключительно сильным гравитационным эффектам. Легко себе представить, что в масштабе всей Вселенной движение космических масс определяется прежде всего гравитационным взаимодействием. Неудивительно, что современная космология опирается именно на общую теорию относительности и потому носит название — *релятивистская космология*.

Разочарование Эйнштейна. Эйнштейн хорошо понимал это. Он писал: «С моей точки зрения, без использования принципов общей теории относительности невозможно достичь тео-

ретическим путем каких-либо надежных результатов в области космологии». Поэтому уже в 1917 г. он решил применить созданную им теорию тяготения для описания Вселенной в целом. Он получил исторически первую *модель* Вселенной. Под моделью Вселенной понимают идеализацию, позволяющую описывать всю материю. Для этого требовалось выбрать наиболее удобную систему отсчета для всей Вселенной, в которой можно было бы получить соответствующее решение уравнений Эйнштейна. Идеализация, использованная Эйнштейном, основывалась на следующих предположениях:

- 1) Вселенная стационарна (не меняется со временем);
- 2) Вселенная всюду однородна (не меняется от точки к точке в достаточно больших космических масштабах — порядка 10^8 световых лет и более);
- 3) Вселенная всюду изотропна: ее свойства не меняются от выбора направления, т.е. одинаковы вдоль любого луча зрения.

Ньютоновская теория тяготения оказалась неприменимой к описанию такой Вселенной. При такой идеализации в теории Ньютона возникал так называемый *гравитационный парадокс*. А именно, расчет по формулам ньютоновской теории показывал, что если Вселенную предполагать стационарной, а также однородной и изотропной, то на каждую точку в такой Вселенной должна была бы действовать либо бесконечно большая сила притяжения, либо нулевая, а это находилось в противоречии с повседневным опытом. Чтобы парадокс отсутствовал, требовалось предположить, что плотность вещества не распределена во Вселенной равномерно, а достаточно быстро убывает при переходе ко все большему объему пространства.

Теория Эйнштейна оказалась свободна от этого парадокса — в ней не возникало бесконечно больших сил притяжения, но в ней возникло другое затруднение. Требовалось ответить на вопрос: каким образом Вселенная может быть стационарной, если гравитационное отталкивание отсутствует, т.е. силы притяжения ничем не могут быть уравновешены? Массы всегда притягива-

ются друг к другу, и это неизбежно должно привести к необратимому гравитационному сжатию всей Вселенной — она должна неизбежно сколлапсировать. Никакой модели стационарной Вселенной не получалось. Эйнштейн был глубоко разочарован этим результатом.

Модель Эйнштейна. Стационарная Вселенная. Эйнштейн все же нашел разрешение задачи, но для этого ему пришлось видоизменить свои уравнения. В правую их часть он ввел дополнительное слагаемое — так называемый *космологический член* $\Lambda g_{\mu\nu}$. Если *космологическая постоянная* Λ положительна, то этим членом вводилась новая, пропорциональная расстоянию сила, действующая как сила космического отталкивания. Совместное действие притяжения и космического отталкивания могло обеспечить равновесное состояние Вселенной.

Положив $\Lambda > 0$, Эйнштейн получил решение своих обобщенных таким образом уравнений тяготения. Его решение описывало модель Вселенной в виде 3-мерной сферы — 3-мерного аналога поверхности футбольного мяча. Эта модель *замкнута*, т.е. имеет конечный пространственный объем. Никакого противоречия со здравым смыслом здесь нет: выход за рамки этой сферы невозможен и физически бессмыслен. Конечный радиус Вселенной R пропорционален массе M всех тел Вселенной: $M = 4\pi R/\kappa$. Описываемая этой моделью Вселенная, обладая конечными массой и пространством, не может существовать без масс. Это отвечало принципу Маха: свойства пространства определяются всеми массами Вселенной. Модель Эйнштейна полностью реализовывала принцип Маха.

Этот неуловимый Мах. Правда, оставался открытым вопрос: выполняется ли принцип Маха без введения космологического члена, для обычных уравнений Эйнштейна? Ответ был получен, когда В. де Ситтер уже в том же 1917 году нашел решения обобщенных уравнений Эйнштейна, которые соответствовали статической модели *пустого* мира. Оказалось, что даже при

$\Lambda > 0$ возможны пустые вселенные — искривленные миры без масс. Впоследствии оказалось, что пустые миры де Ситтера возможны и при $\Lambda < 0$, и при $\Lambda = 0$.

Можно подумать: Вселенная без вещества — это абстракция, далекая от реальности идеализация. На самом деле эта идеализация не так уж далека от реальности. Скоро мы увидим, что *средняя* плотность вещества в Метагалактике столь ничтожно мала, что в уравнениях ее можно полагать равной нулю. Это и будет «пустая модель»: это название не означает, что вещество во Вселенной отсутствует — оно сосредоточено лишь в отдельных сгустках материи — галактиках. Лишь на космических масштабах материю можно считать распределенной всюду равномерно.

Вопрос, как видим, имел принципиальное значение: если уравнения Эйнштейна допускают решения, описывающие всю Вселенную без масс, то принцип Маха в такой Вселенной не мог соблюдаться — инерция тел не могла быть объяснена массами всей Вселенной. Выяснилось, что, независимо от знака и значения Λ , теория Эйнштейна в общем случае несовместима с принципом Маха — тем эвристическим принципом, с помощью которого Эйнштейн строил саму теорию тяготения.

Миры Фридмана — нестационарные модели. Это уже озадачило Эйнштейна, но главный сюрприз ожидал его впереди. В 1922 г. петербургский ученый Александр Фридман (1888–1925), к сожалению, рано умерший от брюшного тифа, показал, что уравнения Эйнштейна имеют и другие, но уже *нестационарные* решения, которые тоже соответствуют однородной и изотропной Вселенной, причем уже не пустой. Эти решения означали, что Вселенная может расширяться, точно наполняемый воздухом шар, или сжиматься, точно шар, из которого выпускают воздух.

Эйнштейн хотел спасти идею вечной (стационарной) Вселенной, обобщив для этого свои собственные уравнения. Теперь оказалось, что и обычные, и обобщенные уравнения Эйнштейна при-

водили к нестационарной модели мира — расширяющейся или сжимающейся Вселенной.

Для получения решения космологической задачи нужно было найти специальную, физически преимущественную для данной идеализации систему отсчета. Фридман показал, что телом такой системы отсчета является сама однородная космическая среда: оказалось возможным выбрать координаты точек пространства так, чтобы скорость любой точки среды в любой момент времени была равной нулю. Такие координаты стали называться *сопутствующими* координатами. Сопутствующая система отсчета — не статическая, а деформирующаяся: она сжимается или расширяется вместе с веществом.

В сопутствующей системе отсчета линии, вдоль которых изменяется только координата времени x^0 , всюду перпендикулярны пространству, так что в сферических координатах решение уравнений Эйнштейна — линейный элемент ds — принимало вид

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2/R_0^2} + r^2 (\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2) \right]. \quad (36.1)$$

Здесь R_0 — константа, R — некоторая функция координаты времени: $R = R(t)$, причем $R_0 = R(t_0)$, если за t_0 принимать момент наблюдения. В формулу входит еще постоянная величина k (мы не должны ее путать с гравитационной постоянной Ньютона), которая может принимать лишь одно из трех значений: $k = 0, \pm 1$. Сопутствующее пространство (3-мерное пространство сопутствующей системы отсчета) обладает постоянной — одинаковой во всех точках кривизной k/R^2 , зависящей от времени (так как R зависит от t). При $k = +1$ пространство — сферическое: это пространство постоянной положительной кривизны Римана; при $k = 0$ пространство — евклидово; при $k = -1$ это — гиперболическое пространство Лобачевского. В первом случае пространство в любой данный момент времени ($t = \text{const}$) имеет конечный объем (замкнутая Вселенная), во втором и третьем случаях пространство бесконечно (открытая Вселенная).

Переменную $R(t)$ можно просто принимать за радиус Вселенной, если Вселенная — сферическая. Но и в случае открытых моделей ($k = 0$ или $k = -1$) та же величина $R(t)$, взятая в два разных момента времени, показывает, как изменяются размеры Вселенной от одного момента к другому. Она в любом случае характеризует размеры Вселенной — расстояния между удаленными галактиками. Ее значение R_0 в момент наблюдения t_0 характеризует современные размеры Вселенной.

Эйнштейн вначале не поверил этому результату Фридмана: он не мог себе представить Вселенную, которая не существовала бы вечно — расширялась из точки, а потом сжималась бы в точку. В его время во всей западной философии господствовало представление о неизменности Вселенной: «небеса длятся из вечности в вечность». Сначала Эйнштейн подумал, что Фридман ошибся в математических расчетах, но вскоре выяснилось, что Эйнштейн, пытаясь найти ошибку у Фридмана, сам допустил математическую ошибку. Тогда Эйнштейн снял свои возражения, публично объявив об этом в печати (только после этого научный мир признал результаты Фридмана). Признав свою ошибку, Эйнштейн сказал, что решение Фридмана проливает новый свет на Вселенную: Вселенная может быть не стационарной.

Через 7 лет, в 1929 г. знаменитый астроном Эдвин Хаббл (1889–1953) с помощью наблюдений за красными смещениями галактик получил убедительное доказательство того, что Вселенная действительно расширяется. Теория Эйнштейна предсказала фантастическое, никем не ожидавшееся расширение Вселенной. Это теоретическое предсказание было удивительнее, чем предсказание положения на небе планеты Нептун, сделанное У. Леверрье.

Уравнения гравитационного поля Эйнштейна оказались правильными — их не требовалось изменять, добавляя космологический член. Эйнштейн сказал потом, что вводить космологический член было не нужно — требовалось лишь признать расширение Вселенной.

Почему Эйнштейн с самого начала отказался от своего же собственного величайшего открытия? Почему он думал, что Вселенная существовала вечно? Это отчасти вопрос его мировоззрения, о чем мы поговорим позже.

Какую из моделей выбрать? Так или иначе, модели Фридмана для трех возможных типов кривизны пространства — замкнутого пространства при $k = +1$ и открытого при $k = 0$ и $k = -1$ — остаются до сих пор основой теоретической космологии. Астрономические наблюдения за распределением радиосточников на небе и в особенности открытие в 1965 г. изотропного космического микроволнового излучения подтвердили, что в наше время Вселенная действительно удовлетворяет в крупных масштабах условиям однородности и изотропии и потому описывается решением Фридмана.

Но возникал естественный вопрос: какую из фридмановских моделей следует привлекать для описания наблюдаемой Вселенной? Сферическую, или плоскую, или гиперболическую?

Сам Эйнштейн до конца жизни склонялся к фридмановской *замкнутой* модели — сферической модели конечного объема при $k = +1$ и при $\Lambda = 0$. Это — модель осциллирующей Вселенной: она начинает существование из точечного состояния — в результате взрыва, потом расширяется, достигая максимального радиуса, после чего сжимается, коллапсируя в точку (на рис. 36.1 это — модель вида O_1). Но наряду с ней при $\Lambda = 0$ возможны и модели типа M_1 — открытые модели для $k = 0$ или $k = -1$. Они отличаются от модели O_1 тем, что, начинаясь со взрыва, потом неограниченно расширяются, не переходя на стадию дальнейшего сжатия (еще две модели типа SE отвечают пустой Вселенной: это модели, отвечающие решениям Эйнштейна—де Ситтера).

При $\Lambda = 0$ нет космологических сил отталкивания или притяжения: действует лишь гравитационное притяжение, а оно ослабевает с расстоянием, т. е. с расширением Вселенной. Оно замедляет расширение и для замкнутой модели ($k = +1$) приводит к

стадии сжатия Вселенной. От чего зависит, будет ли Вселенная неограниченно расширяться или это расширение сменится сжатием? Это зависит от интенсивности гравитационного поля, а она, в свою очередь, — от количества тяготеющих масс, т. е. от средней плотности вещества (точнее, полной массы-энергии) во Вселенной.

Полная плотность *видимой* массы-энергии ρ во Вселенной близка к средней плотности массы покоя $\rho_{\text{м.п.}}$ галактик. Наблюдения дают для нее верхний предел $\rho_{\text{м.п.}} > 2 \times 10^{-31} \text{ г/см}^3$. Но не вся масса-энергия во Вселенной содержится в галактиках: часть энергии находится в виде космических лучей, часть — в виде массы межгалактического газа, часть — в виде галактических магнитных полей. В плотность энергии вносит свой вклад и реликтовое излучение, открытое в 1965 г. Наконец, может существовать и *скрытая материя*, т. е. ненаблюдаемая, — все это до-

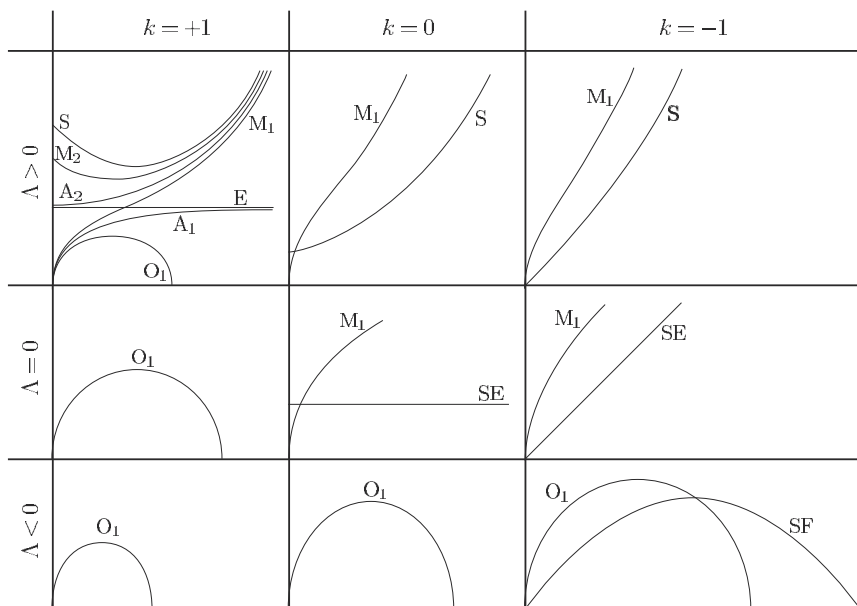


Рис. 36.1. Поведение R (по оси ординат) с изменением t (по оси абсцисс)

ставляет огромные трудности, препятствующие нам определить истинную среднюю плотность вещества, а тем самым ответить на вопрос: достаточно ли вещества (энергии) во Вселенной, чтобы «замкнуть» пространство? Если Вселенная замкнута ($k = +1$), то при $\Lambda = 0$ она описывается моделью O_1 и неизбежно должна будет вступить в фазу сжатия.

Однако трудности выбора истинной космологической модели на этом не кончаются. Эйнштейн, разочаровавшись в космологическом члене, потом в течение всей жизни отстаивал только космологию с $\Lambda = 0$. Однако введение космологического члена не противоречит принципам общей теории относительности — зачем выбрасывать его из уравнений? А. А. Фридман получал свои решения для общих уравнений Эйнштейна, совместимые с космологическим членом любого знака. Так что полная картина всех возможных моделей должна рассматривать не только случаи разных кривизн пространства: $k = 0, \pm 1$, но и разных космологических констант: $\Lambda > 0$, $\Lambda = 0$ и $\Lambda < 0$. Для всех возможных случаев эволюция моделей со временем представлена таблицей на рис. 36.1. На каждом из графиков по горизонтали отложено время, а по вертикали — функция $R(t)$, эффективный «радиус» Вселенной.

При $\Lambda < 0$, кроме гравитационного притяжения, действует космическое притяжение. Но космическое притяжение действует иначе, чем гравитационное: оно пропорционально расстоянию и потому усиливается с расширением Вселенной. Космические силы, начиная преобладать с расширением модели, в конце концов останавливают это расширение. Отсюда при $\Lambda < 0$ для всех трех значений k допустимы только осциллирующие модели типа O_1 (рис. 36.1).

При $\Lambda > 0$, кроме гравитационного притяжения, действует космическое *отталкивание*, которое усиливается с расширением модели. Эти две силы уравнивают друг друга только в одном специальном случае — случае стационарной модели Эйнштейна (модель E при $k = +1$). Однако равновесное состояние модели Эйнштейна неустойчиво: сколь угодно малое возмуще-

ние, не нарушающее однородности и изотропии мира, приводит либо к преобладанию притяжения и неограниченного сжатия до «особого состояния» (модели O_1 и A_1), либо наоборот, к преобладанию отталкивания и неограниченному расширению (модели A_2 и M_2). Между ними возможен промежуточный случай, как бы соединяющий свойства тех и других моделей: это модель M_1 при $k = +1$. Начиная эволюционировать от особого (сингулярного) состояния, она затем неограниченно расширяется. При $\Lambda > 0$, $k = 0, -1$ возможен уже только тип M_1 — постоянно расширяющаяся модель со сменой замедленного расширения ускоренным.

Из рассмотренных моделей видно, что всякая реальная (не пустая) модель однородной изотропной Вселенной нестационарна: она либо расширяется, либо сжимается — до сингулярного состояния или до модели минимального конечного радиуса. Стационарная модель Эйнштейна имеет только теоретическое значение: она неустойчива, и Вселенная не может постоянно пребывать в этом состоянии, т. е. иметь постоянный радиус. Из теории однородной изотропной Вселенной следует, что Метагалактика (а она в этой теории отождествляется со Вселенной) неизбежно является нестатической — не может находиться в покое.

Будущая эволюция Вселенной. Множественность имеющихся моделей фридмановской Вселенной, из которых должна быть выбрана лишь одна, — главная проблема, стоящая перед современной космологией. Вот главный вопрос: будет ли Вселенная продолжать расширяться вечно — или ее расширение замедлится, т. е. она остановится и начнет сжиматься к состоянию бесконечных плотности, давления, температуры и кривизны?

Чтобы получить ответ на этот вопрос, надо найти из наблюдений характеристики современного состояния Вселенной и, используя уравнения поля Эйнштейна, рассчитать будущую эволюцию Вселенной. Для предсказания будущего требуется знать три параметра: космологическую постоянную (Λ), современное значение кривизны пространства (k) и современную среднюю

плотность вещества (ρ_0). Иногда представляется удобным вместо этих трех космологических параметров выбрать три других: «постоянную Хаббла», «параметр замедления» и «параметр плотности». Из них параметр замедления дает наблюдательное ограничение на скорость замедления расширяющейся модели. Что касается постоянной Хаббла H_0 , то под ней понимается современная скорость расширения Вселенной: Хаббл установил, что галактики удаляются со скоростью, прямо пропорциональной расстоянию до них. С увеличением расстояния до галактики на 1 мегапарсек скорость ее удаления, по современным данным астрономических наблюдений, увеличивается приблизительно на 72 км/с:

$$\frac{\text{скорость удаления галактики}}{\text{расстояние до галактики}} = \text{«постоянная» Хаббла} \equiv H_0 \simeq 72 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпс}} . \quad (36.2)$$

Собственно, цифра 72 — это лишь среднее из многих значений H_0 , полученных в последние годы из различных астрономических наблюдений — за цефеидами, за сверхновыми звездами и другими космическими объектами. Эти значения лежат в весьма большом промежутке, от 64 до 80 км/с·Мпс (по данным проекта HST — Хаббловского Космического Телескопа — за 2001 г.).

Величина H обычно оценивается в современный период: $H_{\text{совр.}} = H_0$, но в принципе она может быть разной для каждой фазы эволюции Вселенной. Интуитивно ясно: чем быстрее расширяется Вселенная (разлетаются галактики), тем более сильное гравитационное поле может «замкнуть» геометрию пространства — тем больше массы-энергии потребуется для этого замыкания. Поэтому среднюю плотность массы-энергии — так называемое критическое значение $\rho_{\text{кр.}}$, необходимое для замыкания, — оказалось возможным непосредственно связать с постоянной Хаббла H_0 :

$$\rho_{\text{кр.}} = \frac{3}{8\pi} H_0^2 . \quad (36.3)$$

Вычисленное по формуле (36.3) значение критической плотности примерно на порядок превышает плотность наблюдаемого «светящегося вещества» в галактиках: $2 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Но неизвестно, какой вклад в плотность вносит скрытая масса, которую ищут в пространстве между галактиками.

Возраст Вселенной. Само явление расширения Вселенной по закону Хаббла означает, что некоторое конечное время назад Вселенная занимала очень малый (если не нулевой) объем. И хотя современная космология не позволяет отвечать на вопрос, существовала ли Вселенная до этого момента, она может в какой-то степени ответить на другой вопрос: когда Вселенная начала свое существование? Под *началом* существования Вселенной мы будем подразумевать то ее состояние, когда все вещество было сконцентрировано в исключительно малом объеме с огромной плотностью. Тогда под *возрастом Вселенной* можно понимать время, отделяющее нас от «начала Вселенной». Говоря иначе, возраст Вселенной — это время, протекшее с тех пор, когда любые две галактики, наблюдаемые сегодня разбегающимися друг от друга, «соприкасались» друг с другом. (Можно не вдаваться в детали эволюции галактик в течение того времени, когда они находились в тесном контакте друг с другом, поскольку это время составляло лишь малую часть их сегодняшнего возраста). Поэтому возраст Вселенной по порядку величины можно оценивать как отношение *относительного расстояния* $R_{\text{отн.}}$ к *относительной скорости* $v_{\text{отн.}}$ пары галактик:

$$T = \frac{R_{\text{отн.}}}{v_{\text{отн.}}} . \quad (36.4)$$

Но, согласно закону Хаббла (36.2), скорость разбегания галактик равна постоянной Хаббла H_0 , умноженной на расстояние между галактиками:

$$v_{\text{отн.}} = H_0 R_{\text{отн.}} . \quad (36.5)$$

Из (36.4)–(36.5) следует:

$$T = \frac{R_{\text{отн.}}}{H_0 R_{\text{отн.}}} = \frac{1}{H_0} . \quad (36.6)$$

Итак, возраст Вселенной равен обратной величине сегодняшнего значения постоянной Хаббла H_0^{-1} , что при современном значении H_0 в весьма грубом приближении — вследствие большого разброса вероятных значений H_0 — дает величину 20 миллиардов ($20 \cdot 10^9$) лет. Заметим, что эта оценка получена в предположении, что скорости галактик *не менялись* с течением времени. (Мы вскоре убедимся, что это предположение опровергается сегодняшними наблюдениями, и в данную нами оценку придется внести поправку).

Фактически величина $1/H_0$ дает в некотором достаточном приближении лишь значение возраста «открытой Вселенной». Возраст замкнутой Вселенной ($k = +1$), которой суждено испытать после расширения последующее сжатие, на самом деле должен быть меньше чем $1/H_0$. Он приблизительно равен $2/3H_0^{-1}$, т. е. составляет около 13 млрд. лет (при том же нынешнем значении постоянной Хаббла H_0).

Вечен ли мир? Бесконечна ли Вселенная? На эти философские вопросы может теперь давать свои ответы релятивистская космология. И эти ответы будут весьма неожиданными, как неожиданны почти все выводы теории Эйнштейна.

Прежде всего следует вспомнить, что объем Вселенной — трехмерное понятие и потому не обязан быть инвариантом при произвольных общековариантных преобразованиях. Мы знаем, что ни одна физически реальная космологическая модель не допускает статической системы отсчета: все они ускоренно движутся одна относительно другой. И вот наш космолог А. Л. Зельманов доказал удивительный результат: факт конечности или бесконечности объема космологической модели зависит от выбора системы отсчета. Более того, оказалось, что 4-мерный мир, в котором трехмерный объем Вселенной бесконечен, может быть *частью* другого 4-мерного мира, в котором трехмерный объем Вселенной конечен (такowymi оказались 4-мерные миры, описываемые решениями Леметра и Робертсона для фридмановской Вселенной). Таким образом, бесконечная Вселенная может вме-

ститься в конечный объем, стоит только перейти в другую систему отсчета. Это — крайнее проявление относительности пространственных расстояний в масштабе Вселенной, подобное тому, как на примере черной дыры мы видели крайнее проявление относительности промежутков времени.

Но, может быть, такое же крайнее проявление относительности времени может привести и к относительности самого времени жизни Вселенной? Мы задаемся вопросом: вечен ли мир или не вечен? Но, может быть, ответ зависит от того, в какой системе отсчета мы наблюдаем мир?

Современная космология не позволяет утверждать это. Если бы конечность или бесконечность времени жизни Вселенной была относительной, то относительным был бы и ответ на вопрос: возникла ли когда-то Вселенная или она существовала вечно? Но мир не мог существовать вечно. Современные физика и космология утверждают это категорически.

Не противоречит ли это закону сохранения массы-энергии? Да и, кроме того, как можно представлять себе рождение всей Вселенной из ничего? Оказалось, что Вселенная могла возникнуть из ничего без нарушений каких-либо известных законов физики. В релятивистской космологии доказывается теорема: полная масса (а значит, энергия $E = mc^2$) замкнутой фридмановской Вселенной равна нулю. Это объясняется тем, что энергия гравитационного взаимодействия частей системы отрицательна и точно компенсирует положительную энергию (массу) суммы всех частей, всего вещества. Энергия «ничего» равна нулю. Но и энергия замкнутой (т. е. имеющей конечный трехмерный объем) Вселенной тоже равна нулю. Почему же замкнутая Вселенная не могла родиться из ничего? Закону сохранения энергии это не противоречит. А фридмановская космология одинаково допускает как открытые, так и замкнутые модели.

Надо сказать, ученые встретили идею начала Вселенной без энтузиазма. Всем — не только Эйнштейну — хотелось верить в вечную Вселенную, в непреходящие небеса. Они вовсе не хотели верить, что Вселенная когда-то возникла. И, казалось бы,

фридмановские модели не исключали возможности вечной Вселенной — или вечно пульсирующей (модель типа O_1), или начинающей эволюцию не с нулевого, а с конечного минимального радиуса (модель M_2).

Вначале эта идея наталкивала ученых на гипотезу пульсирующей вечной Вселенной, причем была надежда, что в процессе пульсаций она не сжимается в точку. Но уже в 30-е годы был выдвинут серьезный термодинамический аргумент против вечной циклически повторяющейся Вселенной. Дело в том, что в ходе каждого цикла (расширение — сжатие) энтропия Вселенной растет. Это означает, что какое-то конечное число циклов назад энтропия Вселенной была равна нулю. Легко показывается, что амплитуда цикла (радиус Вселенной) с ростом энтропии увеличивается. Значит, конечное время назад Вселенная имела нулевой радиус. Циклическая модель тоже нуждается в начале мира. Она не спасает идею вечности Вселенной.

Раз цикличность Вселенной с конечным минимальным радиусом исключалась, оставалась лишь цикличность с сингулярностью. Тогда вспомнили, что фридмановские модели обладают особенностью при $t = 0$ (t — космическое время), называемой начальной сингулярностью. Однако все считали, что реализовать во Вселенной такое никак не может. Но с 1965 года, с открытием реликтового излучения (Пензиас и Вилсон) пришлось смириться и с мыслью о начальной сингулярности. Реликтовое излучение прямо показывало, что оно идет от «начала Вселенной», из ее сингулярного состояния. Тогда оставалось всего две альтернативы. Первая — вечная цикличность с переходом каждый раз через сингулярность; вторая — Вселенная возникла один раз из сингулярного состояния. Какую предпочесть? В обеих содержалась мистика, родственная с мифологией. Первая возможность напоминала древнеиндийскую мифологическую идею мировых циклов — смены «дней Браммы»: Вселенная разрушается полностью, а затем воссоздается, и так без конца, с идеальной равномерной цикличностью. Вторая возможность соединялась уже с библейским мифом о сотворении мира.

Весьма известный космолог XX века Леметр из этих двух альтернатив предпочел все-таки вторую. Первая альтернатива, сказал он, принципиально не отличается от второй. Если Вселенная проходит через сингулярное состояние в некоторый момент времени $t = 0$, раньше которого мы не можем получить о ней никакой информации, то предшествующая стадия, по его словам, «метафизична в худшем смысле этого слова». В обоих случаях при $t = 0$ мы имеем в полном смысле начало мира. Однако в первой альтернативе Вселенная в начале имела максимальную энтропию (вследствие полного разрушения всех предыдущих форм структуры материи). Поэтому она не позволяет объяснить возникновение новых структур — звезд, галактик: энтропия Вселенной тогда не росла бы, а уменьшалась. Вторая альтернатива все это объясняет, поскольку в ней энтропия в начале мира минимальна.

«Стандартная модель» Вселенной. Этим же объясняется, почему, несмотря даже на нерешенность вопроса о средней плотности массы-энергии, общепринятой в настоящий момент является *стандартная модель*, или модель *Большого Взрыва*. По этой модели (типа фридмановских моделей M_1 или O_1) Вселенная начинает свое существование из точки. Сама возможность такой модели гарантируется уравнениями Эйнштейна: объем Вселенной, вычисленный для фридмановского решения, при $t = 0$ обращается в нуль.

В этой модели начальную стадию Вселенной («раннюю Вселенную») называют *радиационной* стадией. Плотность энергии излучения в этой стадии превосходила плотность энергии обычных частиц вещества, и излучение полностью определяло эволюцию Вселенной. Хотя само вещество не играло на этой стадии существенной роли, гравитация уже играла свою роль — не через вещество, а через излучение. Любая энергия эквивалентна массе и потому порождает гравитацию. В данном случае огромная энергия светового давления порождала гравитационное поле, которое тормозило расширение Вселенной.

В течение первой секунды существования Вселенной ее температура была столь высока (порядка 10^{13} К), что энергии фотонов хватало для рождения пар всех известных частиц и античастиц. За эту первую секунду во Вселенной рождались и исчезали (*аннигилировали*) пары различных частиц и античастиц: протоны, нейтроны, мезоны, электроны, нейтрино и др. Затем, при понижении температуры до 5×10^{12} К почти все протоны и нейтроны аннигилировали, превратясь в кванты излучения. Если бы аннигиляция произошла полностью, то современной Вселенной не было бы: все вещество превратилось бы в излучение. Вещество во Вселенной существует только благодаря тому, что для некоторых частиц «не хватило» античастиц. Именно из этих «избыточных» частиц в основном состоит вещество наблюдаемой сейчас Вселенной.

Спустя несколько секунд после момента «рождения» Вселенной началась эпоха первоначального нуклеосинтеза — образования ядер атомов. Она продолжалась приблизительно 3 минуты, по истечении которых возникли современные химические элементы: образовались ядра гелия — 25% от массы ядер водорода. Остальные, более тяжелые элементы составили ничтожно малую часть вещества — около 0,01%. После эпохи нуклеосинтеза, примерно через 10^6 лет после начала расширения, Вселенная перешла в следующую стадию эволюции, называемую эпохой *рекомбинации*. Это уже не стадия излучения, а стадия вещества. Температура тогда понизилась до нескольких тысяч градусов. При такой температуре начинается объединение (рекомбинация) электронов, находившихся до этого в свободном состоянии, с протонами и ядрами гелия. На этой стадии началось образование атомов, в основном водорода и гелия. Теперь кванты, перестав взаимодействовать с уже нейтральными атомами, стали свободно путешествовать по Вселенной — Вселенная стала прозрачной для излучения. Так образовалось реликтовое излучение — тепловое излучение термодинамически равновесного «черного тела». Расширение Вселенной сопровождалось красным смещением, вызывавшим падение температуры T фото-

нов в соответствии с законом $T \sim 1/R$ (R — радиус Вселенной). Вследствие этого фотоны сегодня имеют чернотельный спектр с температурой 2,7 К. Они и были отождествлены с открытым в 1965 г. космическим микроволновым излучением, которое дает нам непосредственную информацию о природе Вселенной в момент последнего взаимодействия фотонов с веществом.

После рекомбинации давление фотонов перестало быть определяющим — вещество начало эволюционировать самостоятельно, независимо от излучения, и в нем уже под действием собственного гравитационного поля стали появляться уплотнения — зародыши будущих галактик и их скоплений. Это был процесс *гравитационной конденсации* вещества. Там, где плотность была чуть выше средней, сильнее было и притяжение, а значит, более плотные образования становились еще плотнее. Изначально почти однородная среда со временем разделилась на отдельные сгустки, из которых сформировались галактики. Это произошло спустя уже сотни миллионов лет после начала расширения.

Инфляционная модель. А как и когда возникла «материя» — элементарные частицы, какие мы сейчас знаем? В начале 80-х годов появились уже соображения о том, какой была «очень ранняя Вселенная» — уже не в первую секунду ее существования, а в моменты, начинающиеся с «планковского времени» $\sim 10^{-44}$ с. Была построена модель *инфляционной Вселенной*, согласно которой в самой ранней стадии Вселенная состояла из первоматерии, которую сейчас называют *физическим вакуумом*. Это соответствовало температуре $T > 10^{28}$ К. Вселенная в это время расширялась с невероятно большим ускорением, сохраняя при этом постоянную плотность энергии. Это возможно только в предположении, что давление физического вакуума было отрицательным (современная физика элементарных частиц допускает состояние материи с отрицательным давлением).

Стадия сверхбыстрого (называемого «инфляционным») расширения заняла ничтожный промежуток времени: она завершилась примерно к 10^{-36} с. Этот момент считается моментом «рож-

дения» элементарных частиц материи в нашем нынешнем представлении. Оно было вызвано процессом распада физического вакуума.

Физический «вакуум» — это действительно вакуум, отсутствие частиц в их обычном виде. Поэтому инфляционную стадию оказалось возможным описывать вакуумной (пустой) космологической моделью — моделью де Ситтера, отчего саму эту стадию называют иногда деситтеровской стадией существования Вселенной. В модели де Ситтера никакой материи нет (тензор энергии-импульса в уравнениях Эйнштейна равен нулю), но есть «поле» космологического члена ($\Lambda g_{\mu\nu}$). Фридмановские же модели описывают Вселенную лишь в более поздние периоды ее эволюции.

Насколько верны наши представления о прошлом Вселенной? Академик Я. Б. Зельдович однажды высказался, что теория Большого Взрыва «столь же верна, сколь верно то, что Земля вращается вокруг Солнца». С этим можно было бы согласиться, если бы теория Эйнштейна могла быть применима к описанию любых стадий эволюции Вселенной.

Макроскопически, т. е. в больших и средних масштабах теория Эйнштейна действительно описывает гравитационные поля со всей мыслимой точностью (об экспериментальных подтверждениях общей теории относительности на этих масштабах мы будем говорить в следующем разделе), но она неприменима к явлениям микромира: она создавалась не для объяснения этих явлений. Действительно, эта теория описывает гравитацию через геометрию пространства-времени. Сами же эти понятия «пространства» и «времени» утрачивают свой обычный классический смысл при переходе к масштабам порядка размеров элементарных частиц и к «планковскому времени», характерному для этих масштабов. Свойства вещества на сверхмалых масштабах изучает квантовая физика, но квантовая теория гравитации еще не создана. Как выяснилось, на таких масштабах геометрия 4-мерного пространства-времени неустойчива — она подвержена

флуктуациям, т. е. изменениям, не обусловленным движениями масс. Эти непредсказуемые флуктуации делают неопределенными сами понятия «до» и «после». По этой причине нельзя даже строго поставить вопрос: а что было *до* возникновения Вселенной? Можно лишь повторить саркастические слова блаженного Августина: до «творения» существовал ад, для тех, кто задает такой вопрос.

Более того, нельзя даже строго ставить вопрос: какой была Вселенная в первые мгновения своего существования? Например, была ли она открытой или замкнутой. Сами фридмановские модели не применимы к ранней (и тем более к очень ранней) Вселенной.

Так, инфляционная модель была призвана объяснить некоторые факты современного состояния Вселенной, которые не может объяснить фридмановская космология. К числу таких фактов относится факт однородности и изотропии нынешней Вселенной. Фридмановская космология принимает этот факт в качестве исходного, но не объясняет его. Неясным также является вопрос, почему пространство, в котором мы живем, близко к евклидову. Для этого, как мы знаем, средняя плотность вещества Вселенной должна быть близка к критической. В инфляционной модели точки, которые сильно разнесены сейчас друг от друга во Вселенной, в момент начала инфляционного расширения находились совсем рядом друг с другом. Вселенная в результате инфляции за ничтожное время возникла как гигантский однородный «пузырь», радиус которого на много порядков превышал размеры Метагалактики. Этим объяснялись сразу оба факта: в масштабах Метагалактики Вселенная действительно представляется и однородной, и приблизительно плоской (подобно тому как гладкая кривая в малом масштабе всегда приблизительно совпадает с прямой).

Несмотря на это, само применение модели де Ситтера к описанию физического вакуума основано на произвольном применении уравнений Эйнштейна к такому состоянию материи, которое

они не могут описывать. Инфляционная модель остается лишь произвольной, хотя и очень удобной гипотезой.

Проблема скрытой массы. Итак, когда речь идет о самых ранних моментах существования Вселенной, теория выходит за области, доступные современной физике. Даже самые преданные сторонники теории Большого Взрыва не могут сказать, что она в состоянии объяснить все, что нам необходимо знать о Вселенной.

Даже для более поздних эпох существования Вселенной эта теория не может претендовать на роль единственно возможного описания эволюции Вселенной. Однако она действительно дает удовлетворительную схему для объяснения многого из того, что наблюдают астрономы. Предсказания, делавшиеся на ее основе, впоследствии подтверждались наблюдениями. Поэтому большинство космологов принимают теорию Большого Взрыва вплоть до эпохи ядерного синтеза, когда возраст Вселенной составлял около одной минуты.

Тем не менее, в последние примерно 20 лет над этой теорией стали сгущаться тучи, которые были все-таки развеяны в 1998–99 гг.

Как уже говорилось, на выбор модели Вселенной существенное влияние оказывает значение современной средней плотности (ρ_0) вещества во Вселенной. Если $\rho_0 > \rho_{\text{кр.}}$, где $\rho_{\text{кр.}}$ — критическая плотность, определяемая формулой (36.3) и составляющая приблизительно 5 атомов водорода на 1 м^3 , то сила тяготения (гравитационное сжатие) превалирует над расширением, и мы имеем замкнутую Вселенную, эволюция которой заканчивается коллапсом (модель O_1). Если $\rho_0 < \rho_{\text{кр.}}$, то Вселенная расширяется ускоренно до бесконечности (открытая Вселенная типа M_1). Если же ρ_0 близка к $\rho_{\text{кр.}}$, то расширение неограниченно замедляется, никогда, однако, не прекращаясь. Это — «плоская» модель, которую тоже причисляют к открытым моделям Вселенной — см. на рис. 36.1 случай $\Lambda = 0, k = 0$.

Однако, значение средней плотности вещества, как мы знаем, зависит от количества скрытой массы — «темного вещества» во

Вселенной, вопрос о котором представляется до сих пор самым темным вопросом космологии.

Все доказательства существования скрытых масс в природе основываются на наблюдении движений видимых масс. Еще в 30-х гг. XX века Ф. Цвикки заметил, что галактики скоплений Волос Вероники движутся слишком быстро, чтобы это можно было объяснить их гравитационным притяжением. В 80-х гг. радиоастрономы измерили скорость облаков нейтрального водорода, расположенных далеко за краем видимого оптического диска спиральных галактик. Вместо предсказываемого теорией падения скорости вращения с удалением от центра, оказалось, что эта скорость остается неизменной, а иногда даже растет. Для спасения теории астрономы предположили, что галактики погружены в массивные сферические оболочки («гало») из невидимой материи.

Оставаясь в рамках существующих теорий, астрономы могут объяснять непонятную динамику галактик только предположением, что общая тяготеющая масса во Вселенной во много раз больше, чем светящаяся. При этом компенсирующей темной материи требуется все больше при переходе ко все большим космологическим масштабам: чем дальше, тем Вселенная становится все темнее и мрачнее для познания.

Уже несколько десятилетий идут попытки «увидеть» эту темную материю, т. е. постичь ее природу. Конечно, существует понятная и известная нам темная материя, как то: темные туманности, межгалактический газ и т. п. Однако все попытки определить суммарную массу этого «космического мусора» показывают, что его явно недостаточно, чтобы покрыть огромную потребность в темной материи. Все известные модели образования крупномасштабной структуры Вселенной вынуждены привлекать темную материю. В построении таких моделей существуют две конкурирующие версии, в зависимости от того, какая материя — горячая (нейтрино) или холодная (аксионы, барионы) — участвуют в процессе. Но ни одна из моделей не может избежать трудностей, так что сама концепция темной материи

устраивает далеко не всех. Чаще всего предлагается другое — модификация самой теории, т. е. самого закона тяготения. Требуются ли действительно радикальные изменения теории?

Проблема возраста Вселенной. Помимо указанного несоответствия между светимостью вещества и его динамикой выявилась еще одна проблема, которая также не могла быть решена в рамках стандартной модели. Это проблема соответствия возраста Вселенной с возрастом содержащихся в ней космических объектов. Возраст шаровых звездных скоплений и галактик известен астрономам на основе теории строения и эволюции звезд, которая хорошо согласуется со всеми известными наблюдениями. Можно не сомневаться, что она достоверно оценивает возраст звезд. По оценкам разных исследователей возраст старейших объектов в галактиках составляет от 14 до 17 млрд. лет. Если учесть большой разброс полученных значений постоянной Хаббла, то получалось, что возраст отдельных космических объектов может превышать возраст всей Вселенной. Вспомним, к тому же, что, помимо обратной постоянной Хаббла, теоретическое значение возраста Вселенной зависит от модели: оно тем больше, чем меньше плотность вещества. Это говорит о том, что на плотность темной материи существует ограничение, ее нельзя наращивать слишком сильно. При слишком большой мыслимой плотности темной материи проблема соответствия возраста Вселенной и возраста космических объектов становится неразрешимой в рамках фридмановских космологических моделей. В настоящее время всем наблюдательным данным наилучшим образом удовлетворяет модель «плоская», для которой $\rho_0 = \rho_{\text{кр.}}$, или $\Omega = 1$, где $\Omega = \rho_0/\rho_{\text{кр.}}$. Получалось явное противоречие: всем наблюдениям удовлетворяет модель с $\Omega = 1$, но теоретически она оказывалась необъяснимой, так как темной материи не хватает, чтобы обеспечить равенство $\rho_0 = \rho_{\text{кр.}}$. Но масло в огонь этой проблемы подлили в последние годы наблюдения астрономов за сверхновыми звездами.

Ослабление светимости сверхновых. В течение 1998 года две международные группы астрономов-наблюдателей (одна в Австралии, другая в США) проводили измерения зависимости светимости сверхновых звезд от расстояний до них. Сверхновые — это самые удаленные объекты, наблюдаемые во Вселенной. От наиболее далеких из них свет дошел до нас за 10 млрд. лет — за половину жизни Вселенной! Это гигантские маяки Вселенной, вспыхивающие в других галактиках раз в сотни лет с выделением колоссального (но примерно одинакового) количества энергии в виде излучения. Поскольку большинство из них страшно далеки от нас, то, по закону Хаббла, они удаляются от нас с огромными скоростями. Это проявляется в особенности спектров их излучения: они обладают очень большими «красными смещениями» — линии излучения в их спектрах смещены в красную сторону вследствие эффекта Доплера. По величине этих красных смещений можно определить скорости сверхновых, а по их скоростям — расстояния до них. Естественно, их светимость падает с расстоянием до нас. Однако теоретический закон, выражающий зависимость их светимости от расстояния, существенно зависит от выбора космологической модели. Выбор же модели, как мы знаем, зависит от средней плотности вещества, да еще от знака космологической постоянной Λ .

В большинстве случаев космологическая постоянная игнорировалась теоретиками, потому что ее значение никак не удавалось определить с помощью наблюдений. К тому же, играл свою роль авторитет Эйнштейна, отказавшегося от введения в свои уравнения космологической постоянной. Наблюдения же за сверхновыми показали, что их светимость падает с расстоянием сильнее, чем это обеспечивает какая-либо фридмановская модель с нулевой космологической постоянной. Так, оказалось, что 10 исследованных сверхновых находятся на расстояниях, которые на 10–15% больше, чем это допускают модели с $\Lambda = 0$. Это быстрое ослабление светимости пытались объяснять разными способами (наличием межзвездного газа в галактиках, эволю-

цией сверхновых во времени и др.), но все эти способы оказались несостоятельными. Стандартная модель оказывалась в тупике.

Новая жизнь стандартной модели. Наконец, была выдвинута «сумасшедшая» гипотеза, которая все объяснила и дала стандартной модели новую жизнь. Обе проблемы — скрытой массы и возраста Вселенной — были разрешены одним предположением: тем, что решающую роль в эволюции Вселенной играет не средняя плотность ее вещества, а совершенно иной вид энергии — энергия вакуума, вдвое превосходящая энергию вещества. Наблюдения за сверхновыми показывали, что Вселенная расширяется не замедленно, а ускоренно, оставаясь плоской — не за счет средней плотности вещества, а за счет положительного значения космологической постоянной. Оказалось, что все трудности разрешает модель типа M_1 при $\Lambda > 0$. Положительный космологический член действует подобно отталкивающему полю, противодействующему притяжению. Он отвечает *вакууму* — энергии вакуума, которая сейчас носит название *гравитационно-нескученной* (т. е. равномерно распределенной) *темной энергии*. Так как по абсолютной величине эта энергия превосходит энергию вещества, то Вселенная расширяется с ускорением — таким образом, как если бы она состояла из вещества, обладающего отрицательным давлением. Один из исследователей сказал в объяснение этого факта: слово «пустой» в физике означает «без вещества», но оно вовсе не означает «без чего бы то ни было».

Отпала необходимость искать большие количества темного вещества — тем самым была решена проблема скрытой массы. Одновременно была решена и проблема возраста Вселенной (несоответствие его с возрастом галактик): при ускоренном расширении он становится больше, чем H_0^{-1} , ибо в предыдущие эпохи Вселенная расширялась медленнее, чем сейчас.

Итак, стандартная модель (M_1) получила новое наблюдательное подтверждение, при условии, что доминирует в ней не энергия вещества, а энергия вакуума, приводящая к ускорению расширения. Оказалось, что материя составляет лишь малую

часть того, что содержит Вселенная: около 30% ее содержания. Из них на долю светящегося вещества приходится, по современным оценкам, менее одного (!) процента — все остальное вещество представляет собой невидимую *скупенную* материю, 25% которой является холодным веществом. Остальные 70% существуют в виде энергии «нематериальной» — энергии пустоты.

Кроме того, стало ясно, что видоизменять теорию тяготения Эйнштейна совсем не требуется. Требуется лишь принять уравнения Эйнштейна в их общем виде — в том, в котором их брал Фридман: с космологическим членом.

Эти результаты, ставшие в свое время сенсацией для самих ученых, теперь являются общепризнанными. Самые убедительные данные в пользу новой стандартной модели были опубликованы в 1999 году в журнале *Astrophys. Journ.*, т. 517, № 2.

Экспериментальные подтверждения ОТО



Несмотря на удивительную красоту эйнштейновской теории тяготения, и до и после нее появлялись другие теории гравитации, построенные на иных принципах. Но каждый раз, с появлением новых теорий тяготения оказывалось, что все экспериментальные проверки выдерживает только одна теория — эйнштейновская.

Косвенные проверки. Экспериментальные и наблюдательные проверки общей теории относительности следует разделять на прямые и косвенные. К косвенным относятся наблюдения, подтверждающие эвристические принципы, с помощью которых Эйнштейн строил свою теорию. Таковы были старые (Л. Этвеш) и новые (Р. Дикке, 60-е годы XX века) проверки равенства инертной и гравитационной масс. Даже опыт с маятником Фуко можно относить к проверке одного из эвристических принципов — принципа Маха. Однако не все эти *рабочие гипотезы*, которые использовал Эйнштейн, оказалось возможным согласовать с окончательно построенной теорией (это относится к принципу Маха, который потому и не сформулирован математически точно).

К числу подтверждений теории можно было бы относить и открытое Хабблом расширение Вселенной, и открытое Пензиасом и Вилсоном реликтовое излучение. Однако и это — лишь косвенные подтверждения. Реликтовое излучение доказывает лишь, что Вселенная однородна и изотропна — факт, который теория Эйнштейна не объясняет, ибо ей не противоречат и модели анизотропной неоднородной Вселенной. К расширяющейся же Все-

ленной приводит не только теория Эйнштейна, но и некоторые другие гравитационные теории.

Подтверждением общей теории относительности явилось бы экспериментальное доказательство эффектов, следующих из этой теории, — открытие гравитационных волн или обнаружение черных дыр; но не следует говорить о том, что еще не обнаружено, как о подтверждениях теории.

Перейдем к прямым наблюдательным данным, которые подтвердили после 1916 г. уже созданную теорию Эйнштейна.

Движение перигелия Меркурия. Теория Ньютона с большой точностью предсказывает движение и земных тел, и небесных светил. Иначе как бы Лавуазье мог открыть планету Нептун? Но и этой точности уже в XIX веке оказалось недостаточно. Тот же Урбан Лавуазье по наблюдениям за движением планеты Меркурий обнаружил, что с ее орбитой происходит нечто непонятное: ее перигелий смещается не так, как предсказывает теория Ньютона.

Если бы Меркурий был единственной планетой в Солнечной системе, то его орбитой был бы точный эллипс, в фокусе S которого располагалось бы Солнце (рис. 37.1). Центр эллипса C не совпадает с его фокусом. Если через точки C и S провести прямую, то она пересечет эллипс в точках A и A' . Ближе всего к Солнцу планета окажется в тот момент, когда она будет находиться в точке A , которая называется *перигелием* орби-

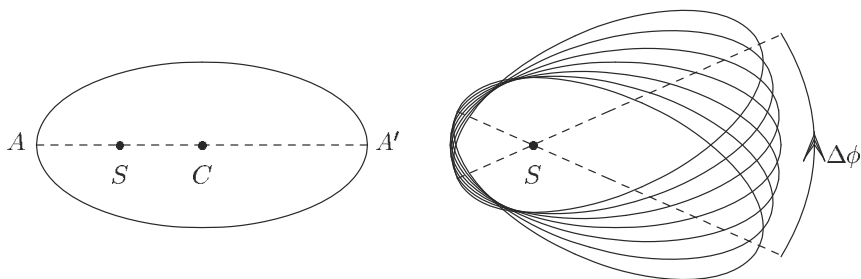


Рис. 37.1. Смещение перигелия Меркурия

ты. Согласно ньютоновской механике, притяжение других планет нарушает регулярность движения, и вместо того, чтобы год за годом двигаться по одной и той же орбите, планета будет описывать эллипс, перигелий которого непрерывно смещается — линия *СА* непрерывно поворачивается относительно неподвижных звезд. Вычисления, выполненные на основе ньютоновского закона всемирного тяготения, показывают, что суммарное влияние всех известных планет могло бы привести к повороту перигелия за столетие на 532 угловых секунд ($532''$). Наблюдения же показали, что в действительности этот поворот составляет 575 угл. сек за столетие. Следовательно, существует расхождение, составляющее 43 угл. сек за столетие и требующее своего объяснения. Обнаруженное различие может показаться очень маленькой ошибкой (в самом деле, 43 угл. сек — это угол, под которым глаз видит обычную среднюю монету на расстоянии 120 м). Однако эта величина значительно превосходила ошибки наблюдений и могла быть обнаружена. Вначале астрономы, в том числе Леверрье, пытались объяснить нерегулярности в движении Меркурия так же, как были объяснены возмущения планеты Уран. Леверрье предположил, что между Солнцем и Меркурием существует неизвестная до тех пор планета. Ненайденная планета уже получила название Вулкан (по гречески — бог огня). Именно она своим гравитационным возмущением могла вызывать непонятную аномалию (отклонение) в положении орбиты Меркурия.

Действительность оказалась проще (и сложнее), чем предполагал Леверрье. Никакой планеты Вулкан никто так и не смог обнаружить, потому что ее в действительности не было. Меркурий смещал свой перигелий не от возмущений неизвестной планеты. Отклонение возникало от того, что его движение следовало описывать более точной теорией — не ньютоновской, а эйнштейновской. Если мы заменим ньютоновский закон всемирного тяготения эйнштейновским законом пространства-времени, то расхождение теории с наблюдениями исчезнет.

В теории Эйнштейна планеты движутся вокруг Солнца как пробные тела, следовательно, по геодезическим линиям. Чтобы

определить истинное движение Меркурия в пространстве, требовалось проинтегрировать уравнения геодезических линий (33.1) в пространстве-времени, искривляемом центральным телом — Солнцем. Метрика центрально-симметричного гравитационного поля известна — это метрика Шварцшильда (35.3), где для вычисления гравитационного радиуса Солнца r_g надо в выражении $r_g = 2km/c^2$ вместо m подставить массу Солнца; это дает для гравитационного радиуса Солнца величину около 3 км. Интегрирование уравнений геодезической линии для этой метрики дает уравнение орбиты, выражающее зависимость радиус-вектора планеты от угла ее поворота ϕ при вращении вокруг Солнца. Это уравнение отличается от ньютоновского уравнения орбиты (конического сечения) малым дополнительным слагаемым. Малая поправка к траектории, даваемая теорией Эйнштейна, носит простой характер. Она приводит к тому, что если скорость планеты при движении по орбите есть v , то главная ось орбиты поворачивается за один оборот на дополнительный угол $\Delta\phi = 6(v/c)^2\pi$ радиан. Скорость v Меркурия нетрудно вычислить, зная продолжительность года на этой планете (88 земных дней) и среднее расстояние Меркурия от Солнца: 58×10^6 км. Средняя скорость Меркурия получается тогда приблизительно равной 50 км/с. Подставляя вместо c известную величину 3×10^5 км/с и учитывая, что один радиан содержит 206265 угл. сек, получим для величины дополнительного угла за 100 земных лет значение 43 угл. сек.

Мы произвели лишь приближенный расчет. А вот точное значение дополнительного угла, которое дает теория Эйнштейна: $43.03''$ за столетие. Наблюдения же дают сейчас результат $42.56'' \pm 0.94''$. Точность, с которой была подтверждена эйнштейновская теория, говорит сама за себя.

Эйнштейновскую поправку к смещению перигелия практически невозможно проверить на примерах остальных планет. Это связано с тем, что скорости других планет малы, а также с тем, что их орбиты имеют почти круговую форму, вследствие чего гораздо труднее измерить точное положение перигелия планеты.

Однако для планеты Меркурий теория Эйнштейна устранила аномалию, которая до того времени не имела объяснений.

Искривление светового луча. Еще Ньютон допускал, что свет может иметь вес. Сейчас известно, что свет, падающий на любой предмет, оказывает на него давление. Это эквивалентно утверждению, что свет обладает массой (энергией). Так, масса солнечного света, падающего на Землю за сутки, составляет около 160 тонн. Но если свет обладает массой, то световой луч, проходя вблизи Солнца, должен, подобно планетам или кометам, двигаться по криволинейной траектории независимо от того, подчиняется ли он законам Ньютона или Эйнштейна. Конечно, свет движется значительно быстрее любой планеты или кометы, поэтому отклонение света вблизи Солнца будет гораздо более слабым.

Если, распространяясь от звезды P в направлении Земли E , свет проходит вблизи Солнца S (рис. 37.2), то он будет отклоняться, так что отрезок ES не лежит на одной прямой с SP .

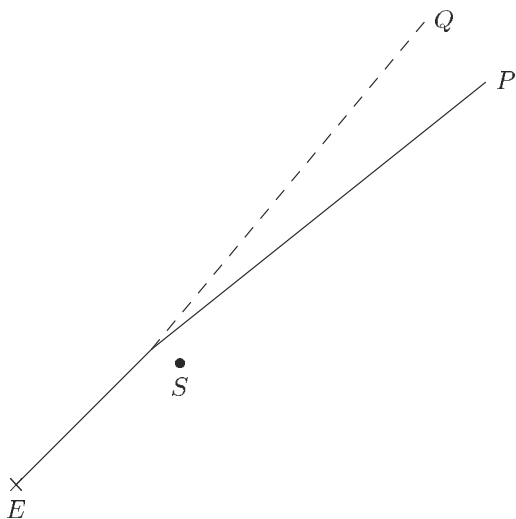


Рис. 37.2. Искривление светового луча от звезды P , идущего в направлении Земли (E), вблизи Солнца (S)

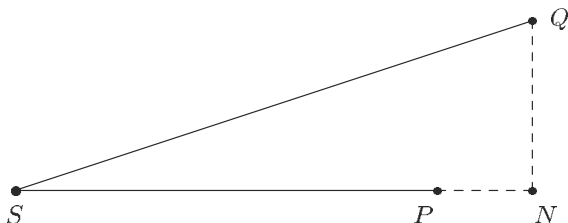


Рис. 37.3. К расчету интервала между двумя событиями в точках P и Q , происходящими в гравитационном поле Солнца (S).

В этом случае с Земли будет казаться, что звезда находится в направлении EQ , хотя истинное направление будет соответствовать линии EP . Смещение кажущегося положения звезды относительно ее истинного положения на небе характеризуется углом PSQ . Это смещение можно вычислить, однако теории Ньютона и Эйнштейна приводят к различным результатам. Н्यूтоновская теория — первое приближение к теории Эйнштейна. Эйнштейнова теория, так сказать, добавляет к закону Ньютона некоторую поправку, обусловленную искривлением пространства в окрестности Солнца.

Чтобы понять, какой будет эта поправка, запишем в приближенной форме шварцшильдовский интервал s для области пространства-времени в окрестности Солнца. Допустим, что S — центр массивного тела, подобного Солнцу, а P и Q — два события, происходящие в соседних точках пространства-времени (рис. 37.3). Проведем из Q перпендикуляр QN к линии, проходящей через S и P . Так как событие Q происходит вблизи P , то можно считать промежутки QN и PN малыми по сравнению с SP . Пусть, кроме того, промежутки времени t между P и Q также достаточно мал. Если теперь r_g — гравитационный радиус тела S , то интервал между P и Q будет приближенно равен

$$s^2 = \left(1 - \frac{r_g}{SP}\right) c^2 t^2 - \left(1 + \frac{r_g}{SP}\right) (PN)^2 - (QN)^2. \quad (37.1)$$

Если эту формулу заменить выражением

$$s^2 = \left(1 - \frac{r_g}{SP}\right) c^2 t^2 - (PN)^2 - (QN)^2, \quad (37.2)$$

то мы должны получить орбиты, которые будут совпадать с вычисленными на основе ньютоновского закона тяготения. Действительно, в используемом приближении первые слагаемые в формулах (37.1) и (37.2) не различаются: мы знаем, что g_{00} выражается через ньютоновский потенциал в виде $g_{00} = 1 - 2\Phi/c^2$. Дополнительный член $-(r_g/SP)(PN)^2$ соответствует замене евклидова пространства (не пространства-времени!) неевклидовым пространством. Именно наличие этого члена приводит к различию вычисленных значений смещения звезды в обеих теориях.

Если предположить, что свет от звезды проходит на расстоянии r (r — радиус Солнца) от центра Солнца, то видимое с Земли угловое смещение звезды, согласно теории Эйнштейна, составит $4r_g/r$ радиан, где, как мы знаем, $r_g = 3$ км. Подставляя вместо радиуса r величину 690000 км, получаем, что смещение составляет угол примерно в 1.75 угл. сек.

Ньютоновская теория приводит к смещению, равному $2r_g/r$ радиан, т. е. половину от требуемого теорией Эйнштейна. Справедливость одной из теорий должна была выявиться в результате прямых астрономических наблюдений.

Единственный момент времени, когда можно увидеть звезду, находящуюся на одной линии с Солнцем, — это момент полного солнечного затмения. Поэтому для наблюдений отклонения света неоднократно, начиная с 1919 г., совершались экспедиции по наблюдению звезд во время солнечного затмения. С 1969 г. появилась возможность измерения смещения звезд, не связанная с затмениями, — по измерению отклонений радиоволн от квазаров. Эти более точные наблюдения дали значения, очень близкие к предсказанному Эйнштейном. Для отношения наблюдаемого отклонения к предсказанному Эйнштейном были получены значения: 1.01; 1.04; 0.90; 1.07 с ошибками измерений от ± 0.12 до ± 0.5 .

Смещение спектральных линий. Атомные колебания давно используются как идеальные естественные часы. Если измерить промежуток времени между началом и концом колебания

двух одинаковых атомов, находящихся в одних и тех же условиях, то мы должны получить один и тот же результат, где бы ни происходили измерения. Представим теперь, что атомы находятся в разных условиях: один находится вблизи поверхности Солнца, а второй — в лаборатории на Земле. Можно считать, что с каждым из атомов события происходят в одном и том же месте пространства, так что пространственные координаты атомов не меняются.

Предположим, что период колебаний солнечного атома равен t_1 , а земного атома равен t_2 ; тогда для солнечного атома интервал выразится формулой

$$s^2 = \left(1 - \frac{r_g}{SP}\right) c^2 t_1^2 ,$$

где $r_g = 3$ км, а $SP = 690\,000$ км (радиус Солнца). Для земного атома интервал будет иметь значение

$$s^2 = \left(1 - \frac{r_g}{SQ}\right) c^2 t_2^2 ,$$

где $r_g = 3$ км, а $SQ = 150\,000\,000$ км (расстояние от Земли до Солнца). Оба значения s^2 равны, т. е.

$$\left(1 - \frac{r_g}{SP}\right) c^2 t_1^2 = \left(1 - \frac{r_g}{SQ}\right) c^2 t_2^2 .$$

Так как $SQ > SP$, то t_1 будет больше t_2 . Читатель сам может вычислить, что t_1/t_2 приблизительно равно 1.000002. Следовательно, солнечный атом колеблется чуть медленнее земного. Период колебаний характеризует окраску света, и поэтому по сравнению со спектром земного атома свет от солнечного атома должен быть несколько смещен в красную область.

Однако это смещение оказывается столь ничтожным, что не поддается измерению. Тем не менее при наблюдениях космических тел имеются случаи, когда можно ожидать большего смещения. Это, например, спутник Сириуса, известный под названием «белого карлика». Плотность этой звезды в 30 000 раз превышает плотность воды, в то же время радиус звезды составляет

лишь около 19000 км. Следовательно, гравитационное поле в ее окрестности будет столь интенсивным, что смещение становится доступным измерениям. Сотрудник обсерватории Маунт Вилсон Адамс получил результаты для смещения некоторых линий в водородном спектре этой звезды, которые подтверждают предсказания Эйнштейна.

Задержка радиолокационных сигналов. С развитием радиоастрономии стало возможным провести четвертую (ставшую тоже классической) проверку общей теории относительности. Она основана на проверке эффекта эйнштейновской теории — задержки во времени распространения радиолокационного сигнала при прохождении его в гравитационном поле Солнца. На этот эффект впервые указал И. Шапиро (1964 г.).

Пусть радиолокационный передатчик на Земле посылает радиоволну к отражателю, расположенному в другом месте Солнечной системы, и пусть отражатель возвращает волны на Землю. Тогда можно измерить время распространения волны туда и обратно по часам на Земле и сравнить это время с теоретическим значением, следующим из теории Эйнштейна: по этой теории время распространения сигнала должно быть меньше того, которое получалось бы без учета искривленности пространства-времени.

Начиная с 1966 г. были проведены соответствующие эксперименты. В экспериментах в качестве отражателя использовались как поверхности планет (Венеры, Меркурия), так и электронное оборудование, установленное на борту космического корабля (в частности, на Маринере VI), которое получает сигналы и передает их обратно на Землю. Возникающие при этом помехи оказались меньше, чем исследуемый релятивистский эффект, почему и оказалось возможным его измерение.

Для отношения наблюдаемой задержки к предсказанию Эйнштейна были получены значения 0.9; 1.015; 1.00 при формальной стандартной ошибке от ± 0.014 до ± 0.02 . Теория Эйнштейна была убедительно подтверждена и на этот раз.

К настоящему времени эффекты общей теории относительности надежно проверены по наблюдениям не только в Солнечной системе, но и за ее пределами: например, по движению радиопульсара PSR 1913 + 16, входящего в двойную звездную систему. Теперь общая теория относительности уже перестала быть только проверяемой теорией — она практически используется как рабочая теория для составления астрономических ежегодников, для расчета движения больших планет, Луны, космических аппаратов. Ньютоновской точности для этого уже недостаточно.

ОТО: итоги и перспективы



Насколько теория нуждается в эксперименте? Из экспериментальных подтверждений общей теории относительности особенно ясно видно, сколь мало построение самой теории опиралось на эксперимент. Она не выводилась непосредственно из фактов опыта и создавалась не для объяснения фактов. В этом ее особенность, отличающая ее от всех других физических теорий. Она заставляет говорить о совсем новом методе построения теории. Это уже не ньютонов индуктивный метод рационального осмысления фактов.

Так, никому даже в голову не приходило, что для объяснения аномалии движения Меркурия требуется отказаться от теории Ньютона и создавать новую теорию. С другой стороны, Эйнштейн, создавая новую теорию тяготения, сам меньше всего думал об объяснении этой аномалии. Очень многие теории тяготения строились *ad hoc* — для объяснения какого-то одного, ранее не объясненного явления. Но они рано или поздно приходили в противоречие с другими, вновь открываемыми явлениями. Лишь с теорией Эйнштейна этого не случилось: ни один до сих пор вновь открытый факт не поколебал ее, потому что она не создавалась *ad hoc* для объяснения фактов.

В отличие от всех других теорий, общая теория относительности открыла эффекты, не ожидавшиеся и даже не допускавшиеся ранее, — и лишь после создания теории эти эффекты были обнаружены на опыте. Такого торжества теории до Эйнштейна не было. В этом даже Ньютон уступил Эйнштейну.

Физика как геометрия. Особенность теории Эйнштейна заключается в ее основной идее — геометризации физического по-

ля. Физика стала описываться геометрией. В этом — уникальность и источник удивительной красоты теории гравитации Эйнштейна, которой не обладает ни одна другая теория и которую признавали все физики.

«Бог всегда является геометром» — уже древние греки вынашивали эту мечту о едином чисто математическом описании Природы. Еще Пифагор стремился определить положения светил на небесной сфере единой математической формулой, совпадающей с формулой соотношений музыкальных тонов. В 30-е годы XX века известный английский физик-теоретик Артур Эддингтон, глубокий знаток общей теории относительности и ее первый пропагандист, увидел в эйнштейновской идее геометризации возможность постижения ритма мира — чисто интеллектуального созерцания структуры Вселенной. Красота общей теории относительности поистине изменила самый тип научного мышления. Перед физикой возникла перспектива стать вполне теоретической — свободной от прямых ссылок на эксперимент. Стало возможно мыслить Вселенную чисто математически, используя наблюдения лишь для контрольной проверки выводов разума. Об этом преображении физики за период от XVII до XX веков Эддингтон высказался так: «Ранее Бога представляли инженером, теперь же он — математик».

Идея геометризованной физики изменила также представление о том, что такое означает соотношение теории с опытом. Если теория создается для объяснения экспериментальных фактов, то она становится рабыней фактов. Факты диктуют теории, какой она должна быть. Такая теория легко превращается в банальность, в тавтологию. Исходя из фактов, она не может им противоречить. Это выражается в том, что теория содержит в себе тот самый элемент, через который она проверяется на эксперименте, а именно силу. На опыте измеряется действие силы на частицу, изменяющее ее движение. Закон же действия силы выбирается именно таким, чтобы теория соответствовала наблюдаемому действию силы. В теорию вторгается порочный круг: теория должна «объяснять» то, что заложено в ее же основаниях.

Такого рода теории, как замечал Эйнштейн, годятся лишь для практического использования (и, может быть, даже для декартова «господства над природой»), но не обогащают разум. Сведя физику к геометрии, Эйнштейн исключил силу из физической теории. Этим он сделал теорию *суверенной*, не зависящей от опыта. И только тогда сопоставление теории с экспериментом приняло подлинно доказательный характер. Теория, построенная Эйнштейном, выражаясь на современном философском языке, является *фальсифицируемой*, т. е. в принципе опровержимой на опыте. Соответствие такой теории опыту является настоящим, доказательным подтверждением теории.

Путь к священному граалю. Как неоднократно указывалось, Эйнштейн для создания теории руководствовался принципами, некоторые из которых потом оказались несовместимыми с созданной теорией. Это, конечно, означает, что Эйнштейн мог руководствоваться и иными эвристическими принципами. Можно согласиться со словами известного физика-гравитациониста Г. Бонди: «Сейчас, спустя 70 лет, разумеется, можно восхищаться теорией гравитации Эйнштейна и принимать ее, отвергая в то же время его путь к ней, каким бы полезным эвристически ни считал его сам Эйнштейн».

Путей к современной теории гравитации действительно было много, так что по ее созданию можно было даже забыть про них. Путь к созданию общей теории относительности можно сравнить с теми горными скалистыми тропами, которыми рыцари Круглого Стола пробирались к феерическому замку Монсальват — хранилищу священного грааля. Путник добрался до замка и ослеплен его величественным видом — стоит ли помнить, каким путем он нашел его?

Как получилось, что принцип Маха отсутствует в теории Эйнштейна, для построения которой он сыграл такую значительную роль? Это было неожиданностью для самого Эйнштейна, который вначале считал, что в отсутствие масс пространство-время не может быть искривленным — оно должно являться пространством Минковского. Между тем выяснилось, что в теории

Эйнштейна пространство-время обладает физическими свойствами даже в отсутствие всякой материи. Это подтвердилось точными решениями уравнений Эйнштейна, описывающими искривленные миры, не содержащие масс. Их даже стали называть «антимаховыми мирами». Возможность таких решений связана с нелинейностью уравнений поля Эйнштейна: гравитационное поле может быть источником самого себя, не нуждаясь в массах. В этом разъяснении содержится и ответ: принцип Маха формулировался на языке классической физики, без какой-либо идеи ее геометризации. Геометризация гравитационного поля сделала принцип Маха не обязательным: пространство-время — абсолют, который может существовать сам по себе, без вещества. Если бы Эйнштейн сразу пришел к идее описания гравитационного поля через тензор Римана, ему для построения теории не понадобился бы принцип Маха.

Некоторые физики (например, Дж. Синг) отрицают также роль принципа эквивалентности в общей теории относительности. Когда эта теория уже была создана, он мог быть исключен *как принцип*, потому что стал следствием теории, в которой частицы движутся по геодезическим. Из уравнений геодезической линии (33.1) видно, что ни в левую, ни в правую их часть не входит масса частицы. Инертная и гравитационная массы уже «сокращены», и нет необходимости обсуждать их равенство — оно соблюдается автоматически. Здесь тоже сыграла свою роль геометризация поля: частица движется так, как ей указывает геометрия пространства-времени.

Оба эти принципа сыграли свою роль строительных лесов при возведении здания теории. Когда здание возведено, леса убирают: они лишь портят вид прекрасного фасада.

Возрожденный эфир. Геометризованное поле ведет себя как абсолют — оно зависит от масс, но может существовать и без них. Каким образом теория относительности стала теорией *абсолютности*?

Это связано с геометрическими свойствами гравитационного поля — тензорного поля кривизны 4-мерного пространства-

времени. Тензор Римана неуничтожим преобразованиями четырехмерных координат. Он указывает частицам, как им двигаться, точнее — как ускоряться одной относительно другой. Показав иллюзорность абсолютных пространства и времени, Эйнштейн нашел подлинную физическую реальность, управляющую движением тел, — псевдориманов 4-мерный мир V_4 . Это он, мир Эйнштейна, а не наше привычное трехмерное пространство действует на тела. Четырехмерное пространство оказалось реальнее обычного трехмерного. Идеальное оказалось реальнее, чем материальное: именно оно описывает все наблюдаемое в материальном мире.

Эйнштейн много раз поражал физиков-современников. В очередной раз он шокировал их в 1924 году, сказав, что его теория гравитации возродила старое понятие эфира — то самое понятие, которое, казалось, навсегда было похоронено его частной теорией относительности. Теперь понять это нетрудно. Роль прежнего абсолютного субстрата — неустранимой и вездесущей среды — в общей теории относительности играет эйнштейновский мир V_4 , или поле кривизны, которое тоже абсолютно (неустранимо). Эйнштейн объяснил это так: «Мы не можем в теоретической физике обойтись без эфира, т. е. континуума, наделенного физическими свойствами, ибо общая теория относительности исключает непосредственное дальноедействие; каждая же теория близкоедействия предполагает наличие непрерывных полей, а следовательно, существование эфира».

Метафизические элементы общей теории относительности. Теория Эйнштейна уничтожила метафизические постулаты Ньютона: дальноедействие, абсолютные пространство и время, принцип инерции. В ней необязательна концепция материальной точки. Исключен такой метафизический элемент, как сила, и тем более сила инерции, замененная теперь действием на тела новой метафизической сущности — псевдориманова пространства-времени. Место ньютоновых абсолютот занял новый абсолют — пространственно-временной континуум, в полном смысле метафизический. Он в принципе недоступен ни глазу,

ни прибору, приспособленным лишь к трехмерному восприятию. Кривизна этого мира, сама по себе недоступная наблюдениям, определяет все наблюдаемое движение тел.

Геометризация поля привела к тому, что объектом физической теории стала совсем иная реальность — не «природная», а идеальная (метафизическая).

Частная теория относительности, устранив мгновенное дальное действие, восстановила понятие естественной причинности — физического действия одних событий на другие. Но уже она утверждает существование событий, причинно не связанных друг с другом. Еще более необычные причинные структуры пространства-времени вскрыла общая теория относительности.

Необычная причинность проявляется прежде всего в сингулярностях гравитационного поля — мировых точках, в которых характеристики полей и материи (плотность, кривизна) обращаются, вследствие положительности всех гравитационных «зарядов», в бесконечность. В этих точках рушатся законы физики, формулирующиеся на основе классического пространства-времени, подобно тому как в неинерциальных системах отсчета рушится ньютоново абсолютное пространство и ньютонова механика. Это делает сингулярности принципиально непознаваемыми. Существование сингулярностей, неустранимых никакими преобразованиями системы отсчета, — один из существенных метафизических элементов общей теории относительности. Факт их существования означает невозможность предсказания будущего: неизвестно, какая информация будет выходить из образовавшейся сингулярности.

Сингулярности в общей теории относительности обнаруживаются при изучении двух астрофизических объектов:

- 1) черных дыр, возникающих в результате коллапса изолированных областей с высокой концентрацией массы;
- 2) Вселенной в целом («Большой Взрыв», считающийся началом Вселенной).

Обе эти сингулярности неустранимы заменой системы отсчета и не могут быть закрыты горизонтом. Факт существования син-

гулярностей создает фундаментальное ограничение предсказуемости явлений: классическая теорема об «отсутствии волос» у черной дыры утверждает, что внешний наблюдатель не может предсказывать внутреннее состояние черной дыры, не может даже знать о ней ничего, за исключением трех характеризующих ее параметров — массы, момента импульса и заряда.

Таковы метафизические постулаты современной теории тяготения. Вначале Эйнштейн, как и все физики его времени, тоже боялся метафизики, отрицая возможность возникновения Вселенной, но дело его рук оказалось сильнее его самого: его теория допускает возникновение Вселенной «из ничего» — из точки. Для этого не нужно библейского Бога: Бог Эйнштейна — это математик.

Альберт Эйнштейн: личность и судьба



Космическая религия Эйнштейна. Эйнштейн, как мы знаем, с самого начала ни в какой форме не принимал идею о возможности возникновения мира, и это может даже показаться странным. Ни у кого из тех, кто рос в традициях иудейско-христианского мировоззрения, акт сотворения Вселенной не мог вызывать особенного удивления. Тем более у Эйнштейна, теория которого сама предсказала возникновение Вселенной из точки.

Эйнштейн сам разъяснил это, уже будучи в преклонном возрасте, на 68-м году жизни: «Хотя я и был сыном совсем нерелигиозных (еврейских) родителей, я пришел, вследствие традиционного воспитания, к глубокой религиозности, которая, однако, уже в возрасте 12 лет резко оборвалась. Чтение научно-популярных книжек привело меня вскоре к убеждению, что в библейских рассказах многое не может быть верным ... Такие переживания породили недоверие ко всякого рода авторитетам и скептическое отношение к верованиям и убеждениям, жившим в окружающей меня тогда социальной среде. Этот скептицизм никогда меня уже не оставлял».

Эйнштейн шел к познанию таким же путем, как Галилей, который тоже не захотел черпать истины о природе из Священного Писания. Утратив религиозный рай молодости, внушенный традиционной верой, он, по его же словам, нашел другой рай. «Дорога к этому раю была не так удобна и завлекательна, как дорога к религиозному раю, но она оказалась надежной, и я никогда не жалел, что по ней пошел».

«Самое непонятное в этом мире, — написал однажды Эйнштейн, — это то, что его можно понять». Все наши попытки понять мир, считал он, «... основаны на уверенности, что бытие об-

ладает совершенно гармоничной структурой. И ныне у нас меньше, чем когда-либо, оснований позволить себе отойти от веры в это замечательное обстоятельство».

Такова была его новая вера. Утратив веру в библейского Бога, он нашел веру в Бога, подобного Богу Спинозы, — веру в гармонию Вселенной. Она была вполне в духе традиции древних греков, для которых мир был гармонией — Космосом, устроенным на математических началах.

Эйнштейн стремился в XX веке обрести то, что было давно утрачено, — новый Космос — единое математическое описание всей природы и всех взаимодействий.

Спиноза, оказавший наибольшее влияние на философское мировоззрение Эйнштейна, учил, что только математический способ мышления ведет к истине. В природе нет ничего такого, что противоречило бы ее законам, законы же постигаются математическим умом, поэтому сам ум и душа человека — часть единой разумной субстанции, вне которой нет ни природы, ни Бога. Бог — это то же, что и всеобъемлющая природа, и познавая природу, мы познаем Бога и себя.

В 1656 г., в возрасте 24 лет Спиноза был отлучен от еврейской Церкви (синагоги) за некое «страшное и ложное учение». «Ложь» этого учения заключалась в том, что оно отклоняло ветхозаветное верование в сотворение мира. Где в том «ничто», которое было до существования мира, висели часы, сказавшие Вселенной, что она должна возникнуть?

Значило ли это, что Спиноза не верил в Бога? Нет, он верил, но только не так, как раввины (его церковные наставники). Он верил в Бога как в высший всеохватывающий Разум: Бог не мог сделать нечто неразумное или противоречащее разуму — так полагал Спиноза, а сотворение Вселенной *из ничего* противоречило человеческому разуму. Природа вечна и разумна, потому что она тождественна вечному и разумному Богу. Но этот Бог, в которого верил Спиноза, не был Бог Священного Писания.

Сопоставьте это со словами Эйнштейна, сказанными в 1930 г.: «Я не верю в Бога, который награждает и карает...». Нью-Йоркский раввин Г. С. Гольдштейн, видимо, не удовлетворился

таким исповеданием веры. Он послал Эйнштейну в Европу телеграфный запрос: «Верите ли Вы в Бога?» Эйнштейн тут же по телеграфу дал уточнение: «Я верю в Бога Спинозы, проявляющего себя в упорядоченности мира, но не в Бога, занимающегося судьбами и делами людей».

Он, следовательно, тоже не верил в Бога Священного Писания. Для него, как и для Спинозы, слово «Бог» был выражением слова «Природа». Это отождествление Бога и Природы, называемое *пантеизмом*, было, по словам Вольтера, лишь «вежливой формой атеизма». Действительно, ортодоксальная Церковь решительно борется с пантеизмом, отстаивая идею единого *личного* Бога. Действительно ли пантеизм есть безрелигиозность?

Эйнштейн говорил о «мистическом трепете» и «подвижническом восторге», которые вызывает у него познание «безграничной разумности» устройства мира. «Высшая мудрость и красота» Природы повергали его в какой-то детский экстаз (нечто подобное он говорил про Э. Маха). «Знать и чувствовать это — есть источник истинной религиозности». В этом смысле Эйнштейн прав, относя себя к религиозным людям: «Эта глубокая эмоциональная уверенность в высшей логической стройности устройства Вселенной ... есть моя идея Бога».

Такова была *космическая религия* Эйнштейна, в которой он сам исповедовался постоянно и открыто. В американский период его жизни (с 1933 г.) он получал в ответ публичную брань и угрозы: «почему разрешают какому-то иммигранту глумиться над верой в Бога?»

Его мировоззрение. Очевидно, религия была для Эйнштейна не слепой верой, а зрячей — частью его философского мировоззрения. Он разумом верил в Разум, ибо Природа была для него высшим проявлением разумного. Поэтому естественно, что *само его научное творчество было религиозно*.

Эйнштейн однажды сказал, что созданию общей теории относительности он больше всего обязан своей безграничной вере в глубочайшую внутреннюю красоту и *разумность* Вселенной. Только приняв это во внимание, мы поймем его слова, ска-

занные в 1918 г. в его «планковской» речи: «К основным положениям физической теории ведет не логический путь, а только интуиция, основанная на вчувствовании в опыт». Что он понимал под «интуицией»? Неужели он противопоставлял ее разуму? Нет, он только считал, что не существует единого логического пути от опыта к теории — логики недостаточно для создания теории. «Вчувствование в опыт» — значит постижение Природы на основе «свободного творчества человеческого духа» — вот что Эйнштейн имел в виду под «интуицией». Физическая теория создается «свободным творчеством», а не логической рассудочностью — между ними Эйнштейн полагал огромную разницу. В принстонских лекциях (1921 г.) он определил науку как «создание человеческого разума с его свободно изобретенными идеями и понятиями». Понятия — это свободные изобретения разума; аксиомы или законы теории — догадки, их нельзя логически вывести или получить путем индукции из опыта.

Это был уже иной метод, не ньютоновский. Вера в такую «интуицию» как свободное изобретение идей — это вера в мощь человеческого разума, которую Эйнштейн разделял со Спинозой. Создавая теорию гравитации, он исходил из опыта («вчувствовался в опыт»), но, по его словам, его свободные идеи позволили ему обнаружить удаленность глубокой структуры пространства и времени от прямых чувственных восприятий. Так Эйнштейн своей интуицией претворял опыт в познание.

Его детство. Он родился в городе Ульме (Германия) 14 марта 1879 г. Было нечто символическое в том, что Эйнштейн родился в год смерти Дж. К. Максвелла (1879), как Ньютон родился в год смерти Галилея. Эйнштейн принял от Максвелла эстафету полевого подхода к физике. Правда, он принесет потом эстафетную палочку к такому финишу (геометризация физики), который Максвеллу даже не снился.

Кто мог разглядеть будущего реформатора естествознания в маленьком Альберте? Он поздно научился говорить: составить правильную фразу — непростая штука!

«Не падай духом, Альберт! — подбадривал его любимый дядя Якоб. — Подумаешь: не из каждого же получается профессор!»

Он был неразговорчивый, задумчивый, мечтательный мальчик, не любивший физических упражнений или игр с другими детьми. Зато с пяти лет сосредоточенно слушал, как мать играла на рояле Бетховена, и скоро сам научился играть на скрипке; она стала спутником всей его жизни (то же было и с юношей Яношем Больяи). С детства он играл Моцарта — более любимого композитора для него не было. Моцарт станет для него символом гармонии и радостного проникновения в гармонию Вселенной.

С девяти лет его отдали в католическую подготовительную школу, а в 10 лет он поступил в гимназию Луитпольда. У него вызывала отвращение казарменная дисциплина школы, где, не вникая в смысл, заучивали греческий, латынь и грамматику. Мать укоризненно смотрела на оценки, выведенные в балльной ведомости. Похвалиться было нечем. Лишь в математике он всегда шел первым: интерес к этой науке привил ему дядя, инженер. В математике ребенок ощущал гармонию; и, окончив уроки, играл Моцарта.

Много позже Эйнштейн говорил уже не об одном собственном детстве: он высказался об установившейся системе образования вообще. «Мне в детстве не давал покоя вопрос, почему Луна не падает на Землю, но взрослые, которым я надоедал с этим вопросом, не придавали ему никакого значения. Наша школа не развивает этой способности удивляться — она заглушает ее. Даже необыкновенно, что она не окончательно истребила у людей стремление исследовать природу!»

Его карьера. Исключенный из гимназии, не получив аттестата о среднем образовании, Альберт вскоре переезжает в Милан вместе с родителями: оставить родину их принудили пошатнувшиеся финансовые дела. Тут Альберт сказал отцу, что намерен отказаться от германского подданства и решил также покинуть еврейскую религиозную общину. «Я не препятствую, — сказал отец. — Тебе 16 лет. Я разорен и не смогу поддерживать тебя долго. Скорее приобретай специальность. Астрономы и скрипа-

чи не так-то уж до зарезу нужны в наше время! Инженеры с хорошим дипломом и учителя нужнее ...»

Осенью 1895 г. Альберт подал свои документы в знаменитый цюрихский Политехнический институт, известный рассадник научных знаний в Европе: там преподавал сам Герман Минковский.

Поступить сразу не удалось: с треском провалился по французскому и ботанике; но вот он, наконец, студент факультета математики и естественных наук. Долгожданный диплом, который он получил в 1900 г., а также документы гражданина Швейцарской республики давали ему право, во всяком случае, на должность гимназического учителя. Он мог рассчитывать даже на оставление при Политехникуме для подготовки к профессоруре. Ему не удалось ни то, ни другое.

Ни один из ученых мужей, наперебой хваливших его способности, не взял его к себе в ассистенты. Сам Эйнштейн, вспоминая молодость, говорил: «Я был третируем моими профессорами, которые не любили меня из-за моей независимости и закрыли мне путь в науку ...»

По окончании института Альберт не мог в течение двух лет найти себе постоянную работу. Даже двери школ оказались для него закрытыми. «Нужда была так остра, — вспоминал Эйнштейн, — что я не мог размышлять ни над одной абстрактной проблемой в течение целого года». Именно в это время от постоянных недоеданий он получил болезнь печени, от которой не мог избавиться всю жизнь. Наконец, в 1902 г. счастье улыбнулась ему, благодаря его институтскому другу М. Гроссману: тот помог ему получить место «эксперта третьего класса» — референта Патентного бюро в Берне. Только тогда Эйнштейн смог обзавестись семьей.

1905 год. Эйнштейн — в 26 лет — уже создатель теории броуновского движения, фотонной теории света и частной теории относительности, а работает по-прежнему в должности инженера, разбирая заявки на изобретения. Макс Планк, глава европейской теоретической физики, называет его «величайшим физиком нашего времени» и рекомендует его Бернскому универси-

тету на должность хотя бы приват-доцента. Эйнштейну отказывают. Чего же удивляться? Он представляет в Университет свою работу по теории относительности — там никто ничего в ней не понял (даже позднее, в 1915 г., как утверждал Поль Ланжевен, теорию относительности понимали только 12 человек на всем свете). Только в 1909 г. в Цюрихском университете появилось извещение о курсе лекций экстраординарного профессора теоретической физики Альберта Эйнштейна. Но экстраординарный — это не штатный профессор: почета в Цюрихе было больше, а жалования — меньше, чем в Берне. Создавать общую теорию относительности Эйнштейну приходилось в рабочей комнатке, служившей и его спальней, и детской: в ней «была протянута веревка, на которой сушились пеленки и другое детское белье» — так рассказывает очевидец-физик, бывавший тогда у Эйнштейна.

Наконец сдвинулось: в 1911 г. пришло неожиданное приглашение занять самостоятельную кафедру в Немецком университете в Праге — он стал штатным профессором. В 1912 г. ему предложена должность штатного профессора Политехнического института в Цюрихе, того самого, в котором он сидел когда-то за студенческой партией. Наконец, в 1913 г. по инициативе крупнейших физиков Планка и Нернста ему было предложено место члена Прусской Академии наук и директора Физического института в Берлине.

Оставалось два года до создания общей теории относительности. Кому еще требовалось сделать столько, чтобы удостоиться звания академика?

В 1919 г. к нему приходит уже не всеевропейская, а всемирная неслыханная слава. Наблюдения за солнечным затмением, организованные по мысли и инициативе Эддингтона, подтвердили гравитационную теорию Эйнштейна. Мир почему-то вдруг сразу сошел от этого с ума, хотя саму общую теорию относительности в то время понимали даже не 12, а всего 3–5 человек на всем свете. Вскоре в 1921 году ему присваивают, наконец, Нобелевскую премию, да и то не за теорию относительности (к которой, видимо, Нобелевский комитет продолжал относиться настороженно), а за теорию фотоэффекта, созданную еще в 1905 г.

Имя Эйнштейна у всех на устах. Его работы распространяются в Америке, в России, хотя их почти никто не понимает ни в Старом, ни в Новом свете.

Этим судьба наносила ему последний удар. Всесветная слава, возникшая мгновенно, стала самым тяжким бременем и самым страшным испытанием для Эйнштейна. Сам он не поддавался фи-миаму: ему нипочем были медные трубы и «дым кадильный» — он не обращал на них никакого внимания. Но он теперь принадлежал миру — и мир впился в него, как паук. Это стало его роком до конца дней.

Его рок. Уже в 1920 году в Европе возникла организация, назвавшая себя «антиэйнштейновской лигой». В нее входили не невежды: ее возглавили два нобелевских лауреата — физики Ленард и Штарк. Вспомним, что Эйнштейн писал про Э. Маха: он был один из очень немногих ученых, спасшихся от чумы шовинизма.

С приближением Коричневой Чумы Ленард состряпал учебник «Германская физика»: физика германская противопоставлялась всем «неарийским» теориям. Эйнштейн продолжал оставаться в Германии — родине истинной культуры, Германии Канта, Гёте, Шиллера. С 1932 г. оставаться в ней стало трудно: на улицах Берлина появились объявления, предлагавшие 50 тысяч марок за «голову Эйнштейна» (сам Эйнштейн скажет, что и не подозревал, что его голова стоит так дорого). Эйнштейна в это время в Германии не было. За время его отсутствия его вилла была оцеплена и разгромлена гестапо.

Что сделал Эйнштейн нацистам? Ничего. Но он был интернационалист и пацифист (сторонник всеобщего мира) — при его мировой славе этого было достаточно.

Прусская Академия наук включилась в общую кампанию травли Эйнштейна. Эйнштейн послал ей уведомление, что он выходит из нее, и с 1933 г. его больше не было в Германии.

Рок не оставил его и в Америке. К 1939 году Ирен Кюри и Отто Ган независимо обнаружили деление урана. Энрико Ферми приходит к идее цепной ядерной реакции за счет нейтронов.

Физики открыли возможность ядерной бомбы и ужаснулись ей. Сциллард и Теллер едут к Эйнштейну — нужно, чтобы он, самый великий и авторитетный физик, написал письмо к американскому президенту с предупреждением об опасности для мира. Эйнштейн подписывает письмо, не подозревая, что оно само окажется бомбой, которая взорвет мир. Над миром витал страх перед нацизмом: что если в Германии создадут столь разрушительную бомбу?

Рузвельт приказывает американским физикам опередить немцев — разработать бомбу. Через 6 лет она будет сброшена на Хиросиму и Нагасаки. Если бы Эйнштейн знал, что немцы не создадут атомную бомбу! Он не стал бы писать письмо президенту, но дело было сделано — и проклятие стало витать над его головой.

Он немедленно включился в борьбу против использования атомной бомбы в военных целях, но мировая политика не подчинялась ему. Она руководствовалась образом врага. Джин был выпущен из бутылки. В Америке, а потом и в СССР была изобретена водородная бомба. Тогда Эйнштейн выступил по нью-йоркскому телевидению: «Америку ведут к фашизму и войне».

Он оказался между молотом и наковальней — между большевизмом и маккартизмом. Его обвинили в пособничестве коммунистическому режиму. Началась новая травля.

Он не сдался. Сдал только его организм. 13 апреля 1955 г. Эйнштейна не стало.

Десять человек шли за гробом, всего 10, самых близких. Обезумевшее человечество отвернулось от него в Америке так же, как прежде, в Европе.

Он отказался от родины — стал космополитом, но не отказался от гуманизма и любви к людям. После смерти началась его новая, бессмертная жизнь. Все вновь стали неудержимо восхвалять его. Слава его не убывает со временем ни в Германии, ни в США, ни в России. Он всегда любил Россию и говорил, что выше Л. Толстого и Ф. Достоевского никогда не было писателей в истории. По его словам, ничто в мире, даже его теория относительности не доставляли ему такого высокого эстетического

наслаждения, как «Братья Карамазовы» Достоевского. Он всю жизнь мечтал приехать в Россию, но не удалось: «махист» и «идеалист» не дождался приглашения.

Такова судьба особых личностей, подобных Эйнштейну. Они, словно маяки, стоят на переломных эпохах истории человеческой мысли. Через них меняется парадигма человеческого сознания, взгляд людей на мир. Такими были Пифагор, Аристотель, Архимед, Галилей, Ньютон. Эйнштейн входит в эту великую когорту.

Литература



1. Захаров В. Д. *Метафизика в науках о природе*// Вопросы философии, 1999, №3.
2. Пуанкаре А. *О науке*. М.: Наука, 1983.
3. Целлер Э. *Очерк истории греческой философии*. С.-Пб.: изд-во Алетейя, 1996.
4. Льюиди М. *История физики*. М.: Мир, 1970.
5. Владимиров Ю. С., Мицкевич Н. В., Хорски Я. *Пространство, время, гравитация*. М.: Наука, 1984.
6. Девис П. *Пространство и время в современной картине Вселенной*. М.: Мир, 1979.
7. Бергман П. *Загадка гравитации*. М.: Наука, 1969.
8. Ланцош К. *Альберт Эйнштейн и строение Космоса*. М.: Наука, 1967.
9. Либшер Д.-Э. *Теория относительности с циркулем и линейкой*. М.: Мир, 1980.
10. Николсон И. *Тяготение, черные дыры и Вселенная*. М.: Мир, 1983.
11. Хокинг С. *От Большого Взрыва до черных дыр*. М.: Мир, 1990.
12. Фридман А. А. *Мир как пространство и время (2-е издание)*. М.: Наука, 1965.
13. Редже Т. *Этюды о Вселенной*. М.: Мир, 1985.
14. Вайнберг С. *Первые три минуты (современный взгляд на происхождение Вселенной)*. М.: Энергоиздат, 1981.
15. Новиков И. Д. *Как взорвалась Вселенная*. М.: Наука, 1988.
16. Новиков И. Д. *Эволюция Вселенной*. М.: Наука, 1990.
17. Силк Дж. *Большой Взрыв (рождение и эволюция Вселенной)*. М.: Мир, 1982.
18. Кауфман У. *Космические рубежи теории относительности*. М.: Мир, 1981.
19. Долгов А. Д., Зельдович Я. Б., Сажин М. В. *Космология ранней Вселенной*. М.: Изд-во МГУ, 1988.

20. Альберт Эйнштейн и теория гравитации (сборник статей). М.: Мир, 1979.
21. Общая теория относительности (сборник статей). М.: Мир, 1983.
22. Гравитация и относительность (сборник статей). М.: Мир, 1965.
23. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля (6-е издание). М.: Наука, 1973.
24. Фок В. А. Теория пространства, времени и тяготения (2-е издание). М.: ФМ, 1961.
25. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация, тт. 1–3. М.: Мир, 1977.
26. Вейль Г. Пространство, время, материя. М.: Янус, 1996.
27. Визгин В. П. Релятивистская теория тяготения (истoki и формирование). М.: Наука, 1981.
28. Захаров В. Д. Гравитационные волны в теории тяготения Эйнштейна. М.: Наука, 1972.
29. Владимиров Ю. С. Метафизика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2002.

Минимальные системные требования определяются соответствующими требованиями программ Adobe Reader версии не ниже 11-й либо Adobe Digital Editions версии не ниже 4.5 для платформ Windows, Mac OS, Android и iOS; экран 10"

Учебное электронное издание

Захаров Валерий Дмитриевич

ТЯГОТЕНИЕ: ОТ АРИСТОТЕЛЯ ДО ЭЙНШТЕЙНА

Художник *Н. А. Лозинская*

Оригинал-макет подготовлен *В. Н. Цлаф* в пакете L^AT_EX 2_ε

Подписано к использованию 17.02.20.

Формат 125×200 мм

Издательство «Лаборатория знаний»
125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272

e-mail: info@pilotLZ.ru, <http://www.pilotLZ.ru>

