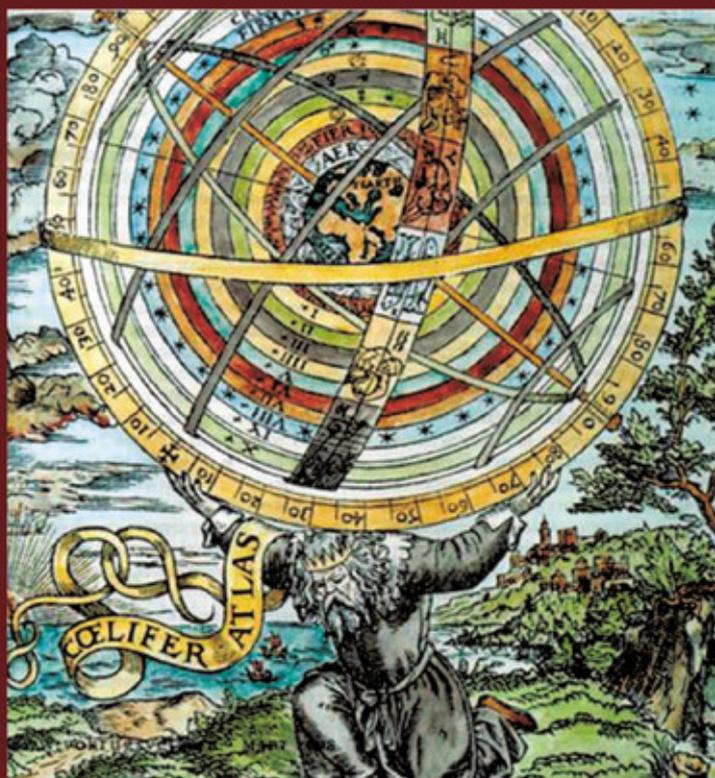


А. Н. Петров

ГРАВИТАЦИЯ

От хрустальных сфер до кротовых нор



Династия

Александр Николаевич Петров
Гравитация. От хрустальных
сфер до кротовых нор

Текст предоставлен правообладателем
http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=6053702
Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор.: Век 2; Фрязино; 2013
ISBN 978-5-85099-190-6

Аннотация

В книге рассказывается о развитии представлений о тяготении за всю историю науки. В описании современного состояния гравитационной теории основное внимание уделено общей теории относительности, но рассказано и о других теориях. Обсуждаются формирование и строение черных дыр, генерация и перспективы детектирования гравитационных волн, эволюция Вселенной, начиная с Большого взрыва и заканчивая современной эпохой и возможными сценариями будущего. Представлены варианты развития гравитационной науки, как теоретические, так и наблюдательные.

Содержание

Предисловие	5
Глава 1	7
Древние о Вселенной до Аристотеля	7
Аристотель	9
Птолемей	13
Глава 2	16
Гелиоцентрическая система Коперника	16
Астроном-наблюдатель Тихо Браге	18
Галилей	20
Законы эллиптического движения Кеплера	25
Попытки понять природу гравитации	28
Глава 3	31
Исаак Ньютон	31
Механика Ньютона	35
Теория гравитации Ньютона	36
Корпускулярная теория гравитации	40
Глава 4	42
Протяженность и длительность. Методы измерений	43
Абсолютные пространство и время	46
Инерциальная система отсчета. Принцип относительности Галилея	47
Электродинамика. Скорость света	49
Эфир	52
Глава 5	54
Принципы построения	54
Эффекты СТО	56
Пространство Минковского	58
Конец ознакомительного фрагмента.	60

Александр Николаевич Петров

Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор



Фонд некоммерческих программ «Династия» основан в 2001 году Дмитрием Борисовичем Зиминым, почетным президентом компании «Вымпелком».

Приоритетные направления деятельности Фонда – развитие фундаментальной науки и образования в России, популяризация и просвещение.

«Библиотека Фонда «Династия» – проект Фонда по изданию современных научно-популярных книг, отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках, выпущена в рамках этого проекта.

Более подробную информацию о Фонде Дмитрия Зимины «Династия» вы найдете по адресу www.dynastyfdn.ru

Предисловие

*Все должно быть изложено так просто, как только возможно,
но не проще.*
Альберт Эйнштейн

Книги по теории тяготения, а также по отдельным вопросам и проблемам, связанным с ней, не редкость в книжных магазинах. Большая их часть – это монографии, учебники, справочники, то есть профессиональная литература. Другая часть, тоже не малая – популярные издания. Однако зачастую в популярном изложении делается упор на эффективность явлений. При этом пояснения либо отсутствуют вовсе, либо даются в сильно упрощенной форме: с помощью сравнений или ярких иллюстраций. В настоящей книге сделана попытка не только рассказать о необычных явлениях, но по возможности объяснить – как и почему они возникают.

Развитие представлений о тяготении дается в хронологическом порядке в соответствии со всей историей науки. Ее можно разделить на три части:

1) Древний период, когда, наблюдая и анализируя движения небесных тел, ученые и не предполагали, что изучают проявления тяготения.

2) Период осмысления, открытия закона всемирного тяготения и его триумфа в изучении движения небесных светил.

3) Последний период начинается с осознания того, что тяготение имеет геометрическую природу и построения общей теории относительности, на которой основана современная небесная механика, астрофизика и космология.

Проявления тяготения более чем очевидны, они даны человеку в повседневных ощущениях, достаточно поднять сумку с продуктами. Поэтому человечество размышляет о природе тяготения, действительно, давно и, конечно, не только на бытовом уровне. Каждый из периодов интересен тем, какие загадки волновали ученых, какими теоретическими и техническими методами решались проблемы, каков был дух исследований, насколько драматичными и возвышенными они были.

Значительно больше внимания уделено третьему периоду, связанному с общей теорией относительности. Физическая теория – это лишь идеальная модель для описания явлений, инструмент, позволяющий обнаружить их причины. Любая модель связана с математическим аппаратом. Но реальная природа сложнее математических рамок, а модель всегда лишь приближение к реальности. Обычно теория считается признанной, если она описывает все явления, которые находятся в поле ее компетенции, а также, если на основании ее законов делаются новые предсказания. Именно такой гравитационной теорией в настоящее время является общая теория относительности. В книге рассказано об истории ее создания, основных принципах построения, продолжающемся многолетнем тестировании, наблюдаемых эффектах и предсказанных явлениях.

Гравитация играет особую роль в организации материи. Если остальные физические взаимодействия связывают разные виды элементарных частиц, обладающие тем или иным видом зарядов, то *гравитационное* – универсально, его следует учитывать при любом движении материи и даже при одном только ее наличии. Гравитация – самый слабый вид взаимодействия, ее проявления мизерны на масштабах элементарных частиц. Но она в полной мере проявляет себя на космических масштабах, поэтому играет главную роль в процессах мироздания в целом. На этом в книге акцентируется особое внимание. Анализируется формирование и строение черных дыр; обсуждается генерация и перспективы детектирования гравитационных волн; рассматривается эволюция Вселенной, начиная с Большого взрыва

и заканчивая современной эпохой, а также обсуждаются возможные сценарии будущего. Обсуждаются также теоретические и наблюдательные перспективы развития гравитационной теории.

Биографические данные или исторические факты никак не претендуют на полноту описания. Они приведены для того, чтобы подчеркнуть особенности личности ученого и передать атмосферу научного поиска.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся развитием современной науки. Большая ее часть не требует никакой специальной подготовки. Некоторые места подразумевают знание физики в объеме средней школы. Те, кому некоторые места покажутся трудными для восприятия, могут пропустить их без ущерба для дальнейшего чтения. Кроме того, автор надеется, что книга будет интересной и полезной студентам начальных курсов и, возможно, повлияет на их выбор будущей специализации.

Автор признателен А. Дехтяренко, Р. Ломпею, С. Попову, Н. Сосову и М. Хегай, которые прочли рукопись и сделали ряд ценных замечаний. Особая благодарность В. Сурдину за многочисленные полезные рекомендации.

Глава 1

Представления о тяготении в древнем мире

Древние о Вселенной до Аристотеля

Земля, о достойнейший и благороднейший из преподавателей и наставников, имела и имеет форму плоского диска и омывается со всех сторон величественной рекой, называемой «Океан». Земля покоится на шести слонах, а те стоят на огромной черепахе. Вот как устроен мир, о учитель!

Лазарь Лагин «Старик Хоттабыч»

Тяготение в русском языке происходит от слова *тяжесть*, обозначающее ощущение, которое люди испытывают в повседневной жизни постоянно. Тяжести нужно поднимать, переносить, увертываться от них, чтобы не ушибли или не раздавили. Это бытовое восприятие рождало метафоры: «ложась тяжестью на душу» или «камнем на сердце», заставляло изобретать технологии его преодоления и/или использования: коромысла, рычаги, катапульты и т. п. У самых любопытных возникали вопросы: почему вещи падают на землю, а не взмывают в небеса. В небесах был совсем другой мир, высокий и, как казалось нашим древним предкам, идеальный, далекий от тягот бытия, мир Солнца, Луны и небесных светил. Светила катились по небосводу, подчиняясь неведомым законам. Не было известно и место в системе мироздания самой Земли, на которой располагался обитаемый мир.

Однако, чтобы начать рассказ о том, как понятие тяготения появилось в научном сознании человечества, связав оба мира, «низкий» и «высокий», все-таки было бы неразумным обращаться к тем временам, когда люди считали Землю плоской, покоящейся на китах, слонах и т. д. Начнем с Древней Греции, где около 3-х тысячелетий назад сложилось представление, что Вселенная сферична, а в ее центре находится Земля. Несколько позднее, в связи с тем, что в древнегреческой культуре понятия симметрии и идеального приобрели статус основополагающих, стали считать, что и сама Земля может (должна) иметь форму шара. Вселенная должна быть совершенной во всем и полностью.

Каковой представлялась Вселенная? Что может увидеть на небе наблюдатель без оптических инструментов? Множество неподвижных звезд на небосклоне, который обращается с периодичностью раз в сутки. Луна и Солнце также имеют суточное движение, но отмечается и их движение относительно неподвижных звезд. Несколько звезд перемещаются относительно множества неподвижных, их выделили в отдельную группу и назвали планетами (от греч. *planetes* – блуждающий).

Рассматривалось несколько моделей устройства мира. Остановимся на системе Евдокса (около 406–355 г. до н. э.). В его модели предполагалось, что шарообразная Земля покоится (не вращается) в центре сферической Вселенной (*геоцентрическая* модель). Для объяснения поведения небесных тел была введена система концентрических сфер с центром в Земле. На самой дальней сфере, обращаемой вокруг Земли один раз в сутки, закреплены звезды. Для объяснения движения каждого другого тела по небосклону требовалось несколько совмещенных сфер, чтобы описать иногда очень причудливые видимые движения. Именно система мироздания Евдокса (рис. 1.1) была принята и развита Аристотелем (384–322 г. до н. э.).

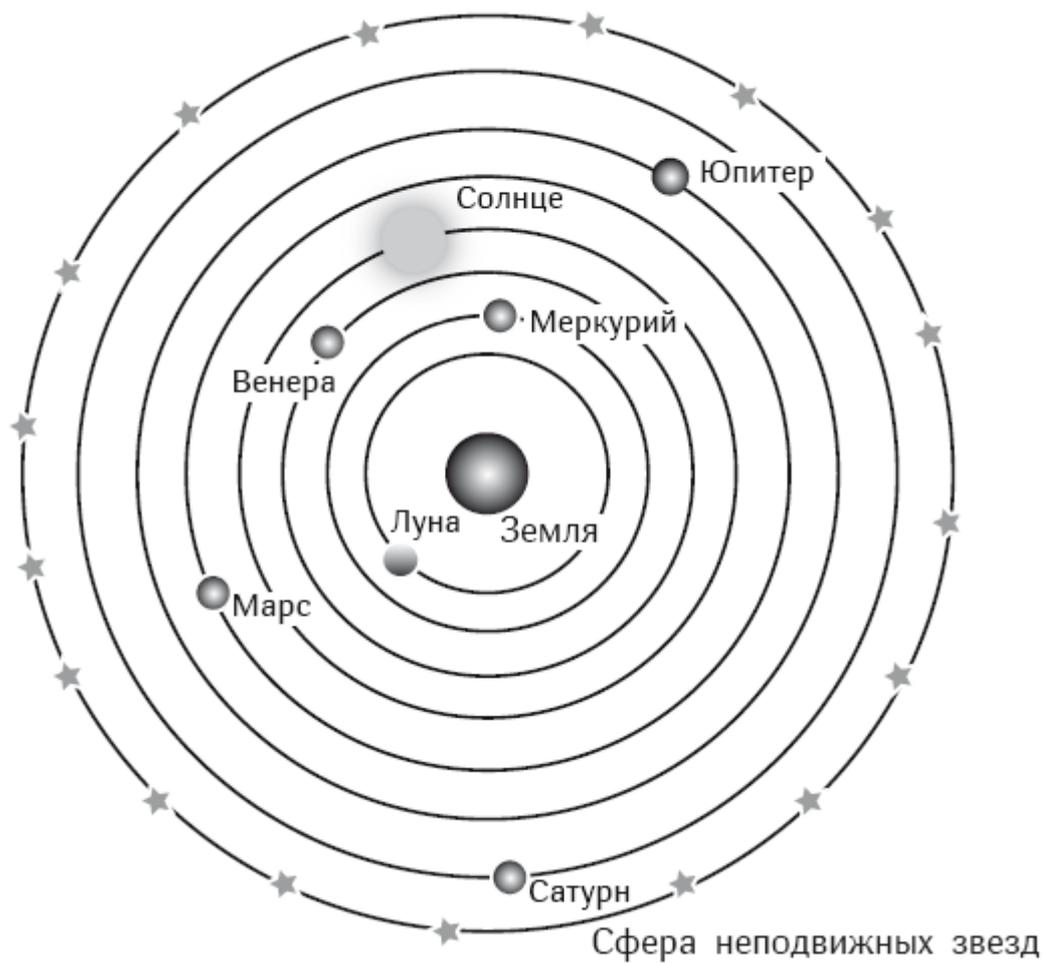


Рис. 1.1. Геоцентрическая схема мира Евдокса

Аристотель

Аристотель Стагирский (по месту рождения), рис. 1.2, один из величайших, если не самый значимый философ античной Греции. Его отец Никомах и мать Фестида принадлежали благородному сословию. Никомах был придворным врачом македонского царя Аминты III. В те времена это означало, что сын, скорее всего, тоже стал бы врачом. Кроме того, врач тогда был фактически естествоиспытателем. Поэтому с детских лет Аристотель, воспитываемый отцом, почувствовал вкус к исследованиям. Но он рано потерял родителей и в 17 лет оказался в Афинах, где стал учеником знаменитой школы Платона. Довольно быстро и успешно окончив школу, он в течение 20 лет преподавал в ней, хотя его суждения и выводы часто не совпадали с мнением учителя.

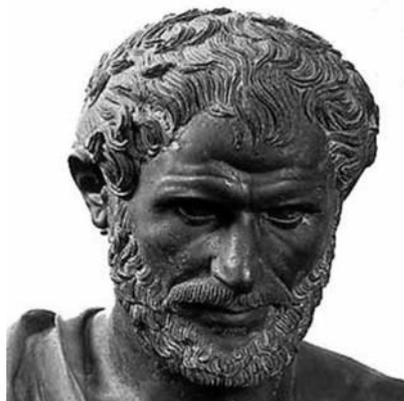


Рис. 1.2. Аристотель

После смерти Платона Аристотель был приглашен македонским царем Филиппом для воспитания сына – 13-летнего Александра, будущего великого полководца.

Александр на всю жизнь сохранил любовь к своему учителю. После двора Филиппа Аристотель вернулся в Афины и создал там свою школу «Ликей», поскольку была она при храме Аполлона Ликейского (вспомните, что Пушкин учился в лицее, многие дети в наше время учатся в лицеях). Школа называлась перипатетической (от греч. *peri-patos* – прогулка), занятия проходили во время прогулок. Иногда утверждается, что он, как и все благородные греки, вел праздный образ жизни бездельника. Но на основе его записей еще при жизни было составлено 150 текстов (томов). До наших дней дошло 15 книг. Возникает вопрос: как нужно бездельничать, чтобы быть настолько продуктивным?

После смерти Александра Аристотель был обвинен в безбожии, покинул Афины и переселился в Халкис на Эвбее, где через несколько месяцев в возрасте 62 лет скончался от болезни желудка (есть предположение, что он принял яд). Именно Аристотелю принадлежит знаменитая фраза о том, что корень учения горек, а плоды его сладки. Когда ученого спросили, какую пользу он извлек из философии, ответ был таков: «Я стал добровольно делать то, что другие делают лишь из страха перед законом».

Аристотель создал первую универсальную философскую (научную) систему, которая включила в себя все достижения греческой науки во всех (и очень разных) областях предшествовавшего периода. Философия Аристотеля делится на теоретическую, практическую и творческую. Это была первая в истории попытка обобщить представления того времени о природе, обществе, мире в целом в единую систему. Часть этой системы, представленная в книге о природе (естествознании), называлась «Физикой» (от греч. *physis* – природа), что дало в дальнейшем название науке. Его научная парадигма просуществовала практически в

неизменном виде до XVI века нашей эры, т. е. почти 1800 лет. Представления о Вселенной были частью этой системы.

Ограничимся обсуждением тех воззрений Аристотеля, которые как-то связаны с его представлениями о тяготении. Итак, развивая модель Евдокса, Аристотель усложнил систему подвижных сфер, увеличив их количество, для удовлетворительного описания всех наблюдаемых тогда перемещений небесных тел. Причем Аристотель считал сферы не условными объектами, а вполне осязаемыми, созданными из некоего прозрачного вещества – хрусталя. В системе Аристотеля Земля также шарообразна и жестко закреплена в центре Вселенной. Но Аристотель уже не только полагался на идеи о симметриях, а доказывал, что поверхность Земли сферична. Он ссылаясь на искривленность ее тени на поверхности Луны во время лунных затмений, на то, что при движении на север и на юг наблюдатель видит на небосклоне разные звезды. Сферичностью Земли объяснялось и исчезновение кораблей за линией горизонта. В своем научном методе исследования Аристотель, отвергая эксперимент и математические доказательства, полностью основывается на логическом анализе, следуя в этом смысле методу Платона, своего учителя.

Важную, если не решающую, роль в механике Аристотеля играли понятия *естественного* местоположения и *естественного* движения. Следуя взглядам Эмпедокла (около 490–430 г. до н. э.), Аристотель считал, что все тела состоят из четырех основных элементов: воздуха, земли, огня и воды. Земля считалась абсолютно тяжелой, огонь – абсолютно легким, а вода и воздух занимали промежуточное положение. Естественным местоположением самого тяжелого элемента считался центр Земли – геометрический центр мира. Следовательно, естественным движением всех тел, состоящих из этого элемента, должно было быть движение по направлению к центру Земли (падение вниз). Это соответствовало и повседневным наблюдениям. Поэтому, хотя *тяготение* и не выделялось как специальное понятие, оно, конечно, в системе Аристотеля присутствовало.

Кроме понятия естественного движения у Аристотеля было понятие и *неестественного*, т. е. вынужденного или насильственного, движения. К таковым можно отнести движение стрелы, брошенного камня, повозки, которую тянут лошади, и т. д. Так, считалось, что движение свободного снаряда начинается под действием силы и продолжается до тех пор, пока это действие сохраняется. Предлагалась модель передачи этого воздействия через слои воздуха во время движения объекта. Как только действие силы прекращается, тело начинает двигаться к своему естественному местоположению – центру Земли. Эти утверждения находились в рамках всей философской системы мироздания Аристотеля. Их смысл в том, что любое подвижное бытие нуждается в некой внешней действующей причине, которой объясняется его происхождение и дальнейшее существование. Это касается и всей Вселенной, которая пребывает в вечном движении. Но тогда, следуя логике, необходимо признать существование первого неподвижного двигателя (перводвигателя), не подверженного изменению.

Естественные движения в окрестности Земли, как предполагалось, были обусловлены «внутренними» свойствами тел, которыми могут быть как тяжесть («гравитация», от лат. *gravitas* – тяжесть), так и легкость («левитация»). Каждое из этих свойств вызывает перемещения тел вниз или вверх.

В рамках системы Аристотеля тела одинаковых размеров, формы и веса должны падать с одинаковой скоростью, поскольку на них действуют те же самые силы гравитации (сопротивление также учитывается – оно одинаково для такого мысленного опыта). С другой стороны, если два тела, имеют одинаковые форму и размеры, но *разный* вес, то тяжелое тело должно падать быстрее, поскольку при равном сопротивлении сила тяготения, действующая на предмет большего веса, должна быть больше. Ускорение падающих тел объяснялось

увеличением тяжести тела по мере приближения к своему естественному местоположению. Значительно позднее Галилей установил ошибочность этих утверждений.

Другим важным, но тоже ошибочным выводом механики Аристотеля, является то, что все тела вблизи Земли должны двигаться по прямым линиям. Это относится как к естественному, так и к вынужденному движениям. Чтобы поставить под сомнение это положение нет необходимости проводить специальные исследования. Повседневный опыт, кажется, с очевидностью опровергает его. По Аристотелю стрела, пущенная под некоторым углом к горизонту, должна двигаться по прямой до тех пор, пока не истощится сила, передаваемая ей тетивой, затем она должна падать вертикально вниз. Траектория должна быть ломаной, состоящей из двух прямых линий (рис. 1.3). Но этого никто никогда не наблюдал. Такой эксперимент показал бы несостоятельность теории движения Аристотеля. Однако, как его научный авторитет, так и стройная система его научных взглядов оказались более убедительными.

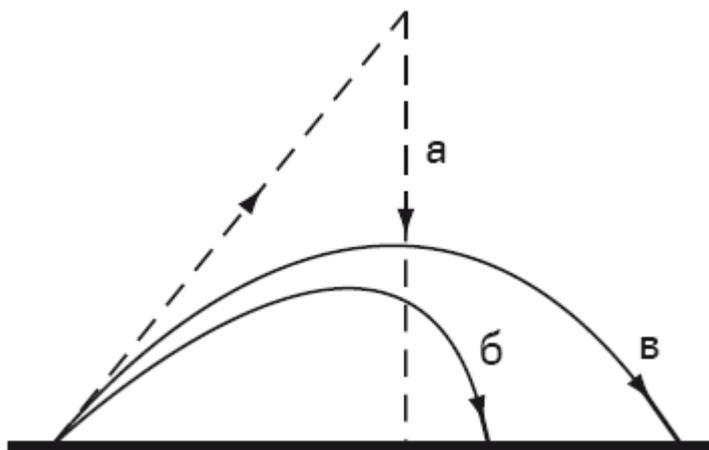


Рис. 1.3. Траектории стрелы в теории Аристотеля (а) и реальные: при сопротивлении воздуха (б) и без сопротивления воздуха (в)

Подведем некоторый итог. С одной стороны, с современной позитивистской точки зрения представления Аристотеля о законах тяготения ошибочны, они не соответствуют эмпирическим данным. С другой стороны, не будем очень строги. Это было самое начало попыток понять, как устроен мир, а вместе с этим – что есть тяготение. Были введены некоторые базисные понятия, оперируя которыми уже можно на научном уровне того времени исследовать явление. Центр Вселенной (он же центр Земли) был определен как центр притяжения. Падающие на Землю тела были наделены внутренним свойством «тяжесть». Пройдет время, и осмысление, переосмысление и развитие этих понятий приведет к закону всемирного тяготения Ньютона и теории относительности Эйнштейна.

Что касается небесных тел, то в механике Аристотеля считалось, что все они отделены от Земли и не имеют с ней ничего общего. На Земле четыре основных элемента претерпевают непрерывные взаимопревращения, тела могут состоять из различных сочетаний основных элементов. Различные предметы возникают, какое-то время существуют, а затем видоизменяются, распадаются, исчезают. На небе же ничто не меняется. Отсюда делается вывод, что существует пятый, неизменный и идеальный элемент – эфир, из которого и состоят небесные тела. Вакуум, пространство без какого-либо вещества, был недопустим в системе Аристотеля.

Расстояния до небесных тел не были известны во времена Аристотеля. Сам он считал, что нет возможности их вычислить. Тем не менее, сфера за сферой были выстроены вполне однозначным образом (рис. 1.1). Прямым способом вычисления расстояния могло бы слу-

жить использование параллакса объекта (рис. 1.4). Горизонтальным параллаксом называют угол между двумя направлениями от светила на центр Земли и по касательной к ней. С Земли этот угол определяется как разность угловых координат светила на небе для двух наблюдателей, для одного из которых светило в зените, а для другого – на горизонте. Поскольку в то время радиус Земли был уже известен, можно было вычислить расстояние до объекта. Впервые применил метод параллакса в астрономии древнегреческий ученый Гиппарх (около 180–125 г. до н. э.) для определения расстояния до Луны, которое стало известным чрезвычайно точно. Причем для вычисления параллакса Луны он использовал разность ее угловых координат на восходе и закате. Измерить расстояния до других планет стало возможным только после начала использования в астрономии телескопов. Хотя опосредованным методом Гиппарх сделал оценки расстояния до Солнца, а также приблизительно определил его размеры.

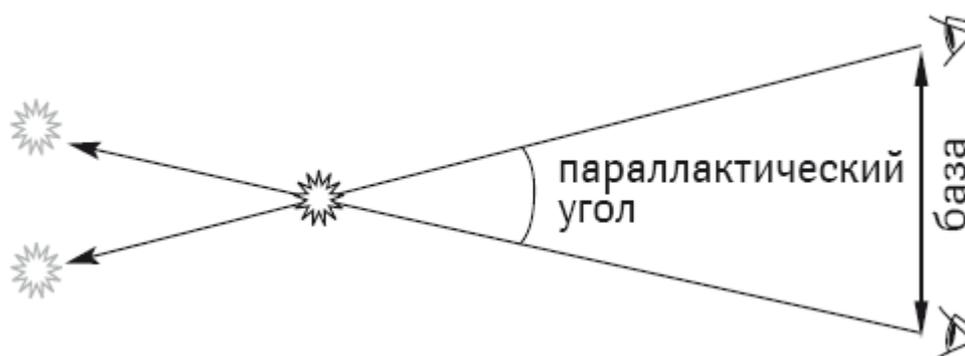


Рис. 1.4. Схема параллакса

Итак, в системе Аристотеля лунная сфера является ближайшей к Земле (рис. 1.1) и представляет собой границу между не подверженными разрушению небесами и изменчивым миром Земли. Отсюда возникло выражение «подлунный мир». За пределами лунной сферы, в «надлунном мире», природа представлялась абсолютно совершенной, а движение небесных сфер, определяющих движение небесных тел, считалось естественным и идеальным. Таким образом, в небесной механике Аристотеля (в надлунном мире) не было места представлениям о тяготении.

Мы подробно изложили представления о тяготении Аристотеля потому, что именно его система мироздания господствовала над умами многие столетия, хотя эти представления и ошибочны. Именно его взгляды в большой степени определяли развитие науки. Вместе с этим, нельзя не отметить, что существовали более реалистичные представления о тяготении. Так, Платон раньше Аристотеля утверждал, что подобное стремится к подобному – это ли не прообраз закона всемирного тяготения. Такую же мысль высказывал позднее римский поэт и философ Тит Лукреций Кар (около 99–55 г. до н. э.). Древнегреческий философ и астроном Плутарх (около 45–127 г.), фактически современник Птолемея, признанного последователя Аристотеля, несколькими столетиями позднее говорит: «Луна упала бы на землю как камень, чуть только уничтожилась бы сила ее полета». Сравните с рассуждениями Ньютона, приведенными ниже, о движениях яблока и Луны.

Птолемей

Вернемся к истории изучения движения небесных тел, хотя бы и в древности считали, что это не имеет отношения к гравитации. И, действительно, вряд ли предлагаемые модели того времени полезны для открытия реальных законов тяготения. Тем не менее, в итоге именно эти исследования привели к их построению.

Итак, геоцентрическая система мира Аристотеля стала основной моделью Вселенной на долгое время. Немногочисленные попытки выйти за ее рамки или даже заменить *гелиоцентрической* моделью (с центром в Солнце) не воспринимались всерьез. И наоборот, модель Аристотеля, казалось, безоговорочно подтверждалась. Например, Птолемей (ок. 100–165), рис. 1.5, один из самых авторитетных последователей Аристотеля, обосновывал ее следующим образом. Поскольку центр Вселенной – это место, куда стремятся все имеющие вес тела, то там должна находиться и сама Земля, как самое тяжелое тело в мире. Если предположить, что Земля не в центре Вселенной, то она должна туда стремиться (падать). Но тогда, следуя логике механики Аристотеля, Земля, будучи самым тяжелым телом, должна обгонять в своем движении все более легкие предметы. Поэтому, имеющиеся на ее поверхности деревья, животные, люди и все остальное оторвались бы от нее!

Птолемей был одним из древнегреческих ученых, кому пришлось творить на закате эллинской культуры. Он работал в Александрийской библиотеке, которая в то время уже прославилась и великими учеными, и великими достижениями. В распоряжении Птолемея были самые точные, разнообразные и многочисленные астрономические наблюдения. Он и сам их многократно производил. Но, самое главное, он их анализировал, делал достоверные астрономические предсказания.



Рис. 1.5. Птолемей

Для достижения соответствия расчетов и наблюдений Птолемей, следуя воззрениям Гиппарха, фактически отказался от концентрических сфер. Основа его теории движения планет – это представление о равномерном движении по окружности. Среди прочего, было важно описать обратное движение планет, ведь они иногда описывали на небе петли. Простую схему движения по окружностям пришлось усложнить. Было использовано понятия *эпицикла*. Предполагалось, что планета движется по малой окружности (эпициклу) с постоянной скоростью, а центр эпицикла равномерно движется по большой окружности – *деференту*, в центре которого находится Земля (рис. 1.6). После признания гелиоцентрической системы стало ясно, что обратное движение – это кажущийся эффект, который возникает, когда Земля «обгоняет» такую планету. Автомобилистам особо знаком этот эффект, когда

вдруг с паникой видишь, что машину не держат тормоза, и она начинает катиться назад. А на самом деле соседний автомобиль потихоньку тронулся вперед.

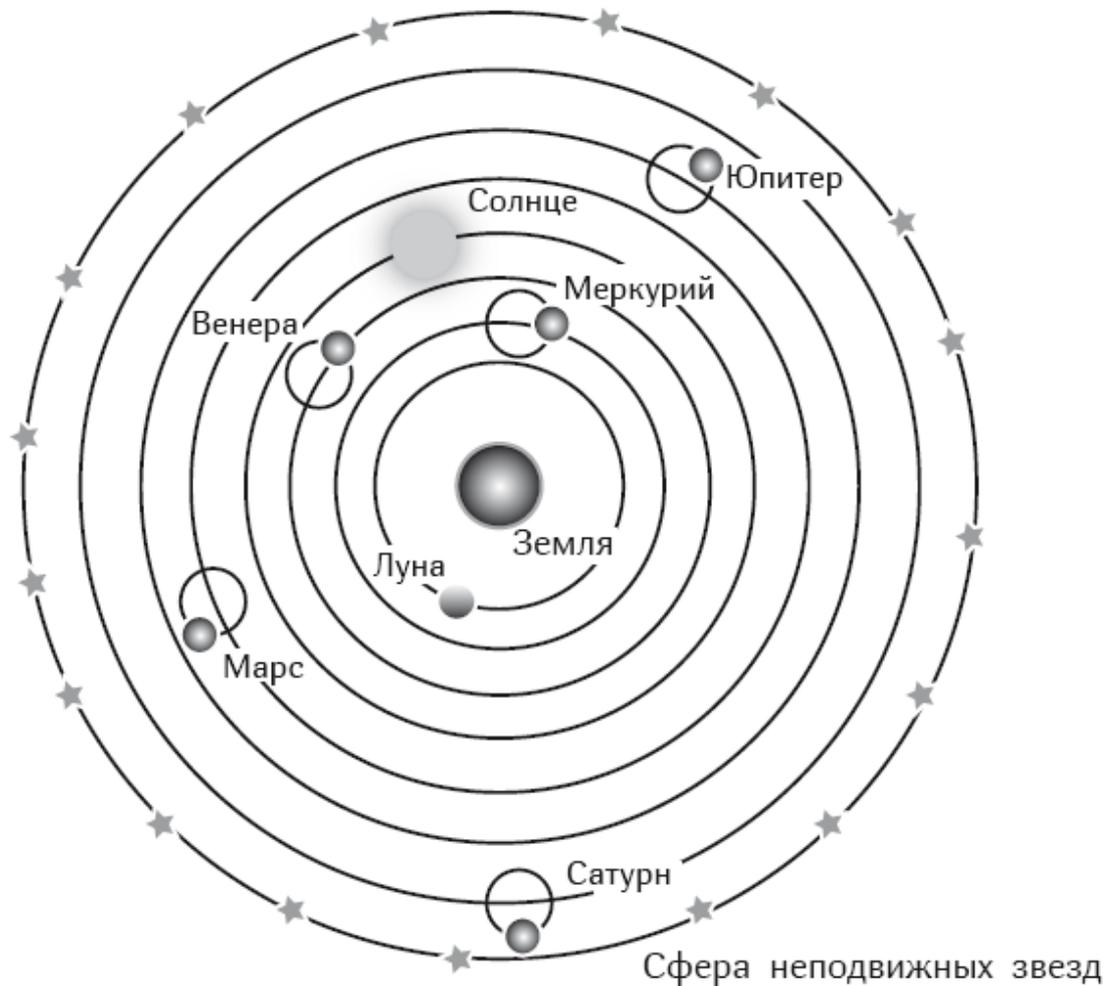


Рис. 1.6. Эпициклы Птолемея

Но все эти усовершенствования все равно не давали необходимого соответствия с наблюдениями. В своем основном труде «Альмагест» Птолемей упоминает Аполлония Пергского (около 262–190 г. до н. э.), александрийского математика, ученика Евклида. Он в свое время ввел понятие *эксцента* для объяснения движения планет. Птолемей включил их в свою систему (рис. 1.7). Теперь представлялось, что центр эпицикла (А) движется по окружности (С) с центром (О), смещенным по отношению к Земле (В). Тогда равномерное движение небесного тела по такой окружности земному наблюдателю представлялось неравномерным.

Затем Птолемей добавил в систему еще один новый элемент – *эквант*. Благодаря этому планеты могли совершать уже неравномерное движение по кругу, но при условии существования некой точки (не обязательно на Земле), откуда это движение казалось бы равномерным! Таким образом достигалось удивительно точное соответствие с наблюдениями. Однако такая система в целом стала настолько громоздкой, что ее концепция фактически противоречила идеализированному представлению о равномерном движении по окружности, как исходному посылу, самой философии о геометрическом совершенстве Вселенной.

Поэтому многие мыслители, философы и астрономы время от времени высказывали сомнения в справедливости системы Птолемея, часто при этом предлагая свои варианты. Однако, как сказали бы сейчас, эти модели были скорее умозрительными, чем науч-

ными, хотя некоторые из них были ближе к реальности, чем птолемеевская. Преимущество системы Птолемея было в том, что она давала очень точное соответствие с наблюдениями. А это один из основных критериев востребованности теории.

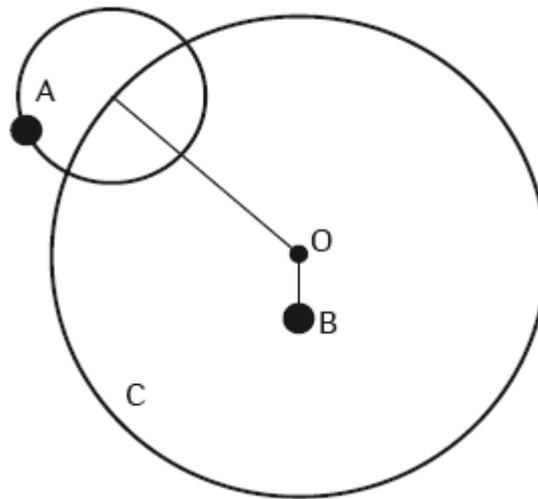


Рис. 1.7. Эксцентр Птолемея

Наиболее известными работами Птолемея являются уже упомянутый «Альмагест» и «География», ставшие высшим достижением древней науки в области астрономии и географии. Работы Птолемея считались настолько совершенными, что господствовали в науке на протяжении 1400 лет наравне с догматами Аристотеля. За это время в «Географию» не было внесено практически ни одной серьезной поправки, а все достижения астрономов сводились, по сути, лишь к незначительным усовершенствованиям «Альмагеста».

Хотя Птолемей был одним из самых почитаемых авторитетов, историки науки не считают его гениальным математиком, астрономом или географом. Его основной дар и предназначение заключалось в способности собрать воедино результаты исследований своих предшественников, систематизировать и использовать их для уточнения собственных наблюдений и представить все вместе как логическую и завершенную схему, изложенную в ясной и отточенной форме. Созданные им учебники позволили поддерживать очень высокий уровень знаний по соответствующим предметам. Современная эпоха научных исследований в этих областях началась с критики утверждений, представленных в «Альмагесте» и «Географии» и отстаивании новых идей.

Глава 2

Новые представления о Вселенной и начало новой физики

*Фундаментальные идеи... не висят на концах логических цепочек.
Аркадий Стругацкий, Борис Стругацкий «Беспокойство»*

Гелиоцентрическая система Коперника

Время шло, и замечательный польский астроном (а также, врач, политик, богослов и даже руководитель обороны Вармии) Николай Коперник (1473–1543), рис. 2.1, предложил свою систему мира, пришедшую на смену системе Птолемея. Как результат, здание механики Аристотеля получило удар, от которого уже не оправилось.



Рис. 2.1. Николай Коперник

На самом деле, на всем протяжении развития физики, начиная со времен Аристотеля, высказывались идеи о возможном устройстве мира, в центре которого находится Солнце. Впервые об этом прямо заявил древнегреческий астроном, математик и философ Аристарх Самосский (ок. 310–230 г. до н. э.), но в те времена доказать это было невозможно. Коперник еще студентом познакомился с подобными доктринами. В результате он пришел к убеждению, что наблюдаемые движения небесных тел лучше всего объясняются двумя движениями Земли: ее вращением вокруг своей оси и обращением вместе с другими планетами вокруг Солнца. В этой системе планеты располагались в следующем порядке по мере удаления от Солнца: Меркурий, Венера, Земля (с Луной), Марс, Юпитер, Сатурн. Далее, как предполагалось, расположена сфера неподвижных звезд (рис. 2.2).

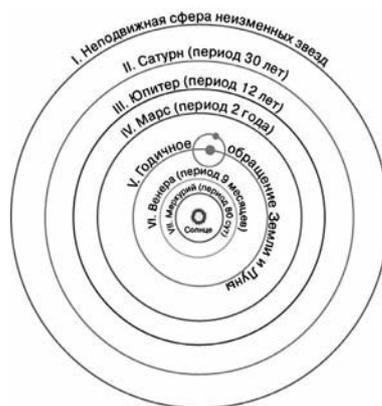


Рис. 2.2. Гелиоцентрическая система мира Коперника

Каковы же были предпосылки для построения гелиоцентрической системы? Птолемеевская система, кроме громоздкости, страдала явной несистематичностью, отсутствием целостности. Каждая планета рассматривалась сама по себе, имела отдельные, фактически собственные, законы движения.

Установка на поиск внутреннего единства была той основой, вокруг которой концентрировалось стремление создать гелиоцентрическую систему. Ее построение, в определенной мере, было связано и с необходимостью реформы юлианского календаря, в котором моменты наступления равноденствий и фаз Луны, установленные еще в рамках птолемеевского «Альма-геста», вернее звездного каталога, включенного в это сочинение, потеряли связь с современными календарными датами.

Папа Лев X предложил Копернику принять участие в подготовке реформы календаря, но тот отказался, поскольку считал, что продолжительность года, лежащая в основе календаря, определяется недостаточно точно из-за неудовлетворительной теории движения Солнца и Луны. Однако это предложение стало для Коперника одним из мотивов совершенствования геоцентрической теории. Была и общественная потребность, стимулировавшая поиски новой теории движения планет, связанная с мореходной практикой и нуждами астрологии, как это ни парадоксально сейчас звучит.

Гелиоцентрическая система Коперника концептуально была существенно проще системы Птолемея. Признание вращения Земли вокруг оси устраняло необходимость говорить о суточном движении звездной сферы и всех небесных тел; обращение же Земли вокруг Солнца объясняло и годовое перемещение Солнца по небесной сфере, и петли обратного движения планет. Коперник, однако, твердо придерживался представлений об идеальном движении светил, которые, следуя многовековым догмам, должны двигаться по окружности с постоянной скоростью. Поэтому для более точного объяснения наблюдаемых перемещений планет Копернику опять же требовались эксцентры и эпициклы. В окончательном виде его система насчитывала 34 круговых движения – меньше, чем система Птолемея, но все равно много. Более того, Коперник еще строже, чем Птолемей, следовал догме идеального движения по окружности, поскольку не допускал неравномерного движения по экванту.

Концепция гелиоцентрической системы была опубликована в книге «О вращении небесных сфер» в 1543 году, незадолго до смерти ученого. Протестантов эта работа привела в ярость сразу. Со стороны же католической церкви она поначалу не подверглась осуждению, возможно потому, что Коперник посвятил ее римскому папе Павлу III. Книга вызвала живой интерес и многочисленные дискуссии. В те времена было трудно представить, каким преследованиям со стороны Ватикана будут подвергнуты в дальнейшем последователи учения Коперника, в частности, Галилей.

Астроном-наблюдатель Тихо Браге

Система мира Коперника имела среди ученых много сторонников, но было также и много противников. Опуская многое, необходимо упомянуть датского астронома Тихо Браге (1546–1601), рис. 2.3, самого замечательного наблюдателя своего времени. Он не поддерживал идею о движении Земли, а вместо этого выдвинул собственную модель, согласно которой Земля жестко закреплена в центре мира. Планеты в системе Тихо Браге обращались по круговым орбитам вокруг Солнца, которое, в свою очередь, совершало движение вокруг Земли. Несмотря на то, что теория Тихо Браге значительно упрощала систему Птолемея, она не получила поддержки у астрономов и не оказала особого влияния на их исследования.

Но главным вкладом Тихо Браге в науку были результаты астрономических наблюдений, проводившихся им в течение всей жизни, они позволили сделать следующий шаг в развитии представлений о Вселенной.



Рис. 2.3. Тихо Браге

Его страсть к наблюдениям проснулась очень рано. В возрасте примерно лет 15-ти он обнаружил, что данные известных тогда эфемерид (таблиц планетарных координат) существенно расходятся, как между собой, так и с данными его юношеских наблюдений. Для него это было нестерпимо! В это же время родители отправили его изучать «свободные искусства» в Лейпциг. Вот как он сам описывает свои занятия временем чуть позже:

«Позднее, в 1564 году (17–18 лет!), я тайно приобрел деревянный астрономический «посох Якова»¹, изготовленный по указаниям Геммы Фризия. Бартоломей Скультет, живший в то время в Лейпциге, с которым я поддерживал дружеские отношения на почве общих интересов, снабдил этот инструмент точными делениями с трансверсальными точками. Скультет почерпнул принцип трансверсальных точек у своего учителя Гомелия. Заполучив посох Якова, я не упускал ни одного удобного случая, когда ночь выдавалась звездной, и неустанно производил наблюдения. Нередко я проводил в бдении всю ночь напролет. Мой гувернер, ничего не подозревая, мирно спал, поскольку я производил наблюдения при свете звезд и заносил полученные данные в специально заведенную книжечку, которая сохранилась у

¹ «Посох Якова» – один из первых инструментов для астрономических наблюдений, служивший для измерения углов. Появился он в IV веке до н. э. и был известен на Ближнем Востоке, в Китае, Индии и Европе. Этот инструмент представлял собой стержень с делениями, по которому перемещалась поперечная планка с отверстиями или щелями – диоптрами (см. рис. 1.5). Стержень приставляли к глазу и направляли на линию горизонта. Затем передвигали планку до тех пор, пока та или иная звезда не совмещалась с диоптром. Наблюдатель отмечал положение подвижной планки на стержне и с помощью специальной таблицы определял угол между горизонтом и светилом.

меня поныне. Вскоре я заметил, что угловые расстояния, которые по показаниям посоха Якова должны были совпадать, превращенные посредством математических выкладок в числа, не во всем согласуются друг с другом. После того как мне удалось обнаружить источник ошибки, я изобрел таблицу, позволившую мне вносить поправки и тем самым учитывать дефекты посоха. Приобрести же новый лимб все еще не представлялось возможным, поскольку гувернер, державший в своих руках завязки от кошелька, не допустил бы подобных трат. Вот почему я, живя в Лейпциге, и позднее, по возвращении на родину, произвел при помощи этого посоха множество наблюдений».

Среди результатов Браге особенно нужно отметить данные наблюдений движения планет, а также его сотрудничество с Кеплером. Но об этом чуть позже, а сейчас, как пример, приведем исследование им сверхновой 1572 года, вспыхнувшей в созвездии Кассиопеи. Ее яркость была сравнима с яркостью Венеры. Попытки определить параллакс сверхновой оказались безуспешными, а это означало, что она находится далеко за пределами лунной сферы. Но звезда не участвовала и в движениях планет. Тогда Тихо Браге заключил, что она принадлежит звездной сфере, что противоречило догме Аристотеля об абсолютной неизменности сферы неподвижных звезд.

Также, изучая одну из комет, Тихо Браге обнаружил, что она движется по орбите вокруг Солнца, причем отстоит от него дальше, чем Венера. Так разрушалось еще одно представление Аристотеля, который предполагал, что кометы – это атмосферные явления. Но, несмотря на эти очевидные противоречия со стандартными представлениями, Тихо Браге не смог отказаться от того, что тяжелая Земля должна покоиться.

Галилей

*Ученый, сверстник Галилея,
был Галилея не глупее.
Он знал, что вертится Земля,
но у него была семья.*

Евгений Евтушенко «Карьера»

Итальянского ученого Галилео Галилей (1564–1642), рис. 2.4, по праву считают основателем современной физики, в рамках которой законы природы должны подтверждаться экспериментально. Его труды по исследованию движения стали базисом, основываясь на котором Ньютон построил непротиворечивую механику и теорию гравитации. Возможно, многим Галилей наиболее известен тем, что первым применил телескоп для астрономических наблюдений.

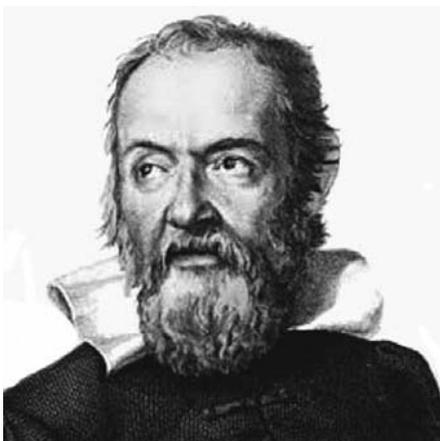


Рис. 2.4. Галелео Галилей

Исследуя какую-либо проблему досконально и многосторонне, Галилей почти каждый раз приходил к выводам, противоречащим утверждениям учения Аристотеля. Нельзя не отметить, что на протяжении столетий то один, то другой исследователь высказывал «крамольные» идеи или утверждения. Но они были, как правило, основаны на интуиции. Возражения же Галилея были обоснованы как математически, так и наблюдениями и опытами. Поэтому, конечно, Галилея можно считать одним из главных разрушителей многовековых догм. Неудивительно, что Галилей был и в числе самых известных сторонников системы Коперника. Поначалу эта система показалась Галилею неубедительной. Но шаг за шагом он все больше проникался идеями великого поляка.

Очень многие открытия были сделаны Галилеем благодаря использованию телескопа. Само изобретение телескопа обычно приписывают голландскому оптику Хансу Липперсгею (1587–1619). При этом полагают, что Галилей узнал об этом изобретении и начал изготавливать собственные инструменты, один из которых давал увеличение в 30 раз (рис. 2.5). Уже результаты первых наблюдений поражали воображение и противоречили устоявшимся представлениям. Всего за несколько месяцев наблюдений Галилей сделал открытия, которые полностью изменили представления человека о Вселенной.

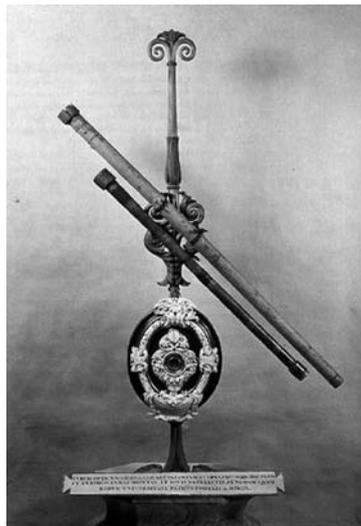


Рис. 2.5. Телескопы Галилея

Наблюдения пятен, замеченных (хотя и не впервые) на поверхности Солнца, помогли Галилею выяснить, что оно вращается вокруг своей оси. Оказывалось, что Солнце – совсем не идеальное эфирное тело. Но если Солнце вращается вокруг своей оси, то и Земля может вращаться. У Венеры наблюдалась периодическая смена фаз, а это не объяснялось в системе Птолемея. Планеты имели вид кружков, а звезды оставались точками без параллактических смещений. Уже 1624 году Галилей заключает, что удаленные звезды *не расположены* на единой сфере, что противоречило прежним догмам.

Но самым важным открытием Галилея, совершенным с помощью «вооруженного глаза» и опубликованным в его труде «Звездный вестник» в 1610 году, было наблюдение четырех спутников планеты Юпитер. Это доказывало, что Земля не является единственным центром, вокруг которого все остальное должно вращаться, а, скорее всего, сама движется вокруг Солнца, что согласуется с взглядами Коперника. Наблюдения Галилея можно было объяснить и в рамках системы Тихо Браге. Но в любом случае они были против догмы, что мир разделен на небеса и Землю. А раз так, то к изучению законов природы (в том числе и законов тяготения) на Земле и небесах (в космосе) можно подходить с единых позиций, в рамках одних и тех же научных представлений. Это было прорывом, изменялась сама концепция (направленность) исследований, их мотивация.

Конечно, работа Коперника «О вращении небесных сфер» стала революцией в мировоззрении, но не было предложено объяснения новой системы. Не было создано соответствующей теории силы и движения, которая позволила бы объяснить наблюдаемые явления. Хотя Галилей и не создал такой теории, но он один из ее основателей. Отметим основные достижения Галилея в области механики.

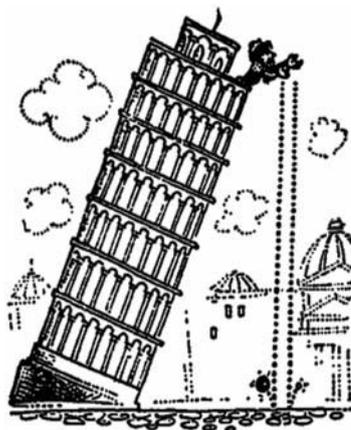


Рис. 2.6. Опыт Галилея

Опытным путем Галилей доказал, что без сопротивления воздуха (или с равным сопротивлением) все тела, независимо от их веса, падают на землю с одинаковым ускорением. Два предмета, тяжелый и легкий, сброшенные с башни (говорят, Галилей бросал их с Пизанской башни, рис. 2.6) ударятся о землю одновременно, если они имеют одинаковую геометрическую форму. Это противоречило аристотелевскому представлению, что, чем тяжелее предмет, тем быстрее он должен падать. Галилей также доказал существование вакуума и продемонстрировал как его, в принципе, можно получить. Годы спустя английский физик, химик, теолог Роберт Бойль (1627–1691), один из основателей Лондонского королевского общества (академии наук), проверяя гипотезу Галилея о падении тел, показал, что в вакууме с одинаковой скоростью падают и перо, и тяжелая золотая монета. Вместе с этим Галилей установил математическое соотношение – закон – для свободно падающего тела. Он показал, что расстояние s , пройденное падающим телом, пропорционально квадрату времени падения t : $s \sim t^2$. Эти же исследования показали, что движущееся с ускорением тело достигает скорости v пропорционально времени: $v \sim t$, а не расстоянию, как считалось раньше. Природа ускорения стала одним из центральных вопросов механики, на который необходимо было найти ответ.

В отличие от Аристотеля, Галилей утверждал, что для продолжения движения не требуется постоянного действия силы. По смыслу это заявление было фактически прообразом первого закона механики Ньютона. Оно было основано на следующих соображениях. Галилей мысленно рассматривал горизонтальную плоскость, на которой не было никаких воздействий на тело, то есть сил сопротивления (трения) или каких либо сил, способствующих движению. Тогда он утверждал, что если телу сообщить начальную скорость, то оно будет продолжать двигаться в начальном направлении до бесконечности. Чтобы остановить тело, нужно оказать воздействие, препятствующее его движению. Это заявление основано на следующем рассуждении. Тяжелые тела «предрасположены» к падению и «противятся» подъему, но они «безразличны» к движению в горизонтальной плоскости. Движущееся в горизонтальной плоскости тело не испытывает ни ускорения, ни замедления. Совершенно очевидно, что эти выводы не имели ничего общего с общепринятым тогда представлением о необходимости приложения силы для поддержания любого движения.

Проводя опыты, Галилей убедился, что тело может совершать одновременно два различных типа движения. Снаряд, пущенный горизонтально, должен двигаться вперед, проходя за равные отрезки времени равные расстояния, и, кроме того, он должен падать по направлению к земле в соответствии с установленным законом падения тел. Движение снаряда, выпущенного под углом вверх, должно следовать тому же закону. Поскольку эти два вида движения должны совершаться одновременно, траекторией объекта будет кривая,

называемая параболой. А по Аристотелю, как мы уже знаем, траектория должна быть ломаной линией (см. рис. 1.3).

Несмотря на революционные достижения в области механики, Галилей не смог освободиться от гипноза понятия *естественности кругового движения*. Его анализ движения по горизонтальной плоскости привел фактически к варианту закона инерции почти в современной понимании. Но наряду с ним он ввел также понятие «круговой инерции», смысл которого состоял в том, что в отсутствие каких-либо сил тело должно продолжать движение по окружности. Обоснование этого тезиса состояло в следующем. В небольших, земных, масштабах тела движутся по прямым на плоскости. Но поскольку Земля имеет форму шара, то горизонтальная плоскость, в которой осуществляется равномерное движение тела, увеличиваясь в масштабе, становится, в конечном счете, параллельной земной поверхности. То есть фактически становится концентрической сферой для земной поверхности. А значит, в планетарном масштабе свободное от воздействий тело будет двигаться равномерно по окружности. Это вывод Галилея. И действительно, Земля и планеты движутся вокруг Солнца по круговым орбитам без видимого воздействия на них внешних сил. Эти соображения побуждали Галилея настаивать на естественности кругового движения.

Чтобы обосновать движение с круговой инерцией, Галилею пришлось вводить понятие некоего отталкивания, не позволяющего телу упасть к центру Земли. Натянутость таких объяснений очевидна. А ведь он уже имел в руках собственный инструмент для объяснения движения вокруг Земли и был знаком с работами Кеплера, который открыл, что орбиты планет не круговые, а эллиптические. По Галилею, благодаря круговой инерции, тело будет вращаться по той же самой *круговой* орбите, если ему задать *разные* скорости, лишь бы оно оказалось на этой орбите. Но если распространить вывод Галилея о сложении движений на планетарный масштаб, то ясно, что сложение движения к центру Земли и движений по линейной инерции с *разными* скоростями должно дать *разные* орбиты, а не круговую. Так как раз получаются эллипсы Кеплера. Но мы забежали немного вперед.

Что же касается природы тяготения, то о ней Галилей, как и все его современники, не имел определенного представления. Он оставлял решение этой проблемы будущим исследователям.

Пропаганда идей Коперника и собственные открытия Галилея вызвали ярость католической церкви. В 1633 году Галилей был подвергнут суду инквизиции, вынудившей его отречься от идей Коперника. Обстоятельства дела до сих пор остаются неясными. Галилей был обвинен не просто в защите теории Коперника (такое обвинение юридически несостоятельно, поскольку книга прошла папскую цензуру), а в том, что нарушил данный ему ранее запрет «ни в каком виде не обсуждать» эту теорию.

Существует легенда, что Галилей, прочитав на суде предписанную форму отречения и встав с колен, произнес знаменитую фразу: «А все-таки она вертится!». Вряд ли можно быть уверенным в том, что это было именно так. Но вся последующая деятельность Галилея указывает на то, что он в действительности не отрекся и ни в коей мере не изменил своим прежним взглядам. В 1638 он опубликовал в Голландии новую книгу «Беседы и математические доказательства», где в более академической форме изложил свои мысли относительно законов механики, причем диапазон рассматриваемых проблем очень широк – от статики и сопротивления материалов до законов движения маятника и законов падения.

Эта книга, по сути, не менее революционна, чем та, за которую его судили, но теологи не обратили на нее внимания, потому что не поняли. До самой смерти Галилей не прекращал активной творческой деятельности: он пытался использовать маятник в качестве основного элемента механизма часов; за несколько месяцев до того как полностью ослеп, открыл либрации Луны (кажущиеся периодические покачивания); и уже совершенно слепой диктовал

последние мысли своим ученикам – Винченцо Вивиани и Эванджелиста Торричелли. Так, в ссылке, непобежденный Галилей умер в 1642 году.

Законы эллиптического движения Кеплера

Вторым человеком, сыгравшим решающую роль в утверждении гелиоцентрической системы, был немецкий ученый Иоганн Кеплер (1571–1630), рис. 2.7. Иоганн родился в бедной семье. Поступил в Тюбингенский университет, где с увлечением занимался математикой и астрономией. Его учитель профессор Местлин втайне был последователем Коперника. Конечно, в университете Местлин преподавал астрономию по Птолемею, но дома он знакомил своего ученика с основами нового учения. И вскоре Кеплер стал горячим и убежденным сторонником теории Коперника. Он закончил обучение как священник, но не был допущен к богословской деятельности, как вольнодумец. Он стал профессором математики и морали в городе Граце.



Рис. 2.7. Иоганн Кеплер

Затем был вынужден переезжать с места на место, в основном, из-за преследований со стороны католической церкви. Жил и умер в нищете.

Несмотря на жизненные перипетии, Кеплер в любых условиях вел научную работу. Для Карла Маркса, как пример самоотверженности, он был одним из двух любимых героев, другим был Спартак. После смерти Кеплера наследникам досталось: поношенная одежда, 22 флорина наличными, 29 000 флоринов невыплаченного жалования, 27 опубликованных рукописей и множество неопубликованных – они позже были изданы в 22-томном сборнике. Со смертью Кеплера его злоключения не закончились. В конце Тридцатилетней войны было полностью разрушено кладбище, где он похоронен, и от его могилы ничего не осталось. Часть архива Кеплера исчезла. В 1774 году большую часть архива (18 томов из 22) приобрела Петербургская академия наук, там всё и хранится в настоящий момент.

Альберт Эйнштейн назвал Кеплера «несравненным человеком» и писал о его судьбе: «Он жил в эпоху, когда еще не было уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и не понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения!»

Основываясь на мистической натурфилософии и пантеистических мотивах, Кеплер развил мысль о мировой гармонии. В его ранних работах использовались пифагорейские идеи. Число планет и расстояния от них до Солнца были связаны с числом и расположением правильных геометрических (евклидовых) тел, при этом движение планет вокруг Солнца объяснял действием своеобразных интеллектуальных сил, или душ. Эти результаты сегодня

не представляют особой ценности (их критиковали и современники, в частности, Галилей). Но их публикация в 1596 году в книге, которую коротко называют «Космографической тайной», привлекла внимание Тихо Браге. Он пригласил Кеплера к себе в Прагу для совместной работы. Именно это сотрудничество, которое состояло в кропотливом анализе точных данных каталогов наблюдений Тихо Браге за движениями планет, привело к замечательным результатам.

В 1600 году Кеплер занялся исследованием движения Марса. Он перебрал всевозможные комбинации эпициклов, деферентов, эксцентров и эквантов, чтобы добиться наилучшего совпадения расчетных результатов с наблюдаемым перемещением планеты, но добился точности в совпадении угловых координат планет лишь в 8 угловых минут, то есть всего около $\frac{1}{4}$ видимого диаметра лунного диска. Даже по тем временам это было очень низкой точностью. Естественно, такой результат не удовлетворил Кеплера. Часто приводят его слова: «эти 8 минут привели к пересмотру всей астрономии». Перебрав около семидесяти различных комбинаций, Кеплер пришел к выводу, что орбита Марса должна быть *эллипсом*.

Чтобы согласиться с собственным выводом, Кеплеру нужно было переломить себя. Как и большинство его современников, он был убежденным сторонником концепции идеального кругового движения. К сожалению, в 1601 году скончался Тихо Браге, но бесценные записи его наблюдений остались у Кеплера, и он в полной мере ими воспользовался.

Свои открытия Кеплер опубликовал в 1609 году в книге «Новая астрономия». В последующие годы он существенно дополнил свою работу, включив в нее даже результаты исследования движения спутников Юпитера; эти результаты были напечатаны в 1619 и 1621 годах. Из огромной массы полезных сведений и довольно-таки путаных рассуждений были выведены и сформулированы три закона движения планет. Первые два были даны в «Новой астрономии», третий – в труде «Гармония мира», изданном в 1619 году. Сегодня они известны под названием законов Кеплера. В современной формулировке эти законы звучат так:

Первый закон: Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится центр Солнца.

Второй закон: Площадь сектора орбиты, описанная радиус-вектором планеты, изменяется пропорционально времени.

Третий закон: Квадраты времен обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы их средних расстояний от Солнца (под «средним расстоянием» здесь понимается большая полуось эллипса):

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}.$$

Законы Кеплера показали, как движутся планеты. Это, конечно, имеет практическую ценность для небесной механики. На рис. 2.8 проиллюстрирован второй закон Кеплера, где показано, что за равное время t радиус-вектор «Солнце – планета» «заметает» равные площади S . Очевидно, что чем ближе планета к Солнцу, тем больше ее скорость. Третий закон легко позволяет найти среднее расстояние планеты от Солнца, если известно время ее полного обращения по орбите. Эти вычисления принимают особо простой вид, если расстояние измерять в астрономических единицах (1 а. е. равна среднему расстоянию от Солнца до Земли), а время – в годах (время одного полного оборота Земли вокруг Солнца). Если период

обращения планеты вокруг Солнца равен T годам, то ее среднее расстояние от Солнца в астрономических единицах равно $T^{2/3}$.

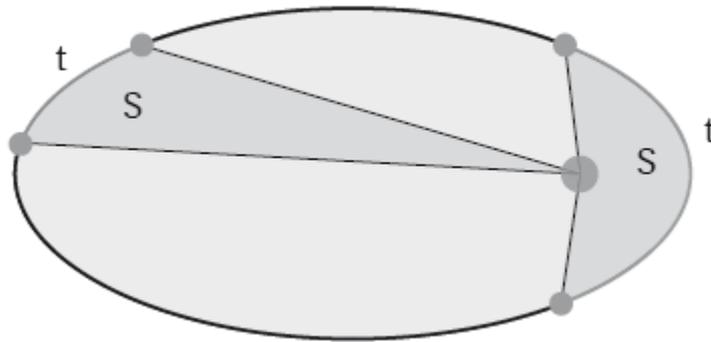


Рис. 2.8. Иллюстрация второго закона Кеплера

Выводы Кеплера – это результат многолетнего кропотливого труда, но они не сразу были восприняты сторонниками теории Коперника. Галилей, как говорилось, «до конца» оставался верен концепции круговых движений. Однако простота в расчетах при использовании законов Кеплера была неоспоримой, а точность предсказания положения планет значительно превосходила птолемеевские. Все это обеспечило законам Кеплера широкое признание и популярность в использовании уже в XVII веке.

Попытки понять природу гравитации

Итак, Кеплер опроверг догму об идеальном круговом движении как единственно возможном для небесных тел. Кроме того, гелиоцентрическая модель настолько утвердилась, что Земля окончательно потеряла свою исключительность во Вселенной, ее уже не мыслили как центр мироздания. В естествознании назрела необходимость больших перемен (и они уже происходили), необходимость смены взглядов на устройство мира. Возникали новые вопросы, более глубокие. Почему планеты движутся именно так? Какая движущая сила удерживает их на эллиптических орбитах вокруг Солнца? У Кеплера были свои соображения на этот счет, по тому времени революционные.

Кеплер был твердо убежден, что для поддержания движения требуется действие силы, в том числе и для движения планет по орбитам. Из второго закона, открытого им, следует, что скорость движения планет зависит от расстояния до Солнца. Причем при удалении от него планеты движутся медленнее, а приближаясь – быстрее. Тогда Кеплер предположил, что эта сила исходит от Солнца и ослабевает с увеличением расстояния от него.

Большое влияние на Кеплера оказали взгляды английского физика Уильяма Гильберта (1544–1603), полагавшего, что Земля ведет себя подобно гигантскому магниту. Кеплер предположил, что Солнце обладает подобными свойствами, что и является причиной движения планет. Правда, в то время без надлежащего математического обеспечения не было возможности показать, как такой механизм приводит к движению по эллиптическим орбитам. Кеплер также склонялся к мысли о том, что существует общее (взаимное) притяжение между телами, благодаря которому удаленные в пространстве тела стремятся двигаться друг к другу. Он считал, что планеты движутся в пустоте (вакууме), а поэтому допускал возможность того, что силы притяжения могут действовать через пустоту. На основании идеи общего притяжения между всеми телами Кеплер также утверждал, что причиной океанских приливов является влияние Луны и в меньшей степени – Солнца. Как и идеи Галилея, идеи Кеплера во многих отношениях предвосхитили теорию тяготения Ньютона.

Однако только с эпохи Галилея и Кеплера начали понемногу осознавать физический смысл понятий массы, силы, инерции, скорости и ускорения. А без этого невозможно построение законов механики и тяготения. Шаг за шагом формулировались непротиворечивые определения этих величин. Тогда же получила всеобщее признание и гелиоцентрическая модель Вселенной. В итоге, все было готово к тому, чтобы разрозненные данные объединились в стройную законченную систему. Коротко отметим основные этапы на этом пути.



Рис. 2.9. Рене Декарт

Одним из ярких ученых того времени является французский мыслитель Рене Декарт (1596–1650), рис. 2.9. Он сформулировал закон инерции фактически в том виде, в каком позднее этот закон стал именоваться первым законом Ньютона. В определении Декарта тело продолжает двигаться равномерно и прямолинейно до тех пор, пока нечто не выведет его из этого состояния. Эта формулировка понятия инерции была, конечно, более универсальной, чем предложенная Галилеем, у которого движение ограничивалось плоскостью.

Особое место в механике Декарта отводится трактовке взаимодействия тел. Всякое изменение движения должно вызываться взаимодействием с материальными телами, невозможна передача действия через пустоту. Поэтому предполагалось, что падающие тела подталкиваются по направлению к Земле неизвестными мельчайшими невидимыми частицами. Таким образом, Декарт отстаивал корпускулярную природу гравитационного взаимодействия, что принципиально отличается от магнетизма Кеплера.

Многие ученые – и сам Декарт, и его современники пытались объяснить движение планет по орбитам. Были даже модели, связывающие действие гравитации с действием солнечного света! Однако остановимся на идее свободного инерциального движения. Созрело понимание, что планеты от прямолинейного движения отклоняет и заставляет двигаться по орбите вокруг Солнца некая сила. Источник силы приписывали Солнцу. Но чтобы при этом предотвратить падение планет на Солнце и обеспечить их наблюдаемое движение по окружности (или эллипсу), должно существовать еще одно воздействие – *отталкивание* от центра. Такое воздействие было названо центробежной силой. Однако не было сделано решающего шага – осознания, что движение по окружности – это равноускоренное движение, вызванное действием *единственной* силы, направленной к центру круга. Таким образом, центробежная сила – это кажущаяся сила, единственно реальной силой, действующей, скажем, на спутник Земли, является сила притяжения Земли.

Приведем известный пример из учебников: вращение камня на конце веревки. Чтобы камень двигался по окружности, мы должны приложить к нему силу, направленную вдоль веревки к центру вращения («центростремительную» силу), т. е. веревка должна быть все время натянутой. Если веревка оборвется, камень полетит не вдоль радиуса (как было бы, если бы на него действовала сила, направленная строго от центра), а по касательной к окружности. Причем он будет двигаться с постоянной скоростью и прямолинейно в том направлении, в каком двигался в момент обрыва веревки, подчиняясь тем самым закону инерции.

Трудности в понимании сути основных физических величин были преодолены со временем. Понятие скорости представлялось достаточно ясным, смысл ускорения разъяснил Галилей. Что касается величин, которые мы сегодня называем массой, силой и инерцией, то потребовались усилия и время, чтобы эти понятия были четко определены.

Существенное разъяснение в их толкование внес французский физик Эдм Мариотт (1620–1684). Масса – это мера вещества, содержащегося в теле; она зависит от размеров и плотности тела. Но самое главное в рассуждениях Мариотта состоит в следующем. Всякое тело оказывает сопротивление изменению состояния его движения, и величина этого сопротивления зависит от массы тела. Если два шара получают удар с одинаковой силой, то шар меньшей массы приобретет большую скорость. Таким образом, масса определяет меру инертности: большей массе соответствует большая инерция тела.

Сложнее обстояло дело с понятием силы. В конце концов, приемлемым определением стало следующее: сила – это физическая величина, которая определяет воздействие одного тела на другое. Силы могут быть разной природы, в нашей беседе интересна механическая сила. В чем ее основное проявление? Еще со времен опытов Галилея было установлено, что действие механической силы на свободный предмет вызывает изменение его скорости, т. е. ускорение. Именно такое понимание силы со временем стало общепринятым. Необходимо

отметить, что понятие «тяжести» (или веса), связанное с падением, принципиально не имеет отношения к понятию инертной массы, определенной выше. Однако понятия веса и массы связаны между собой – более тяжелое тело имеет большую инертную массу.

Дискуссии о природе гравитации продолжались. Одним из главных вопросов был следующий: притягиваются ли разнесенные в пространстве тела непосредственно или же их движение объясняется ударами неких невидимых частиц? Последователи Декарта считали мысль о непосредственном притяжении (через пространство, через пустоту) совершенно неприемлемой. Точка зрения, что приводить тела в движение могло только воздействие реальных частиц, была в то время более популярной.

Глава 3

Закон всемирного тяготения

Творенья интеллекта переживают шумную суету поколений и на протяжении веков озаряют мир светом и теплом.
Альберт Эйнштейн «Исаак Ньютон»

Исаак Ньютон

Прежде чем начать рассказ о создании знаменитых законов механики и закона всемирного тяготения, вспомним несколько эпизодов из биографии их создателя – великого английского физика Исаака Ньютона (1643–1727), рис. 3.1. Биографы Ньютона пишут о нем по-разному: одни превозносят его, другие считают, что и работал он мало, и публиковал мало, и человеком был дурного характера – присваивал чужие идеи и т. д. Но все они сходятся в том, что написать «Начала натуральной философии» в XVII веке *никто, кроме Ньютона, не мог*. А это самая главная книга для естествоиспытателя того времени, она определила дальнейшее развитие науки. И этот факт затмевает все рассуждения о характере Ньютона.



Рис. 3.1. Исаак Ньютон

Ньютон родился в небольшой деревушке Вульсторп в Линкольншире в фермерской семье. Отец его умер еще до рождения сына, мать после этой смерти родила преждевременно, и новорожденный Исаак был поразительно мал и хил. Все думали, что он умрет. Ньютон, однако, дожил до глубокой старости и почти не болел. После того как мать вышла замуж второй раз, Исаака с трех лет воспитывала бабушка. Сначала он посещал начальную школу, по достижении двенадцатилетнего возраста начал ходить в общественную школу в Грантэме, а жить стал у аптекаря Кларка, где провел около шести лет.

Жизнь у аптекаря впервые возбудила в нем охоту к занятиям химией, но школьные знания не давались, вероятно, из-за неспособности учителей. С детства Ньютон любил сооружать разные механические приспособления – и, благодаря этой страсти, он навсегда остался, прежде всего, механиком. Еще 17-летним юношей он был принят в коллегииу Троицы (двухгодичное образование) в Кембриджский университет, который был в то время одним из лучших в Европе. Только в 1664 году Исаак Ньютон стал настоящим студентом и в 1665 он получил степень бакалавра изящных искусств (словесных наук).

В 1666 году в Кембридже началась эпидемия чумы, и Ньютон скрылся в своей родной деревне. В тиши, не имея под рукой ни книг, ни приборов, он жил почти отшельнической жизнью, предавался философским размышлениям. Плодом их было гениальнейшее из его открытий – учение о всемирном тяготении. Обсуждение смысла этого открытия впереди, а легенда такова:

Был летний день. Исаак Ньютон любил размышлять, сидя в саду, на открытом воздухе. Но размышления Ньютона были прерваны падением налившегося яблока. Знаменитая яблоня долго хранилась в назидание потомству, позднее засохла, была срублена и превращена в исторический памятник в виде скамьи.

Ньютон никогда не мог бы развить и доказательно сформулировать свою гениальную идею, если бы не обладал могущественным математическим методом – дифференциальным и интегральным исчислением. Задолго до него исследователи занимались вопросом о бесконечно малых, но ограничились лишь самыми элементарными выводами. Когда именно Ньютон разработал свой новый метод – в точности неизвестно. Однако по использованию его для развития теории тяготения следует думать, что он был развит между 1666 и 1669 годами.

Параллельно и независимо развитием этого же формализма занимался великий немецкий математик Готфрид Лейбниц (1646–1716). В письме, написанном в июне 1677 года, Лейбниц прямо раскрывал Ньютону свой метод дифференциального исчисления, что, конечно, было позже разработок Ньютона. Тот на письмо Лейбница не ответил. Ньютон считал, что открытие принадлежит ему навечно. При этом достаточно того, что оно было лишь в его голове – результаты своих исследований Ньютон опубликовал лишь в 1704 году! Ученый искренне считал: своевременная публикация не приносит никаких прав. Перед Богом первооткрывателем всегда останется тот, кто открыл первым.

Систематическое изложение начал дифференциального исчисления Лейбниц напечатал в журнале «Труды ученых» в 1684 году. Все опубликованные им трактаты, особенно последний, вышедший почти за три года до первого издания «Начал» Ньютона, дали науке огромный толчок. Дело в том, что результаты Ньютона по математическому анализу в силу их запутанности с большим трудом доходили до умов лучших французских и английских математиков того времени. Ньютон сам считал, что его метод флюксий (производных), это не отдельная наука, а лишь инструмент для исследования природы. А после публикаций Лейбница все стало вдруг ясным, отчетливым и общедоступным.

Возвратившись после чумы в Кембридж, Ньютон занялся научной и преподавательской деятельностью. С 1669 по 1671 год он читал лекции, в которых излагал свои открытия относительно анализа световых лучей. Но пока ни одна из его научных работ еще не была опубликована.

Ньютон много работал над усовершенствованием оптических приборов. Замечательным результатом считается сконструированный им телескоп, который может с полным правом считаться первым отражательным телескопом (рефлектором). Лондонское королевское общество через посредство своего секретаря Ольденбурга обратилось к Ньютону с просьбой сообщить подробности изобретения. Этот инструмент впервые сделал имя Ньютона известным всему тогдашнему ученому миру. В конце 1670 года Ньютон был избран в члены Лондонского королевского общества (английской академии наук).

После этого, по некоторым данным, был период, когда он занимался наукой чрезвычайно мало, а увлекся алхимией, которую к науке не причисляли. На попытки получить золото (философский камень) Ньютон потратил в этот период значительно больше усилий и времени, чем на исследования по математике и физике.

В тетрадях Ньютона (а он подробно описывал все опыты, чтобы можно было их повторить) есть запись: «Вонь ужасная, видимо, я близок к цели».

В 1678 году секретарем Лондонского королевского общества стал английский естествоиспытатель с широчайшим научным кругозором Роберт Гук (1635–1703). У Ньютона с ним всегда были отношения соперничества, если не враждебные. Правда, нелюбовь к Ньютону не мешала Гуку признавать его гений. Гук был изумительным экспериментатором, у него всегда была масса идей. К сожалению, многие из них он не доводил до конца. А когда кто-нибудь их завершал, почти всегда лавры доставались последнему. Первое столкновение с Ньютоном произошло в 1673 году по поводу природы света, которую Ньютон считал корпускулярной, а Гук – волновой. Потом по инициативе Гука было примирение. Правда, отметим, что Ньютон результаты своих исследований по оптике опубликовал только после смерти Гука.

После того как Гук стал секретарем Королевского общества, между ним и Ньютоном произошел обмен письмами, в которых Гук изложил свою гипотезу тяготения и попросил Ньютона высказаться по этому поводу. Гук считал, что сила притяжения между двумя телами в соответствии с законами Кеплера должна быть обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Письмо датировано 6 января 1680 года. Получив его, Ньютон переписку с Гуком оборвал и больше ему никогда не писал. Возможно, причина была той же, что и при переписке с Лейбницем – уже поняв суть закона притяжения во время исследований «чумной ссылки», он не считал нужным что-то еще обсуждать. Кто знает? С этого, считают, и началась вошедшая в историю полемика и противостояние между этими учеными.

Тем не менее, общение с Гуком сыграло, конечно, очень важную роль. Например, Ньютон полагал, что падающее тело вследствие соединения его движения с движением Земли опишет спираль. Гук показал, что траектория этого типа получается лишь в том случае, если принять во внимание сопротивление воздуха, а в пустоте движение должно быть эллиптическим – речь идет об истинном движении, то есть таком, которое мы могли бы наблюдать, если бы сами не участвовали в движении земного шара. Проверив выводы Гука, Ньютон убедился, что тело, брошенное с достаточной скоростью, находясь в то же время под влиянием силы земного тяготения, действительно должно двигаться по эллипсу.

Это означало, что многолетние вычисления оказались верными. Теперь он вполне и окончательно убедился в возможности создать целую систему, основанную на одном простом начале. Все движения Луны, планет и даже комет стали для него вполне ясными. В конце 1683 года Исаак Ньютон, наконец, сообщил Королевскому обществу основные начала своей системы, изложив их в виде ряда теорем о движении планет. Свои основные выводы Ньютон представил в фундаментальном труде под названием «Математические начала натуральной философии». До конца апреля 1686 года первые две части его книги были готовы и посланы в Лондон. Весь трехтомник был издан в 1687 году. Отметим, что издание принадлежало не ему, а Королевскому обществу.

Ньютону было уже за пятьдесят. Несмотря на свою огромную славу и успех книги, жил он в весьма стесненных обстоятельствах. Жалованье было незначительно, и Ньютон тратил все, что имел, частью на химические опыты, частью на помощь своим родственникам, он помогал даже своей старинной любви – бывшей мисс Сторей.

В 1695 году материальные обстоятельства Ньютона изменились. Его близкий друг и поклонник Чарльз Монтегю был назначен канцлером казначейства. Заняв этот пост, Монтегю озаботился проблемой улучшения денежного обращения в Англии, где в то время, после ряда войн и революций, было множество фальшивой и неполновесной монеты, что приносило огромный ущерб торговле. Монтегю решил перечеканить всю монету. Чтобы придать наибольший вес своим начинаниям, Монтегю обратился к тогдашним знаменитостям, в том числе и к Ньютону. И ученый не обманул ожиданий своего друга. Он взялся за новое дело с чрезвычайным усердием и вполне добросовестно, причем своими познаниями в химии и математической сообразительностью оказал огромные услуги стране. Благодаря

этому, трудное и запутанное дело перечековки было удачно выполнено в течение двух лет, что сразу восстановило торговый кредит. Ньютон из управляющего монетным двором был сделан главным директором монетного дела с окладом 15 тысяч фунтов в год и эту должность занимал до самой смерти. При его чрезвычайно умеренном образе жизни из жалования образовался значительный капитал. Он никогда не вел счета деньгам, всегда поддерживал близких и дальних родственников, часто давал стипендии молодым ученым. Так, в 1724 году он назначил стипендию в двести фунтов Маклорену, впоследствии знаменитому математику.

В 1701 году Исаак Ньютон был избран членом парламента, а в 1703 году стал президентом английского Королевского общества. В 1705 году английский король возвел Ньютона в рыцарское достоинство. Многие историки считают (в отличие от многих других), что Ньютона отличали скромность и застенчивость. Он долго не решался опубликовать свои открытия и даже собирался уничтожить некоторые из глав своих бессмертных «Начал». Известно его изречение: «Я только потому стою высоко, что стал на плечи гигантов».

С 1725 года Ньютон перестал ходить на службу, умер в 1726 году во время эпидемии чумы. В день его похорон был объявлен национальный траур. Его прах покоится в Вестминстерском аббатстве рядом с другими выдающимися людьми Англии. Надпись на памятнике Ньютону, сделанная его современниками, гласит: «...сэр Исаак Ньютон, дворянин, наделенный почти божественным разумом...»

Механика Ньютона

Теория тяготения Ньютона без использования его законов механики не была бы создана. Опуская детали, которые можно найти и в школьном учебнике физики, приведем эти три основных закона в окончательном виде. Без всякого сомнения, они имеют фундаментальное значение и сейчас. Отметим только, что при публикации законов Ньютон отдал должное своим предшественникам, особенно Галилею. Ньютон считал, что первые два закона открыты до него, он их лишь представляет. Итак, в современной формулировке законы механики Ньютона звучат так.

Первый закон: Всякое тело пребывает в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока действующие на него силы не изменят этого состояния.

Второй закон: Произведение массы тела m на его ускорение a равно действующей на него силе F , т. е. $F = ma$, а направление ускорения совпадает с направлением силы.

Третий закон: Действию силы всегда соответствует равное по величине и противоположное по направлению противодействие.

Теория гравитации Ньютона

Теперь обратимся непосредственно к истории создания теории гравитации. Оставляя в стороне вопрос о природе тяготения, отметим, что с «практической» точки зрения (для вычисления движений небесных тел) было важно знать, как сила гравитационного взаимодействия между телами зависит от расстояния между ними.

В 1684 году английский астроном и физик Эдмунд Галлей (1656–1742), занимающий должность Королевского астронома, после долгих размышлений пришел к убеждению, что сила притяжения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Это предположение казалось вполне разумным. Действительно, если некое воздействие распространяется от источника симметрично по всем направлениям, то площадь, «охватываемая» этим воздействием, возрастает как квадрат расстояния от центра. Поэтому вполне вероятно, что эффективность этой силы должна уменьшаться пропорционально этой площади, то есть должна быть обратно пропорциональной квадрату расстояния. Однако Галлей и его коллеги не смогли доказать математически, что из такого закона притяжения следует вывод о движении планет по эллиптическим орбитам.

В августе того же 1684 года Галлей отправился в Кембридж за консультациями к профессору математики Исааку Ньютону. Вопрос Галлея звучал так: «По какой траектории должна двигаться планета под действием силы, изменяющейся обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца?» К изумлению Галлея, Ньютон сразу ответил, что такой траекторией является эллипс. Дело в том, что изучать проблемы тяготения Ньютон начал еще в 1665 году, и уже получил решение. Свои расчеты он отослал Галлею через несколько месяцев и с его одобрения опубликовал результаты в книге «Математические начала натуральной философии». Повторимся, среди фундаментальных научных трудов в истории мировой науки эта книга – одна из самых значительных.

Встреча с Галлеем возродила у Ньютона интерес к проблемам тяготения и движения планет. Вернемся к легенде о падающем яблоке и обсудим ее. Если этого не было на самом деле, то такая легенда не могла не возникнуть. По сути, задается вопрос: не заставляет ли падать яблоко та же самая сила, что удерживает Луну на ее орбите вокруг Земли? Легенда олицетворяет прорыв в научном понимании тяготения, связывает «низкое» представление о тяготении, проявления которого мы воспринимаем каждый день, и «высокое», благодаря которому движутся светила, управляется вся Вселенная.

Ньютон установил, что тело, равномерно движущееся по окружности, фактически движется с ускорением (центростремительным), вызванным постоянной силой, направленной к центру окружности: $a_{цс} = v^2/R$. Третий закон Кеплера устанавливает связь между периодами обращения планет вокруг Солнца и их расстояниями от него. Применяя это соотношение к движению по окружности, Ньютон легко нашел скорость линейного движения: $v \sim 1/R^{1/2}$.

Тогда сила, соответствующая центростремительному ускорению и удерживающая планеты на орбитах (пусть пока круговых), должна иметь вид: $F \sim 1/R^2$, то есть должна быть обратно пропорциональной квадрату расстояния от планеты до Солнца. Тогда Ньютон решил выяснить, не управляет ли одна и та же сила движением Луны на орбите и падением яблока на поверхности Земли.

Интуитивно Ньютон понял, что существенно расстояние от центра Земли, а не от ее поверхности, хотя это предположение он сумел доказать значительно позднее. Зная период обращения Луны вокруг Земли, было нетрудно подсчитать с помощью третьего закона Кеплера, что центростремительное ускорение Луны по направлению к Земле, как показано выше $a_{цс} \sim 1/R^2$. Ускорение падения тел вблизи поверхности Земли было хорошо известно

из опытов. А поскольку Луна находится в 60 раз дальше от центра Земли, чем яблоко на ее поверхности, то ускорение для яблока должно быть в $60 \times 60 = 3600$ раз больше. Число 60 очень удачно для сравнения в данном случае. Используя законы ускоренного движения, легко подсчитать, что за одну секунду яблоко должно пролетать к центру Земли расстояние, которое Луна проходит только за одну минуту. Проведя расчеты, Ньютон обнаружил, что они согласуются с наблюдениями с точностью $\sim 1\%$ и пришел к твердому убеждению, что движением планет, Луны и всех тел, падающих на землю, действительно, управляет одна и та же сила – тяготение.

Успехи Ньютона как физика были бы невозможны, если бы он не разработал необходимый математический аппарат, о чем мы уже говорили. Это фактически была совершенно новая область математики – математический анализ. С его помощью Ньютон показал, что эллиптическая форма орбит обусловлена движением под действием силы, направленной к одному из фокусов эллипса, величина которой обратно пропорциональна квадрату расстояния от него. Однако только в 1685 году с помощью созданного им аппарата математического анализа Ньютон сумел доказать, что гравитационное притяжение Земли можно рассматривать так, как если бы вся ее масса была сосредоточена в центре. Этот факт был принципиальным, он позволил Ньютону обосновать использованный ранее способ сравнения ускорений Луны и яблока.

С помощью своих законов механики Ньютон убедительно доказал, что нет деления на тела, которые притягивают, и тела, которые притягиваются. Все тяготеющие тела *взаимопритягиваются*, то есть законы гравитации имеют универсальный смысл.

Повторим коротко его вывод. У поверхности Земли все тела падают с одинаковым ускорением g независимо от их массы (веса), а сила, действующая на тело на поверхности Земли, пропорциональна его массе (весу), поэтому $F = mg$. Далее, согласно третьему закону механики, если на тело массой m со стороны другого тела массой M действует некоторая сила, то тело массой m действует на тело массой M точно с такой же, но противоположно направленной силой. Скажем, не только Земля притягивает Луну, но и Луна притягивает Землю. Следовательно, сила взаимного притяжения двух тел должна быть пропорциональна каждой из масс. То, что эта сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами было уже установлено. Поэтому сила взаимного притяжения двух масс m и M , удаленных на расстояние r друг от друга, определяется выражением:

$$F = G \frac{mM}{R^2},$$

которое и является формулировкой закона всемирного тяготения; здесь G – это коэффициент пропорциональности, называемый постоянной всемирного тяготения. Величина G показывает, насколько сильно гравитационное взаимодействие. Это одна из фундаментальных мировых констант, чисел, значения которых определяют поведение и Вселенной в целом, и отдельных ее частей.

Понятие «масса», входящее во второй закон Ньютона, имеет смысл инертной массы – меры сопротивления тела любому изменению состояния его движения. Из второго закона Ньютона следует, что если к двум телам с разными массами приложить одинаковую силу, то менее массивное тело приобретает большее ускорение, чем тело с большей массой. Но понятие «массы» в законе всемирного тяготения имеет другой смысл – это «тяготеющая масса», или мера того, что условно можно назвать «количеством тяготения», присущим данному телу.

Нет логических оснований считать эти два вида массы тождественными. В конце концов, тяготеющую массу можно рассматривать как гравитационный эквивалент электрического заряда; два тела с одинаковой инертной массой могут иметь совершенно различные электрические заряды и, следовательно, приобретать разные ускорения под действием одного и того же электрического поля. В противоположность этому, в гравитационном поле Земли тела как с разными, так и с равными инертными массами всегда падают с одним и тем же ускорением. А это может быть только в том случае, если отношение тяготеющей массы к инертной для всех тел одинаково.

Ньютон провел серию экспериментов, чтобы выяснить, не оказывается ли это отношение различным для разных тел. Такого различия он не обнаружил, не обнаружено оно и до сих пор. Поскольку эти два вида массы всегда находятся в одной и той же пропорции друг к другу, единицу измерения для них подобрали так, чтобы их отношение оказалось равным единице. Это выражается в том, что формула для силы притяжения на поверхности Земли имеет вид второго закона: $F = mg$.

Факт равенства инертной и тяготеющей масс известен как *принцип эквивалентности*. Ниже мы увидим, что этот принцип служит одним из ключевых положений общей теории относительности Эйнштейна.

Значение закона всемирного тяготения нельзя переоценить. Ньютон показал, что тело совершает движение по какой-либо кривой конического сечения (окружности, эллипсу, параболе или гиперболе) в том случае, если на него действует сила, обратно пропорциональная квадрату расстояния и направленная к фокусу этой кривой. И наоборот, движение тела под действием такой силы подчиняется законам Кеплера. Ньютон показал также, что действием такой универсальной силы можно объяснить движение Луны и планет, ускорение падающих тел, поведение спутников Юпитера и океанские приливы.

Были объяснены и предсказаны и другие явления. Ньютон предсказал, что в результате вращения вокруг своей оси Земля должна быть слегка выпуклой вблизи экватора и сплюснутой у полюсов. Он объяснил, как это отклонение формы Земли от идеальной сферы приводит к прецессии – явлению, открытому Гиппархом почти 2000 лет назад. В результате прецессии – медленного поворота земной оси – полюс небесной сферы описывает на небе окружность. Если бы Земля была идеальным шаром, то этого бы не наблюдалось, но вследствие экваториальной выпуклости Земли и наклона ее оси гравитационное воздействие на нее со стороны Солнца и Луны заставляет земную ось поворачиваться, описывая коническую поверхность. Точно так же вращается ось волчка, если при его запуске отклонить ось от вертикального направления, здесь внешней силой, вызывающей прецессию, является сила притяжения Земли.

Галлей, анализируя данные о наблюдениях комет и основываясь на законах Ньютона, сделал вывод, что часть из этих наблюдений относится к одной и той же комете и предсказал ее следующее появление. Когда предсказание оправдалось, комету назвали его именем. Комета Галлея, единственная из короткопериодических комет (орбитальный период около 76 лет), доступная для наблюдения невооруженным глазом. Последний раз она появилась вблизи Солнца и Земли, согласно все тем же расчетам по формулам Ньютона, в марте 1986 года. Тогда комету Галлея наблюдали не только многочисленные любители астрономии и профессиональные ученые, но и пять международных космических аппаратов.

С открытием закона всемирного тяготения стало возможным изучение влияния планет друг на друга, вызванного их взаимным притяжением. Так, исследуя возмущения в движении Урана, удалось точно рассчитать орбиту неизвестной планеты за Ураном, которая эти возмущения вызывала. Позднее ее обнаружили точно в расчетном месте и назвали Нептуном.

В 1803 году английский астроном и оптик Вильям Гершель (1738–1822) опубликовал данные своих наблюдений, из которых следовало, что многие звезды, видимые как точки, на самом деле состоят из пары звезд, медленно обращающихся одна вокруг другой под воздействием взаимного притяжения; такие системы получили название двойных звезд. Последующие наблюдения показали, что движение двойных звезд подчиняется законам Кеплера и закону всемирного тяготения Ньютона. В 1842 году известный немецкий астроном Фридрих Бессель (1784–1846) на основе закона Ньютона предсказал существование невидимого спутника у звезды Сириус. Спутник был открыт через 10 лет!

Уже к концу первой половины XIX века было установлено, что закон всемирного тяготения Ньютона в наблюдаемой Вселенной выполняется повсеместно.

Корпускулярная теория гравитации

Теория гравитации Ньютона завоевывала все больше сторонников. В законе обратных квадратов мало кто сомневался. Шли дискуссии о *природе гравитации*. Поскольку механизм передачи гравитационного взаимодействия с помощью частиц (корпускул) казался самым естественным, то именно он был более популярным. Как это ни странно, корпускулярный подход имеет сторонников и в наше время, и теория продолжает развиваться. Поэтому нельзя не рассказать о ней, хотя бы кратко.

Сейчас чаще всего корпускулярную теорию гравитации связывают с именем Жоржа-Луи Ле Сажа (1724–1803), швейцарского математика и физика. Тем не менее, первое известное построение такой теории принадлежит другому швейцарскому математику из Базеля Николасу Фатио де Дуилье (1664–1753). В 1690 году содержание его рукописи зачитали перед Лондонским Королевским обществом, но она не произвела впечатления. Однако де Дуилье не оставил своих исследований, хотя теория не воспринималась, и ни одна из его рукописей не была издана при жизни. Их частичное издание проходило на протяжении последующих столетий, почти до наших дней.

Некоторые фрагменты рукописей Фатио, включая одну в стиле поэмы, были приобретены Ле Сажем, но и он не смог найти издателя. А в 1748 году Ле Саж на их основе предложил свой вариант, который давал простое механическое объяснение формуле всемирного тяготения. Некоторое время эти результаты были не очень известны, но стали темой повышенного интереса в конце XIX века в контексте только что появившейся кинетической теории газов.

Обсудим содержание теории Ле Сажа. Предполагается, что Вселенная заполнена быстрыми маленькими «гравитационными частицами», интенсивность потока которых изотропна. Тогда удаленный от всех других тел объект **A** (рис. 3.2) испытывает равномерное сдавливание внутрь, но внешней направленной силы не возникает. Появление рядом другого объекта **B** приведет к их взаимной экранировке, и из-за дисбаланса сил внешних ударов тела будут прижиматься друг к другу. Этим имитируется сила притяжения.

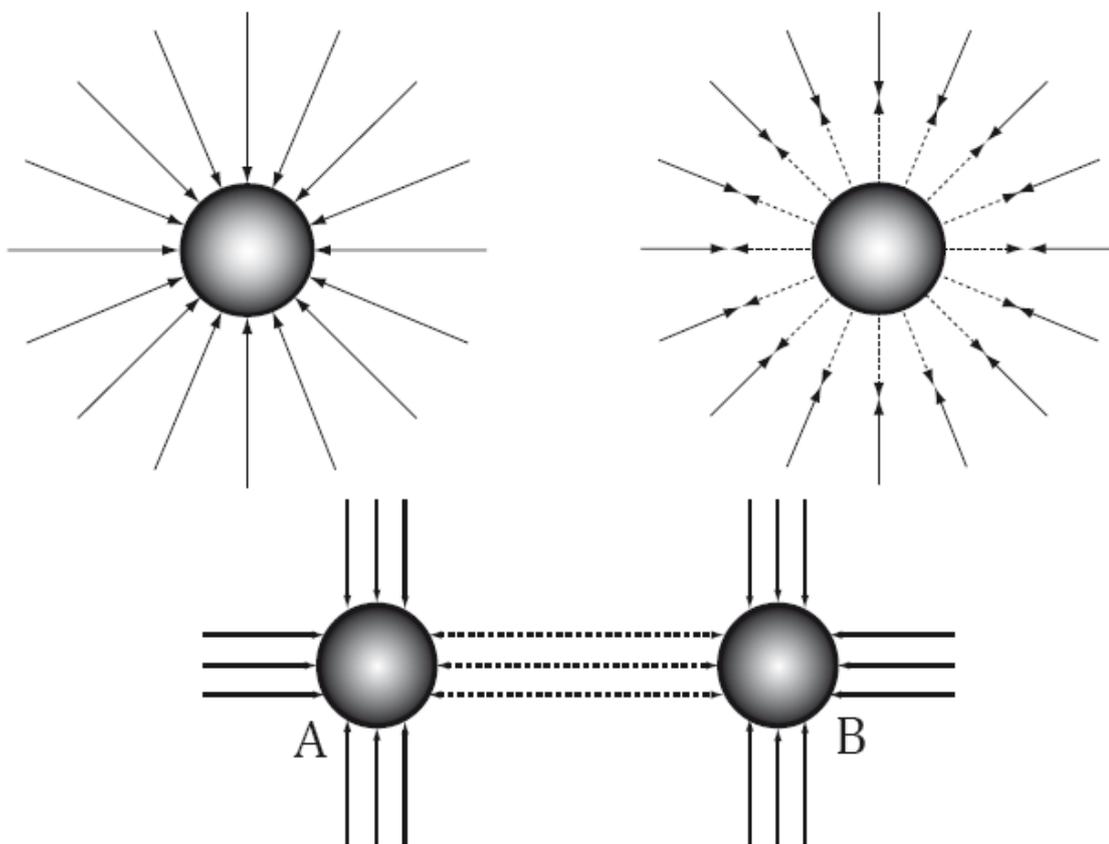


Рис. 3.2. Схема корпускулярной теории гравитации

Однако развитие теории требовало постоянной корректировки. Например, если считать, что столкновение частиц *полностью* упруго (рис. 3.2), то отраженные частицы между объектами **А** и **В** *компенсируют* «экранирующий» эффект. Пришлось «подгонять» коэффициент отражения. Чтобы имитировать пропорциональность массам в законе притяжения, приходится вводить ряд ограничений и на сами частицы, и на строение вещества. Эти ограничения и в то время выглядели умозрительными, а с точки зрения современных представлений недопустимы, и т. д.

Поэтому теорию Ле Сажа скорее отклоняли, чем принимали. Мы приведем несколько пунктов современной критики.

1) Гравитационные частицы Ле Сажа не вписываются в современную хорошо подтвержденную Стандартную модель элементарных частиц.

2) Чтобы объяснить движения небесных тел, частицы Ле Сажа должны иметь скорость, существенно превышающую световую, что также противоречит современным данным (см. ниже).

3) Требуемая большая интенсивность фона гравитационных частиц противоречит модели горячей Вселенной (см. ниже).

4) Существуют также возражения, связанные с термодинамикой среды гравитационных частиц.

Все это вызывает значительный пессимизм в отношении теории Ле Сажа. Он усиливается успехами общей теории относительности. Тем не менее, периодически появляются новые работы, развивающие корпускулярную теорию, видимо, из-за наглядности и простоты. Возможной причиной внимания является отсутствие теории тяготения на микроуровне. Но мы к корпускулярной теории больше не вернемся.

Глава 4

От механики Ньютона до электродинамики Максвелла

Мне не стоило большого труда отыскание того, с чего следует начинать, так как я уже знал, что начинать надо с самого простого и доступного пониманию...

Рене Декарт «Рассуждения о методе»

Сейчас нам придется отвлечься от понятий, связанных непосредственно с теорией тяготения. Дело в следующем: чтобы подойти к обсуждению общей теории относительности (теории тяготения) необходимо понимать, что представляет собой ее предшественница – специальная теория относительности, не имеющая прямого отношения к описанию тяготения. Это связано с тем, что одна теория в определенном смысле «вырастает» из другой. Действительно, специальную теорию относительности можно мыслить как теорию плоского пространства-времени, в то время как общая теория относительности – это теория искривленного пространства-времени. В этой главе мы обсудим предпосылки создания специальной теории относительности, а в следующей – принципы ее построения, интерпретацию и интересные эффекты.

Протяженность и длительность. Методы измерений

*Математика – мощный и универсальный метод познания природы, образец для других наук.
Рене Декарт «Начала философии»*

Чтобы прийти к замечательным выводам, ставшими впоследствии законами механики, Галилей, Ньютон и многие другие ученые, экспериментируя с материальными телами на Земле и изучая движение небесных тел, должны были производить *измерения*. Определяли размеры тел и расстояния между ними (*протяженности*), положения тел и пройденные ими расстояния при движении. Особое место в механике занимает изучение последовательности событий, продолжительности событий (*длительности*), частоты возникновения событий. Все это осуществляется путем измерений момента каждого события по часам.

Говоря о пространственных измерениях, нельзя не вспомнить Декарта и Ферма, внесших неоценимый вклад в систематизацию этого процесса. Декарт был убежденным материалистом, а одним из главных свойств материальных вещей считал *протяженность*, которая может проявляться по-разному. Декарт отрицал существование пустого пространства на том основании, что везде, где есть протяженность, которую можно измерить, есть материя. Один из его тезисов: «В мире нет ничего, кроме движущейся материи различных видов. Материя состоит из элементарных частиц, локальное взаимодействие которых и производит все природные явления». Эти философские убеждения повлияли на выбор проблем, которые ему было интересно исследовать. Он стал одним из создателей аналитической геометрии, которую разрабатывал одновременно с французским математиком Пьером Ферма (1601–1665). Геометрические задачи стало возможно исследовать как алгебраические с помощью метода координат.

По мнению историков, Ферма, как математик, был более одаренным, чем Декарт. Он восхищался греками и был продолжателем их традиций. Ферма задавал положение точки на плоскости с помощью значений длин двух отрезков – абсциссы и ординаты, а кривая определялась уравнением, связывающим длины этих отрезков. Эта идея активно использовалась древними греками. Архимед, например, описывает конические сечения через их «симптомы», – пропорции, связывающие абсциссы и ординаты точек. Однако древние греки применяли лишь словесное описание пропорций, а Ферма представляет свои формулировки в виде уравнений, хотя тоже не символизированных. Это, конечно, значительно облегчает анализ проблем, но подход остается чисто геометрическим, пространственным.

Ферма изложил результаты своих исследования в трактате «Введение в изучение плоских и телесных мест». Книга была опубликована только в 1679 году, уже после его смерти, хотя в основном французские математики узнали о ее идеях и выводах значительно раньше, в 1630-х годах. Дело в том, что Ферма был юристом, и массу времени у него отнимала служба. Параллельно он занимался математикой и вел активную переписку с учеными того времени, его результаты были известны всему сообществу. Известно, что был он очень доброжелательным в своих письмах, иногда одно и то же объяснял много раз с разных позиций, не реагируя на возможно недоброжелательный тон оппонента.

Рене Декарт в детстве отличался хрупким здоровьем, но был чрезвычайно любознательным. Начальное образование он получил в иезуитском колледже. Учителя отбили, казалось, его природное стремление к познанию. Некоторое время он вел разгульный образ жизни, играл в карты. Однако религиозное образование сыграло и свою положительную роль в становлении ученого. Оно только укрепило в молодом Декарте недоверие к тогдашней философии и настроило на поиск своих ответов на вопросы, которые он сам для себя

определял. Позже Декарт сформулировал свой метод познания как дедуктивные (математические) рассуждения над результатами воспроизводимых опытов. Достаточно времени было отдано Декартом военной службе, на которую он поступил, чтобы больше и не понаслышке узнать мир. Сначала он был в революционной Голландии, затем в Германии, где участвовал в недолгой битве за Прагу (Тридцатилетняя война). Затем – еще участие в осаде Ла-Рошели. Все это время он продолжал заниматься философией и математикой, как ее частью, и другими науками – от медицины до метеорологии. Он вел обширную переписку с лучшими учеными Европы. Свободомыслие Декарта стало известно иезуитам, и те обвинили его в ереси. Поэтому Декарт в 1628 году переезжает в Голландию, где проводит 20 лет. В 1634 году он закончил свою первую, очень важную книгу под названием «Мир». Но момент для издания был неудачным – годом ранее инквизиция судила Галилея. Теория Коперника, принятая и в книге Декарта, была официально запрещена. Поэтому Декарт решил не печатать этот труд.

Известная всем «Геометрия» Декарта была опубликована в 1637 году. Вряд ли он испытывал влияние Ферма, его метод сложился задолго до выхода «Геометрии», еще в 1620-х годах. Тем не менее собственно геометрические идеи Декарта и Ферма практически тождественны. Заслуга Декарта в том, что он создал новую алгебру, основанную на понятии отношения геометрических величин. Ферма был подвержен влиянию геометрической алгебры греков. У него и математиков, которым он следовал, можно складывать и вычитать только *однородные величины*, а в коэффициенты обязательно включается указание на их геометрическую природу. При этом простое алгебраическое уравнение раздувается невероятно. Декарт, прежде всего, был философом, основоположником рационализма, утверждающего неограниченную способность человека познавать мир. Отношения, с которыми имеет дело алгебра Декарта, не геометрические пространственные объекты, а умозрительные понятия – «числа», мало того, выраженные «буквами». Его *символика* мало чем отличается от современной. Он следует некоторому набору интуитивно ясных истин и использует определенные *правила* или *методы*.

Именно Декарт впервые ввел координатную систему, которая является прообразом принятой в наши дни, но идеологически несколько отличается. Он далеко не всегда использовал прямоугольную систему координат. Кривая на плоскости рассматривалась относительно некоторой прямой с делениями. Положение точек кривой задавалось с помощью системы параллельных отрезков, перпендикулярных или наклонных к исходной прямой. Декарт не вводил второй координатной оси, не фиксировал направление отсчета от начала координат. Современное представление координатной системы, получившее имя Декарта, сформировалось только в XVIII веке. В ней для каждой из координат обычно вводят взаимно перпендикулярные оси, расстояния на которых градуированы одинаково. Тогда, например, легко вычисляется длина радиус-вектора в трехмерном пространстве (рис. 4.1):

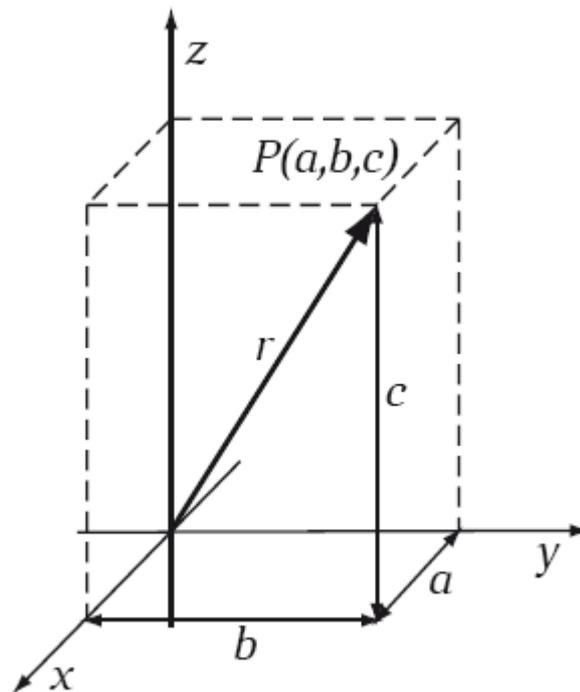


Рис. 4.1. Система координат Декарта

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2 = a^2 + b^2 + c^2.$$

В итоге, появилось ясное понимание, как определить положение тела (точки) как на плоскости, так и в 3-мерном пространстве.

Абсолютные пространство и время

Итак, мы отметили два ключевых понятия: *протяженность* и *длительность*. Возникает вопрос: по отношению к чему производить их измерение? Один из ответов, кажущийся наиболее естественным, состоит в признании существования абсолютного пространства и времени. Тогда и протяженность, и длительность, и абсолютные пространство и время приобретают самостоятельный физический смысл, становятся частью всего физического учения.

Как определял «абсолютное» пространство Ньютон? Он говорил: «Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным».

Поскольку гелиоцентрическая система стала общепризнанной, то в качестве абсолютного он определял пространство, привязанное к центру тяжести Солнечной системы. Абсолютное пространство представлялось фоном для всей Вселенной, являлось состоянием абсолютного покоя. По отношению к нему в принципе можно определить абсолютное движение тела – от одной абсолютно покоящейся точки к другой.

Аналогично абсолютному пространству, Ньютон постулировал существование абсолютного времени. Он писал в своих «Началах»: «Абсолютное частное математическое время само по себе и по своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью». Другими словами, время идет с неизменной скоростью от одного абсолютного момента к следующему, независимо от того что происходит во Вселенной. Или – для любого наблюдателя, находящегося в любом состоянии движения и в любой точке пространства, время представляется ровным, непрерывным, одинаковым (одним и тем же) потоком, определяющим смену событий.

Инерциальная система отсчета. Принцип относительности Галилея

Если в рамках точности измерений времени той эпохи можно было согласиться, что часы с одними и теми же (лучшими) техническими характеристиками идут одинаково у всех возможных наблюдателей, а время, измеренное ими, можно считать абсолютным, то с измерениями абсолютных положений ситуация требовала осмысления. Если *принципиально* возможно определить координаты (положение) какой-либо точки относительно системы, связанной с центром тяжести Солнечной системы, то осуществить это *практически* на обращающейся вокруг Солнца Земле сложно.

Чтобы разобраться с ситуацией, необходимо ввести несколько определений. Под *системой отсчета* обычно понимают строго заданный способ измерения положения и времени. Такие измерения можно осуществлять с помощью системы декартовых координат (трех взаимно перпендикулярных осей) – для измерения положения и расстояний и с помощью часов – для отсчета времени. *Инерциальной системой* называется система отсчета, в которой тела при отсутствии внешних воздействий движутся равномерно и прямолинейно, то есть система, в которой работает первый закон Ньютона. Тогда, как минимум, абсолютное пространство вместе с абсолютным временем может мыслиться как инерциальная система отсчета.

Возникает вопрос: есть ли еще инерциальные системы и как они относятся к абсолютному пространству? Обратимся к так называемым преобразованиям Галилея (термин был введен в 1909 году). Они определяют связь между координатами для двух систем отсчета, движущихся относительно друг друга. Если скорость V направлена вдоль оси x , то координаты x в двух системах для постоянной скорости связаны соотношением: $x' = x + Vt$. Время t , определенное в механике Ньютона как абсолютное, является одинаковым для всех систем отсчета. Для преобразований Галилея скорость движения частицы v' в одной системе определяется как простая сумма скорости этой частицы в другой системе и скорости относительного движения систем V , если скорость частицы и относительная скорость систем имеют одно направление: $v' = v + V$. Например, если в поезде выстрелят в направлении его движения, то для наблюдателя на перроне скорость пули будет определяться как сумма скорости поезда и скорости пули относительно оружия. Если скорости не параллельны, то используется векторная сумма. Таким образом, преобразования Галилея ясно показывают, что любая система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно какой-либо инерциальной системы (скажем, абсолютного пространства), также является инерциальной. Это и есть ответ на вопрос.

Возвратимся к измерениям на Земле. Обычно они производятся в ограниченном пространстве (малом, по сравнению с размерами Земли) и ограничены во времени – малые длительности по сравнению с периодом обращения вокруг Солнца (годом). Такая «лаборатория» с большой степенью точности движется равномерно и прямолинейно относительно абсолютного (по Ньютону) пространства. Если с ней связаны пространственные и временные координатные системы, то она будет инерциальной системой отсчета.

Теперь уместно привести утверждение (постулат), который часто именуется *принципом относительности Галилея*. По Галилею он звучит так: если в двух замкнутых лабораториях, одна из которых движется равномерно и прямолинейно относительно другой, провести одинаковый механический эксперимент, результат будет одинаковым. То есть в двух инерциальных системах законы механики одинаковы. Рассмотрим законы Ньютона в рамках этого принципа. Что касается первого закона, то он справедлив для любой инерциальной системы отсчета просто в силу определения этих систем. Далее, если относительная ско-

рость систем постоянна, то из преобразований Галилея следует также, что ускорение какого-либо тела относительно обеих систем отсчета будет одинаковым (одним и тем же). Тогда, в силу выполнения второго закона Ньютона в любой инерциальной системе отсчета (здесь мы используем принцип), действующие на частицу силы в обеих системах одинаковы. А раз силы одинаковы, то работает и третий закон. Хотя он должен действовать во всех инерциальных системах отсчета и непосредственно, в силу самого принципа.

Итак, в механике Ньютона все инерциальные системы отсчета эквивалентны между собой и одинаково относятся к абсолютному пространству. В рамках каждой из них работают одни те же законы Ньютона, а динамические характеристики – сила и ускорение – одинаковы. А какие физические свойства приписывались самому абсолютному пространству? Ньютон считал, что абсолютное пространство «безразлично» к равномерному прямолинейному движению, но оказывает сопротивление ускорению тел. То есть инерционные свойства тел возникают вследствие воздействия на них абсолютного пространства, на которое, в свою очередь, материальные тела воздействовать не могут. Стоит заметить, что последнее утверждение находится в противоречии с самой философией механики Ньютона. Действительно, это означает, что при взаимодействии с абсолютным пространством не работает третий закон Ньютона, и следовательно, разрушается единая система законов.

Концепция абсолютного пространства и интерпретация свойств инерции вызывали возражения, как современников Ньютона, так и следующих за ними исследователей. Для нас наиболее интересна гипотеза австрийского физика и философа Эрнста Маха (1838–1916). В 1872 году им была высказана идея, что свойство инерции возникает как результат взаимодействия каждого отдельного тела сразу со всеми остальными массами во Вселенной и не имеет ничего общего с абсолютным пространством Ньютона. Идеи Маха в большой степени стимулировали Эйнштейна в исследовании проблем теории тяготения. Именно Эйнштейн назвал эту гипотезу принципом Маха, хотя в реальности она не вошла в структуру общей теории относительности, созданной им позднее. Идея Маха до сих пор не получила ни основательного подтверждения, ни опровержения. Надо сказать, и в наше время она пересматривается после каждого значимого открытия в космологии или в рамках модифицированных теорий гравитации.

Электродинамика. Скорость света

Изменить представление о пространстве и времени решающим образом стало возможным только после успехов в исследовании природы электричества и магнетизма. Пропуская имена ряда замечательных ученых, совершивших открытия в этой области, остановимся на теоретических результатах английского математика и физика шотландского происхождения Джеймса Клерка Максвелла (1831–1879), рис. 4.2. Немного фактов его биографии. Отец Джима был членом адвокатской коллегии, владел поместьем в Южной Шотландии, мать была дочерью судьи Адмиралтейского суда и умерла, когда сыну было 8 лет. Сначала, когда нужно было начинать обучение, приглашали учителей на дом, но хороших найти не удалось. Поэтому отец отправил сына в Эдинбургскую академию.

Затем Джеймс поступает в Эдинбургский университет и успешно заканчивает его, а в 1850 году уезжает в Кембридж, несмотря на недовольство отца. О его напряженном режиме учебы, который, видимо, он сам себе устроил, свидетельствует следующий факт. После получения сообщения об обязательном посещении утреннего богослужения в Кембриджском университете он сказал: «Я в это время только ложусь спать».

Получив степень бакалавра, Максвелл остается в Тринити-колледже работать преподавателем. В этот период он занимается проблемой цветов, геометрией, электричеством. В 1854 году в письме одному из друзей Джеймс заявил о намерении «атаковать электричество». Это удалось – вскоре был опубликован труд «О фарадеевых силовых линиях» – одна из трех самых крупных работ

Максвелла. Главный труд этого периода жизни ученого – создание теории цветов. Он экспериментальным путем показал, как смешиваются цвета. *Эти исследования впоследствии легли в основу цветной фотографии.* Спустя сто лет компания «Кодак» доказала, что Максвеллу тогда просто повезло – его способом получить зеленое и красное изображения было нельзя, эти цвета образовались случайно. Тем не менее принципы все же были правильными.

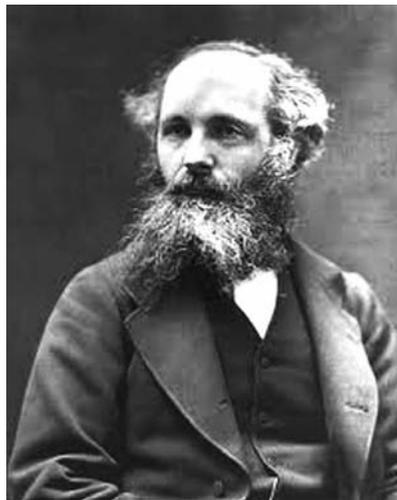


Рис. 4.2. Джеймс Максвелл

В последующие годы он занимается расчетом движения колец Сатурна и издает трактат «Об устойчивости движения колец Сатурна». Затем разрабатывает кинетическую теорию газов. Уже после этого Максвелл сосредотачивается на исследовании электромагнетизма. Публикуются работы «О физических силовых линиях» и «Динамическая теория электромагнитного поля». С этого времени и до конца своей жизни ученый работает над пробле-

мами электрических измерений. В 1873 году выходит главный труд всей его жизни – двухтомник «Трактат по электричеству и магнетизму».²

Одно из основных открытий состоит в том, что была установлена взаимосвязь электричества и магнетизма. Основываясь на результатах и идеях предшественников, Максвелл использовал и развил понятие *поля*. Согласно его теории каждая заряженная частица окружена полем – невидимым ореолом. Поле обладает силовой характеристикой – напряженностью – и тем самым воздействует на заряженные частицы, находящиеся в нем. Таким образом, одна заряженная частица через свое поле действует с некоторой силой на другие заряженные частицы.

Конечно, такие взгляды на природу взаимодействия отличаются от корпускулярной модели Декарта. Они отличаются и от точки зрения Ньютона на концепцию тяготения. Ньютон считал, что притяжение определяется силой *прямого* взаимодействия между разделенными пространством массами.

Хотя в нашем понимании это остается вопросом интерпретации. Силе Ньютона можно точно так же приписать потенциал, который представляет собой не что иное как поле. Разница будет в том, что, в отличие от электромагнитного взаимодействия, распространяющегося со скоростью света, гравитационное взаимодействие по Ньютону должно распространяться мгновенно (с бесконечной скоростью).

Самым интересным из результатов Максвелла для нас является следующее. Из уравнений электромагнитного поля следует, что движение заряженных частиц должно порождать электромагнитные волны, распространяющиеся в пространстве со скоростью света $c = 300\,000$ км/с. Эти волны могут иметь любую длину – расстояние между двумя соседними гребнями волны.

По длине электромагнитные волны разделяются на разные диапазоны. Свет – это электромагнитная волна с довольно короткой длиной волны, у ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения длина волны еще короче, у инфракрасного, микроволнового и радиоизлучения – длиннее. Сегодня мы имеем возможность регистрировать электромагнитные волны длиной от 10^{-12} м до многих километров.

² Постановлением Международного астрономического союза, возвышенностям на Венере решено давать имена богинь, а низменностям и другим понижениям рельефа (каньонам и бороздам) – имена прочих мифологических женских персонажей или просто женские имена. Из этого правила существует три исключения: области «Альфа» и «Бета» и «Горы Максвелла».

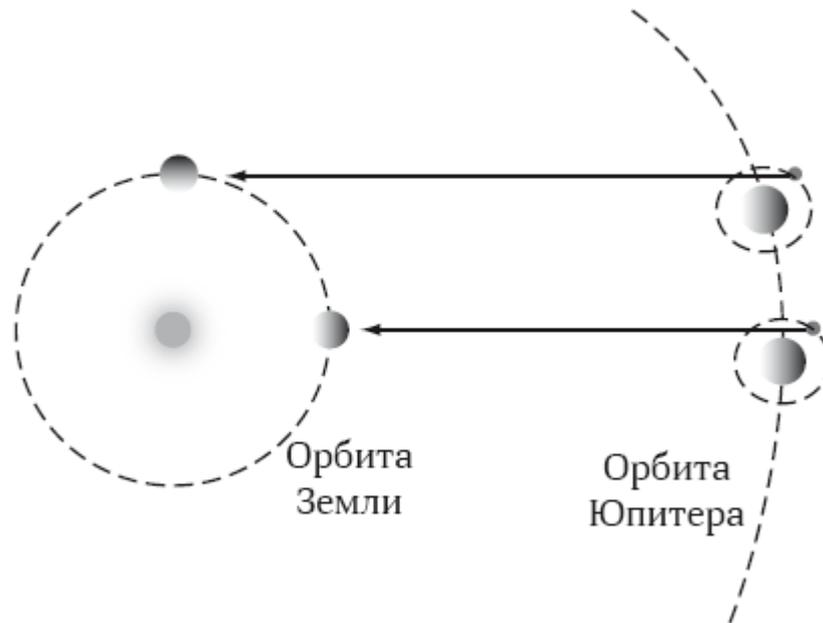


Рис. 4.3. Схема измерений Рёмера

Впервые скорость света была определена датским астрономом Оле Рёмером (1644–1710) в 1676 году. Он анализировал нерегулярность видимых затмений спутника Юпитера Ио.

Было обнаружено, что выход Ио из тени Юпитера наблюдается со все большим запаздыванием по мере удаления Земли от орбиты Юпитера. Рёмер связал это с тем, что свет имеет конечную скорость, и поэтому для его достижения Земли каждый раз требуется разное время (рис. 4.3). А тогда, зная разность расстояний для разных моментов появления Ио и наблюдаемое время запаздывания, можно определить скорость преодоления светом этого дополнительного расстояния. Скорость по данным Рёмера оказалась равной 215 000 км/с. Вполне приличная по тем временам точность.

Эфир

Тонкий по природе эфир ни с чем не смешивается, хотя и проникает всюду.

Кришна «Бхагавадгита как она есть»

Наш повседневный опыт, а также опыт научных достижений XIX века, не допускает распространения каких-либо колебаний без среды. То, что мы видим чуть не каждый день – это волны на поверхности воды. Звуковые волны представляют собой распространение уплотнений и разрежений в воздухе. Теория электромагнетизма не включает такого понятия, как некая специальная среда, в которой распространяются электромагнитные волны. Уравнения вполне справедливы и для вакуума. Поэтому Максвелл вернулся к старой идее о существовании эфира, заполняющего пространство. Именно эфиру отводилась роль носителя электромагнитных волн. Система отсчета, связанная с неподвижным эфиром, отождествлялась с абсолютным пространством, идея которого, в свою очередь, получила новую неожиданную поддержку.

Естественно, не заставили себя ждать попытки найти экспериментальное подтверждение существования эфира. Если таковой существует, то Земля, двигаясь сквозь него со скоростью 30 км/с (скорость движения по орбите вокруг Солнца), должна испытывать воздействие эфирного ветра. Как обнаружить это воздействие? Обычно приводят в пример эксперимент Майкельсона – Морли. На рис. 4.4 приведена его схема.

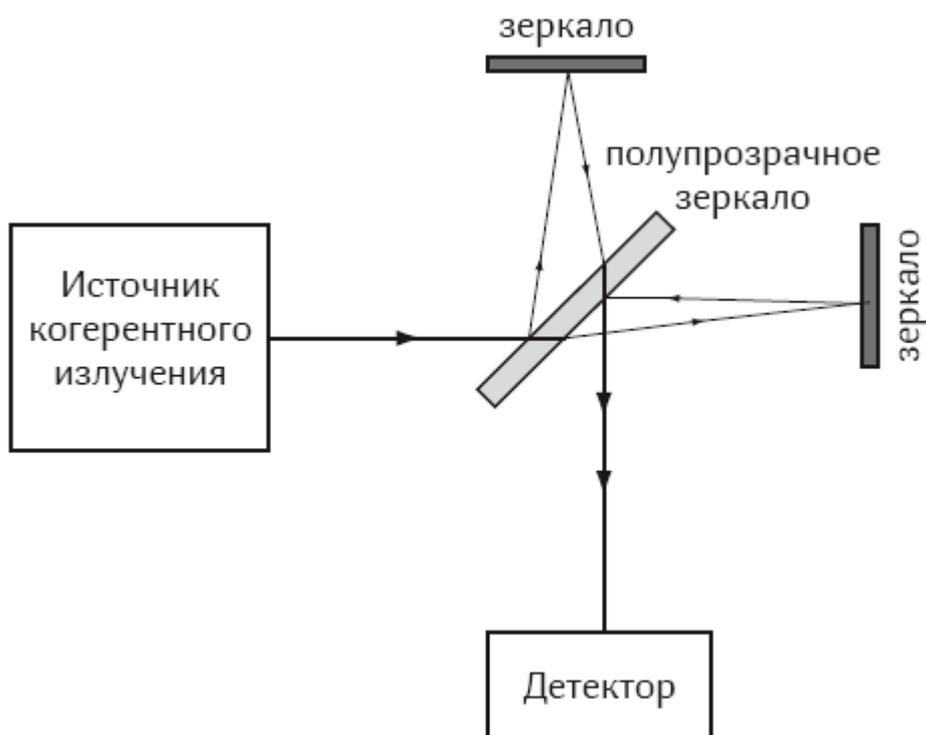


Рис. 4.4. Схема эксперимента Майкельсона-Морли

Предположим, что направление луча, испущенного источником, соответствует движению Земли по орбите, тогда в этом направлении должен «дуть» эфирный ветер. Свет из источника разделяется пластиной на луч, который отражается в направлении перпендикулярном движению, и луч, направление которого не изменилось. Затем лучи отражаются от

зеркал и в конечном итоге встречаются на детекторе. Геометрические пути лучей одинаковы. Как рассчитать распространение луча? Если свет распространяется в среде (эфире), то в поперечном направлении нужно учитывать *только* скорость света в эфире, а в продольном направлении, следуя преобразованиям Галилея, скорости «ветра» и света нужно складывать, а после отражения – вычитать. Тогда окажется, что луч в направлении движения Земли запоздает, и это должно быть зарегистрировано на детекторе.

Впервые эксперимент был поставлен американским физиком Альбертом Майкельсоном (1852–1931) в 1881 году и повторен им на усовершенствованной установке совместно с Эдвардом Морли (1838–1923). Точность эксперимента в несколько раз превосходила ожидаемый результат, но эффект не был зарегистрирован. Многократные попытки в последующие десятилетия на усовершенствованных приборах так и не привели к успеху. Зарегистрировать наличие эфира не удалось.

Итак, пришлось смириться с тем, что эксперимент Майкельсона и Морли не в состоянии выявить факт движения Земли относительно эфира. Однако теоретические попытки спасти концепцию эфира продолжались.

Голландский физик Хендрик Лоренц (1853–1928) и ирландский ученый Джордж Фицджеральд (1851–1901) независимо друг от друга попытались объяснить, почему не удалось зарегистрировать эфир. Вспомним, что для расчета в опыте Майкельсона – Морли существенным образом используются преобразования Галилея, которые по сути своей очень просты. Теперь же выдвигалась гипотеза, что в результате движения сквозь эфир уменьшается длина вдоль движения и замедляется ход часов. Эти преобразования устраиваются как раз так, что движение относительно эфира остается незамеченным. Подводя итог на тот период, замечательный французский математик Жюль Анри Пуанкаре (1854–1912) отмечал, что если преобразования Лоренца (как их стали называть с его подачи) верны, то эфир, если он и существует, все равно не доступен наблюдению. А поскольку вопрос о существовании или отсутствии эфира не удастся решить, то остается рассматривать только относительные (не абсолютные) движения.

Но если сохранить наличие эфира в принципе, то возникает другая проблема. В силу принципа относительности Галилея законы механики Ньютона имеют один и тот же вид и верны во всех инерциальных системах отсчета. Для электродинамики Максвелла это правило не выполняется, поскольку ее уравнения существенным образом содержат скорость света. Действительно, если использовать преобразования Галилея, то скорость света должна быть разной в разных инерциальных системах отсчета, а это недопустимо для уравнений Максвелла. С другой стороны, они оказались инвариантными относительно преобразований Лоренца!

Таким образом, на рубеже XIX и XX веков возникла критическая ситуация в понимании места механики и электродинамики в общей физической картине мира. Теоретические и опытные данные вступили в противоречие. Эта ситуация требовала разрешения.

Глава 5

Специальная теория относительности

Установив исходные факты, мы начнем строить, основываясь на них, нашу теорию и попытаемся определить, какие моменты в данном деле можно считать узловыми.

Конан Дойль «Записки Шерлока Холмса»

Принципы построения

Попытки решить возникшие проблемы чрезвычайно активными были в начале XX века. В результате в 1905 году была окончательно сформулирована специальная теория относительности (далее будем обозначать ее СТО) и представлена одновременно в работах Альберта Эйнштейна (1879–1955), и Анри Пуанкаре. Позднее теория была представлена немецким математиком и физиком Германом Минковским (1864–1909) в четырехмерном формализме, объединяющем пространство и время. До сих пор идут споры – и кто, и что, и кто раньше, а кто позже. В конце главы мы кратко расскажем о взаимоотношениях между учеными той великой эпохи. Вне всяких сомнений, важный вклад внес каждый из исследователей.

Разные авторы по-разному приводят и формулируют принципы (постулаты), на основании которых построена СТО. Но можно сказать, что существуют два основных принципа, которые обычно представлены явно.

Первый из них – это *принцип относительности*, согласно которому во всех инерциальных системах отсчета действуют одни и те же физические законы. Принцип относительности, прежде всего, устраняет различия в проявлениях законов механики и электродинамики при переходе в другие инерциальные системы. Он также исключает идею о неподвижном эфире абсолютного пространства. Часто этот принцип называют принципом относительности Пуанкаре – Эйнштейна, который, конечно, является расширением принципа относительности Галилея на все физические явления.

Второй принцип постулирует *постоянство (неизменность) скорости света во всех инерциальных системах отсчета*. Обычно в качестве постулата выбирается некая аксиома, то есть очевидное утверждение, не требующее доказательств. Второй же принцип выглядит скорее парадоксальным, чем очевидным. На первый взгляд он плохо сочетается с принципом относительности. Поэтому можно только восхищаться смелостью и гениальностью создателей СТО.

Остальные принципы иногда озвучиваются явно, иногда скрыты в процессе построений. Они частично перекрываются двумя, отмеченными выше. Как минимум, нужно упомянуть, что *все построения (измерение расстояний и отсчет времени) ведутся с помощью световых (электромагнитных) сигналов*.

Была построена теория, удовлетворяющая этим принципам. Оказалось, что преобразования Галилея нужно заменить преобразованиями Лоренца. Их использование приводит к преобразованиям не только пространственных координат, но и времени, все перемешивая. Таким образом, становится естественным рассматривать пространство и время не по отдельности, а как составляющие единой «арены», на которой рассматриваются физические взаимодействия, – пространственно-временного континуума, или просто пространства-времени.

Напомним, что уравнения электродинамики неизменны (инвариантны) относительно преобразований Лоренца (иначе: *лоренц-инвариантны*). Это и означает, что законы электромагнетизма одни и те же во всех инерциальных системах отсчета. Но как быть с законами механики, которые инвариантны относительно преобразований Галилея, но не Лоренца? А эти законы пришлось подправить для случая скоростей близких к скорости света, и их называют *релятивистскими* законами механики. При малых скоростях тел (значительно меньших световых) релятивистские законы переходят в законы механики Ньютона.

Эффекты СТО

Названия созвездий вы можете и забыть, но людей, которые не преклоняются перед чудесами природы, я считаю недостойными уважения.

Сэмюэль Майкельсон (отец Альберта Майкельсона)

Теперь обсудим наиболее важные и интересные эффекты специальной теории относительности. Многие из них оказались неожиданными для бытового восприятия. Но нет никаких противоречий, просто нам в повседневной жизни не доводится перемещаться с околосветовыми скоростями, а именно тогда эти эффекты становятся наблюдаемыми.

Относительное сокращение длины. Как отмечали Лоренц и Фицджеральд, движение любого объекта влияет на измеренную величину его длины. Представим космический корабль, который пронесется мимо нас с большой скоростью. Для нас его размеры уменьшатся. Чем ближе скорость корабля к скорости света, тем более заметным становится этот эффект. При приближении его скорости к световой, сжатие будет стремиться к предельному – нулевым размерам в направлении движения. Что

же касается пилота космического корабля, то он не заметит никакого сокращения корабля, зато мы для него сожмемся. На рис. 5.1 проиллюстрировано релятивистское сокращение длины, где штрихованная система отсчета движется вдоль оси x .

Относительное замедление времени. Любой наблюдатель, сравнивая ход своих часов и часов в движущейся относительно него системе отсчета, обнаружит, что последние идут медленнее. Поясним это. Пусть пилот корабля и земной лаборант имеют абсолютно одинаковые часы. Лаборант фиксирует и сопоставляет «тики» своих часов и часов на корабле. Окажется, что для него «космические тики» происходят реже, чем земные. А для пилота, наоборот, земные часы идут медленнее. Этот эффект также становится все более заметным по мере приближения скорости ракеты к скорости света и становится предельным, когда скорость становится околосветовой. Эффект замедления времени касается буквально всего, включая атомные процессы и биологические ритмы, иначе нарушился бы принцип относительности.

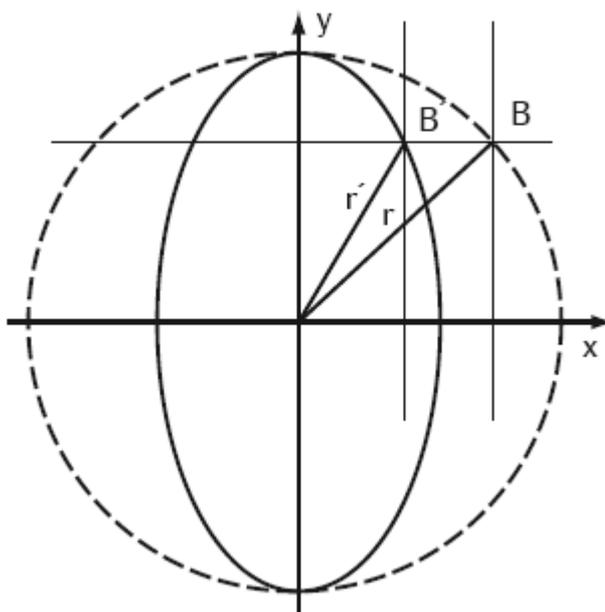


Рис. 5.1. Релятивистское сокращение длины

Приведем в качестве иллюстрации пример, подтверждающий как эффект замедления времени, так и эффект сокращения расстояний. Космические лучи – элементарные частицы, попадающие на Землю из космоса, сталкиваются с атомами атмосферы. В результате на высоте около 10 км рождаются новые частицы – мюоны. Время жизни мюонов очень короткое – они распадаются в среднем за 0,000 002 с в собственной системе отсчета. Если бы не было замедления времени, то они никак не смогли бы пролететь расстояние более 1 км. Но, преодолев 10 км, эти частицы долетают до поверхности Земли, где их регулярно регистрируют. Причина видится только в относительном увеличении времени жизни мюонов для земного наблюдателя. Кстати, почему тогда с точки зрения наблюдателя в системе покоя мюона он достигает Земли, ведь для него его часы идут нормально? Здесь нужно вспомнить о сокращении расстояний. Для такого наблюдателя 10 км до Земли значительно сократятся, и он успеет достичь ее поверхности за короткое время жизни этой элементарной частицы.

Сложение скоростей. Теперь вернемся ко второму принципу – постоянству скорости света в любой инерциальной системе отсчета. Сразу очевидно, что он определяет сложение скоростей, отличное от того, которое следует из преобразований Галилея. Действительно, движение источника света со скоростью V не должно влиять на скорость света c , который он испускает. Это выглядит парадоксально! Однако преобразования Лоренца именно к такому сложению скоростей и ведут. В соответствии с ними, сложение двух досветовых скоростей дает величину, меньшую их простой суммы, а если одна из скоростей – c , то сложение тоже дает c !

Многие эффекты СТО противоречат повседневному опыту (интуиции), кажутся невероятными и даже невозможными. Это вызывает сомнения в основах теории у многих людей, интересующихся наукой. Особое неприятие вызывает второй принцип – сложение скоростей. По мнению любителей, скорость света должна складываться со скоростью источника, как следовало бы из преобразований Галилея (баллистическая гипотеза). Неизменность скорости света давно подтверждена напрямую при сравнении света, испускаемого двумя экваториальными краями вращающегося Солнца. Однако сторонники баллистической гипотезы возражают тем, что перед сравнением лучей свет пропускаться через оптику телескопа, а переизлучение преломляющей средой как бы приводит к уравниванию скоростей двух пучков.

Чтобы опровергнуть и эти возражения недавно (результаты опубликованы в 2011 году) в центре синхротронного излучения Курчатовского института был произведен опыт. Исследовали излучение сгустка электронов, разогнанного почти до скорости света и запущенного по искривленной траектории. В этом случае есть большое ускорение, а именно тогда происходит эффективное излучение. По баллистической гипотезе скорость света должна быть близка к двойной световой – $2c$. Эффект огромный, его нельзя не заметить. Провели два типа экспериментов. Для первого – свет разделили на два пучка: один пустили напрямую, а второй – через стеклянную пластину, чтобы установить, изменяет ли переизлучение скорость света. Затем оба пучка сравнили. Разницы в скорости не было найдено! Во втором эксперименте скорость синхротронного излучения измерили напрямую. Как и ожидалось, она с высокой точностью оказалась равной своему обычному значению – c , никак не $2c$. Можно сказать, что это еще одна непосредственная проверка второго принципа.

Пространство Минковского

Тогда нарушается закон причинно-следственной связи, закон, от которого я совершенно не собирался отказываться из-за каких-то паршивых попугаев, да еще дохлых вдобавок...

Аркадий Стругацкий, Борис Стругацкий «Понедельник начинается в субботу»

Как мы уже отметили, в СТО пространство и время нужно рассматривать как единый четырехмерный континуум – его называют пространством Минковского. Тогда непривычные (для бытового восприятия) свойства теории объяснять и интерпретировать значительно легче. Пространство Минковского представляют в виде диаграммы с временной и пространственными осями. На временной оси в качестве отсчета используется время, умноженное на скорость света – ct , это упрощает анализ, поскольку все данные имеют одинаковую размерность. Пространственные координаты, также для простоты, часто представлены только координатой x , хотя, конечно, подразумеваются все три. Кроме того, в отличие от общепринятых диаграмм, здесь роль функции играет время, а аргумента – пространственные координаты.

Диаграмма пространства Минковского, точно так же, как обычные диаграммы, используется для отображения в виде графика пути, который проходит материальная частица с течением времени. Если частица движется равномерно и прямолинейно – ее путь будет прямой линией, а котангенс угла наклона к оси x равен скорости частицы в долях скорости света. На рис. 5.2 изображен путь такой частицы от начала координат до точки **A**. Прямые, направленные под углом 45° , отображают пути фотонов, движущихся со скоростью света как через начало координат, так и через точку **A** в разные стороны. Позже мы определим такие «фигуры» как световые конусы. Движение частицы от точки **A** возможно только внутри конуса, поскольку ее скорость не может превышать световую.

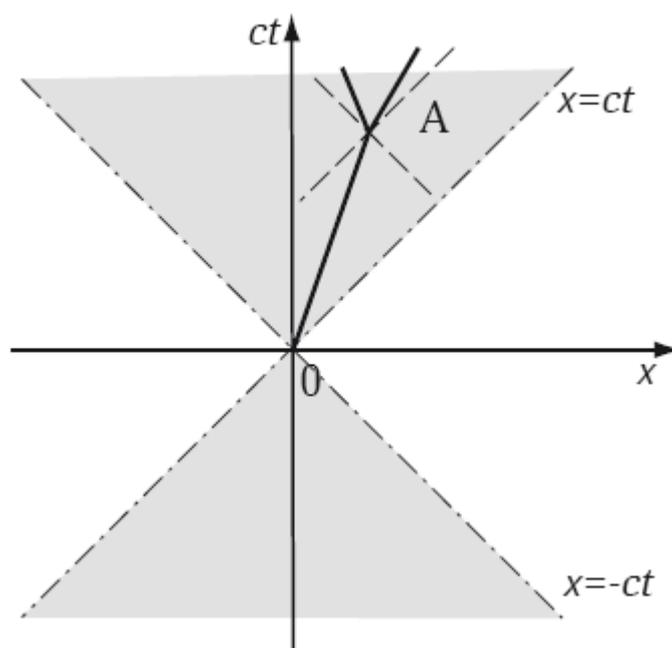


Рис. 5.2. Путь частицы на диаграмме пространство-время

Если частица движется произвольно, то ее путь будет представлен кривой, а котангенс угла наклона касательной к оси x в какой-либо точке будет равен скорости частицы в момент, соответствующий этой точке.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.