

УДК 52  
ББК 22.6  
П30

**Петров, Александр Николаевич.**

П30 Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор / А. Н. Петров. — 318 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-89818-120-8

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.

УДК 52  
ББК 22.6

*На обложке: Гравюра из трактата Вильяма Квингема  
«Cosmographical Glasse», 1559 г.*

ISBN 978-5-89818-120-8

© Переиздание. ДМК Пресс, 2022  
© Оформление. Век 2, 2013

---

# Содержание

Предисловие.....	7
Глава 1. Представления о тяготении в древнем мире.....	10
Древние о Вселенной до Аристотеля.....	10
Аристотель.....	12
Птолемей.....	19
Глава 2. Новые представления о Вселенной и начало новой физики.....	24
Гелиоцентрическая система Коперника.....	24
Астроном-наблюдатель Тихо Браге.....	27
Галилей.....	29
Законы эллиптического движения Кеплера.....	36
Попытки понять природу гравитации.....	40
Глава 3. Закон всемирного тяготения.....	45
Исаак Ньютон.....	45
Механика Ньютона.....	51
Теория гравитации Ньютона.....	52
Корпускулярная теория гравитации.....	59
Глава 4. От механики Ньютона до электродинамики Максвелла.....	62
Протяженность и длительность. Методы измерений.....	63
Абсолютные пространство и время.....	67
Инерциальная система отсчета. Принцип относительности Галилея.....	68
Электродинамика. Скорость света.....	71
Эфир.....	75

Глава 5. Специальная теория относительности .....	78
Принципы построения.....	78
Эффекты СТО .....	80
Пространство Минковского.....	83
Еще о свойствах СТО .....	94
Парадокс близнецов.....	97
Пуанкаре и Эйнштейн.....	99
Глава 6. Общая теория относительности .....	108
Предпосылки построения ОТО.....	108
Первые попытки построения релятивистской теории гравитации .....	110
Принципы построения ОТО .....	112
Построение ОТО.....	119
Об Эйнштейне .....	126
Глава 7. Наблюдательные подтверждения ОТО .....	130
Решение Шварцшильда .....	130
Классические тесты теории Эйнштейна.....	132
Эффект Шапиро.....	140
Гравитационные линзы.....	141
Глава 8. Черные дыры.....	146
Темные звезды Мичелла-Лапласа .....	146
Снова решение Шварцшильда .....	147
Горизонт событий и истинная сингулярность.....	151
Разнообразие черных дыр.....	159
Черные дыры и релятивистские звезды во Вселенной.....	160
Кротовые норы .....	171
Глава 9. Космология.....	176
Бесконечная в пространстве и времени стационарная Вселенная.....	176
Расширяющаяся Вселенная .....	180
Большой взрыв .....	187
Новые проблемы космологии .....	191
Инфляция .....	201
Современное ускоренное расширение .....	203
Модель горячей Вселенной.....	208
Глава 10. Гравитационные волны.....	215
Электромагнитные волны.....	215
Описание гравитационных волн.....	218

Генерация гравитационного излучения.....	221
Источники гравитационного излучения.....	225
Детектирование гравитационных волн.....	233
Скорость распространения гравитационных взаимодействий...	242
<b>Глава 11. Энергия и другие</b>	
сохраняющиеся величины в ОТО.....	247
Развитие представлений о законах сохранения .....	247
Законы сохранения в СТО .....	251
Нелокализуемость сохраняющихся величин в ОТО.....	255
Эйнштейн о проблеме определения энергии в ОТО .....	258
Локализация сохраняющихся величин в ОТО.....	259
Энергия замкнутой Вселенной. Рождение из «ничего».....	263
<b>Глава 12. Перспективы развития теории гравитации.....</b>	<b>266</b>
Теории гравитации альтернативные ОТО .....	266
Проверка ОТО на масштабах планетных систем.....	269
Необходимость модификации ОТО.....	271
Теория гравитации Хоржавы.....	273
Многомерные модели.....	282
Черные дыры в многомерной ОТО .....	288
Биметрические теории и теории с массивным гравитоном.....	290
Закон Ньютона.....	293
Что даст дальнейшее повышение точности наблюдений.....	300
<b>Дополнения .....</b>	<b>302</b>
1. Скалярные, векторные и тензорные поля.....	302
2. Материальные источники.....	303
3. Построение уравнений Эйнштейна.....	304
4. Решение уравнений Эйнштейна.....	305
5. Координаты Леметра.....	307
6. Система отсчета ускоренных наблюдателей .....	309
7. Однородность и изотропия Вселенной .....	312
8. Модели Фридмана и критическая плотность.....	315

---

## 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 эффектность 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.

## 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 каза-



лось 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, обращенной вокруг Земли один раз в сутки, закреплены звезды. Для объяснения движения каждого другого тела по небо-

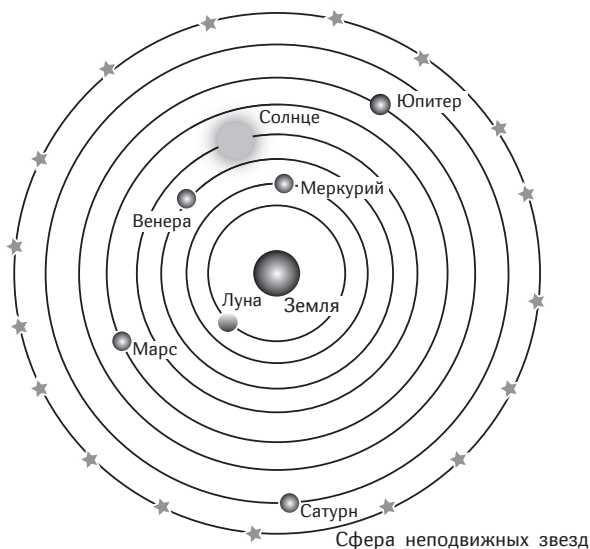


Рис. 1.1. Геоцентрическая схема мира Евдокса

склону 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.).

## Аристотель

Аристотель Стагирский (по месту рождения), рис. 1.2, один из величайших, если не самый значимый философ античной Греции. Его отец Никомах и мать Фестидя 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. После смерти Платона Аристотель был приглашен македонским царем Филиппом для воспитания сына – 13-летнего Александра, будущего великого полководца.

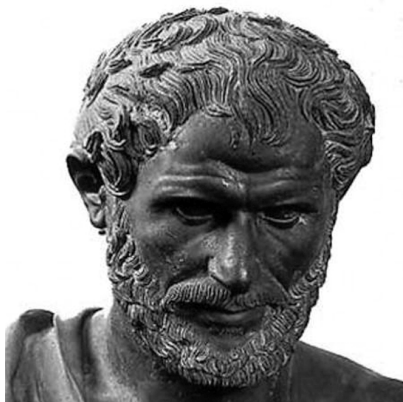


Рис. 1.2. Аристотель

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 – хрустала. 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 некоей 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

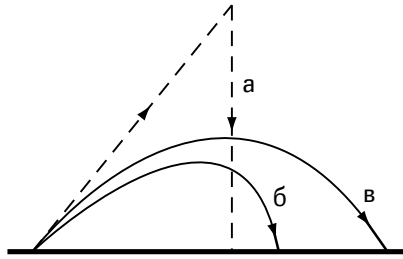
тел, которыми могут быть как тяжесть («гравитация», от лат. *gravitas* — тяжесть), так и легкость («левитация»). Каждое из этих свойств вызывает перемещения тел вниз или вверх.

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.

Подведем некоторый итог. С одной стороны, с современной позитивистской точки зрения представления

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



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 служить 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.

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

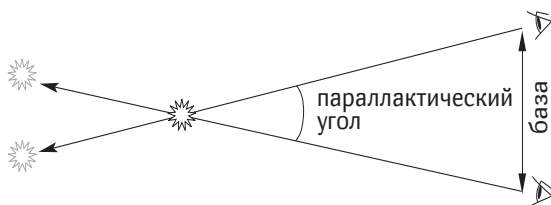


Рис. 1.4. Схема параллакса



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.

Для достижения соответствия расчетов и наблюдений Птолемей, следуя воззрениям Гиппарха, фактически от-



казался 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

Рис. 1.5. Птолемей

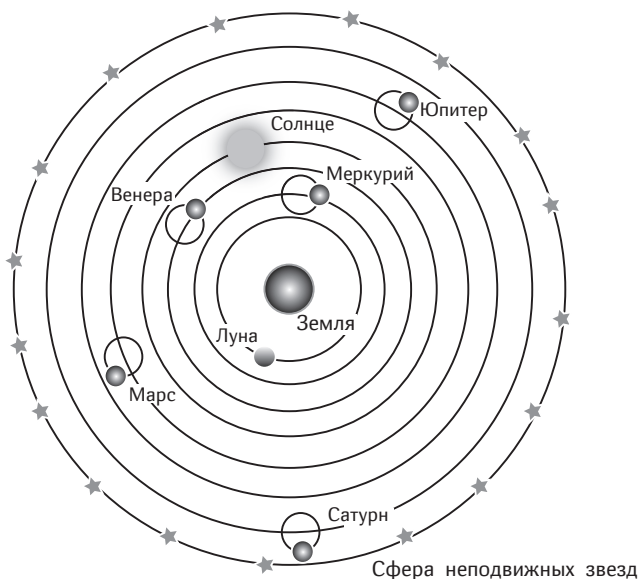


Рис. 1.6. Эпициклы Птолемея

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.

Но все эти усовершенствования все равно не давали необходимого соответствия с наблюдениями. В своем основном труде «Альмагест» Птолемей упоминает Апол-

лония 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.

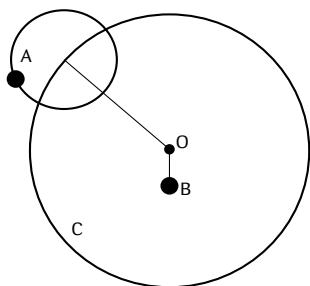


Рис. 1.7. Эксцентр Птолемея

Однако, как сказали бы сейчас, эти модели были скорее умозрительными, чем научными, 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.

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.