УДК 523
ББК 22.65
С60

Авторский коллектив:
А. А. Бережной, В. В. Бусарев, Л. В. Ксанфомалити,
В. Г. Сурдин, К. В. Холшевников

С60 **Солнечная система** / ред.-сост. В. Г. Сурдин. — Изд. 4-е, исправленное и дополненное. — М.: АСТ, 2026. — 464 с. — (Понятная астрофизика).

ISBN 978-5-17-187736-1

Данная книга содержит обзор текущего состояния изучения планет и малых тел Солнечной системы. Обсуждаются основные результаты, полученные в наземной и космической планетной астрономии. Приведены современные данные о планетах, их спутниках, кометах, астероидах и метеоритах.

Изложение материала ориентировано в основном на студентов младших курсов естественно-научных факультетов университетов и специалистов смежных областей науки. Особый интерес книга представляет для любителей астрономии.

УДК 523
ББК 22.65

ISBN 978-5-17-187736-1

© ООО «Издательство АСТ», 2026

Глава 1

Эпоха первых межпланетных экспедиций

В. Г. Сурдин

Созерцать красоту и гармонию Вселенной, хоть в какой-то степени их постигая, — одна из основных человеческих способностей, доставляющих ему наивысшее удовольствие.

Ганс Селье, канадский биолог

Мы живем в эпоху великих открытий в Солнечной системе. Далеко не все жители Земли взволнованы этим фактом. Не станем их за это упрекать. Эпоха великих географических открытий — 500 лет назад — тоже протекала без особого общественного интереса, но спустя столетия ее плодами пользуются все.

Эта книга посвящена Солнечной системе — природе ее планет, спутников и малых тел. Хотя эта книга написана астрономами, мы хорошо понимаем, что изучение Солнечной системы уже далеко вышло за рамки классической науки о небесных телах. От разглядывания в телескопы невзрачных туманных пятнышек, чем занимались астрономы прошлых эпох, ученые перешли к прямому зондированию Луны и планет, астероидов и комет. Авторами новейших открытий на иных планетах теперь являются не только астрономы, но и специалисты по космической технике, а также географы и геологи, которых уже с полным правом можно назвать планетологами. И прямо сейчас, на наших глазах, появляется новая специальность — экзопланетолог, специалист по планетным системам иных звезд.

Впрочем, на фоне этого «головокружения от успехов» важно понимать: стремительное расширение географических границ не означает, что наша планета — Земля — уже достаточно исследована. Напротив, ее детальные исследования сейчас в самом разгаре. Фактически лишь недавно благодаря спутникам люди увидели всю поверхность Земли. А что лежит под ней? Что скрывается в глубинах океанов? Как выглядят материки под ледяными куполами Гренландии

и Антарктиды? Что происходит глубоко в земных недрах? Как ведет себя геомагнитное поле? В чем причина глобальных перемен климата и биосферных катастроф? Наконец, как сформировалась наша уникальная планета и какая роль в этом принадлежит ее гигантскому спутнику — Луне?

Многое в отношении планеты Земля для нас до сих пор загадка. Ответы на многие вопросы могут оказаться жизненно важными для нашей цивилизации.

Приведем характеристики планеты Земля.

Большая полуось орбиты (ср. расстояние от Солнца)	1 а. е. = $1{,}496 \cdot 10^{11}$ м
Сидерический период обращения («звездный год»)	365,2564 сут
Тропический период обращения («год»)	365,2422 сут = $3{,}1557 \cdot 10^{7}$ с
Сидерический период вращения («звездные сутки»)	0,99727 сут = 23 ч 56 мин 04 с
Средние солнечные сутки («сутки»)	24 ч
Эксцентриситет орбиты	0,0167
Средняя орбитальная скорость	29,8 км/с
Наклон экватора к орбите	23° 26′
Масса, $M_{\oplus}$	$5{,}9722 \cdot 10^{24}$ кг
Средняя плотность	5,51 г/см^3
Экваториальный радиус, R_e	6378,160 км
Полярный радиус, R_p	6356,777 км
Средний радиус, $R_{\oplus}$	6371,032 км
Сжатие, $(R_e - R_p)/R_e$	1/298
Ускорение притяжения к Земле на экваторе	9,80665 м/с^2 (на ур. моря)
Ускорение свободного падения на экваторе	9,78033 м/с^2 (на ур. моря)
Скорость ускользания (2-я космическая)	11,19 км/с
Скорость вращения на экваторе	465,11 м/с
Безразмерный момент инерции (в единицах MR^2)	0,3308
Радиус внешнего (жидкого) ядра	3480 км
Средняя плотность внешнего ядра	10 г/см^3
Радиус внутреннего (твердого) ядра	1270 км
Средняя плотность внутреннего ядра	13 г/см^3
Сферическое альбедо (по Бонду)	0,306
Геометрическое альбедо (визуальное)	0,367
Поток солнечного излучения вне атмосферы	1369 Вт/м^2
Полное поглощаемое излучение	$1{,}2 \cdot 10^{17}$ Вт
Поток тепла из недр	0,05 Вт/м^2

Эффективная температура	247 K = −26 °C
Средняя температура воздуха у поверхности	287 K = 14 °C
Плотность воздуха у поверхности	1,22 кг/м^3
Давление у поверхности	1,014 бар
Масса океана	$1{,}4 \cdot 10^{21}$ кг
Масса атмосферы	$5{,}2 \cdot 10^{18}$ кг
Состав атмосферы (% объема)	N_2 (78), O_2 (21), Ar (0,9), CO_2 (0,03)
Магнитный момент геоцентрического диполя	0,299 Гс $\cdot R_\oplus^3$ (2005 г.)
Наклон оси дипольного компонента к оси вращения	10,3° (2005 г.)
Количество спутников	1 (Луна)

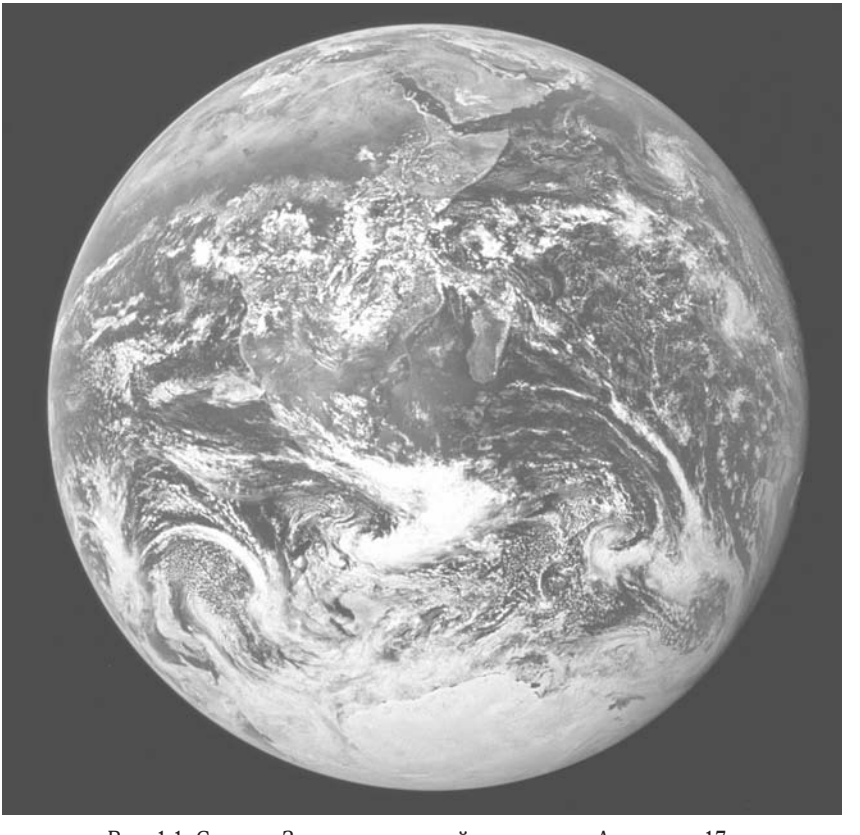

Рис. 1.1. Снимок Земли, сделанный экипажем «Аполлона-17».

В области исследования планет XX век принес нам скорее спортивно-технические достижения, чем научные: большинство планет было «достигнуто», их эффектные изображения были переданы на Землю и растиражированы, что само по себе замечательно, но систематических детальных исследований не проводилось. Полученные данные в большей степени поставили новые вопросы, чем ответили на старые. Но в последнее десятилетие, фактически — уже XXI века, за планеты взялись всерьез: у Юпитера и Сатурна появились долговременные орбитальные зонды («Галилео» и «Кассини»), начались посадки на спутники планет (пока это лишь Титан, но лиха беда начало), аппараты работают у Венеры, достигли Меркурия и Плутона, а про Марс и говорить нечего — рядом с ним и на его поверхности постоянно действует целая научная армада. Из разряда политико-идеологических межпланетные полеты перешли в разряд чисто научных. О них стали меньше писать и говорить, но они начали приносить значительно больший научный урожай.

При этом исследования космоса и Земли всегда происходили и сейчас происходят параллельно, сопутствуя и способствуя друг другу. Могу напомнить, что XX век начинался с покорения полюсов Земли, что лишь в середине века были достигнуты самая высокая и самая глубокая точки земной поверхности и что лишь к концу века была более или менее изучена вся толща атмосферы нашей планеты. Можно сказать, что именно в конце XX века эпоха великих географических открытий начала плавно перетекать в эпоху грандиозных межпланетных экспедиций. Напомню, что научное изучение Антарктиды началось во время Международного геофизического года (1955–1958), тогда же, когда были запущены первые искусственные спутники Земли.

На рис. 1.2 мы можем видеть обратную сторону Луны. Многие астрономы прошедших столетий готовы были отдать жизнь, чтобы увидеть это изображение. Космическая эра принесла нам множество прекрасных изображений далеких планет, но этот *первый* космический снимок *ближайшего* небесного тела навсегда останется самым ценным. И не потому что он был первым, хотя и это важно. Ценность этого снимка в его незаменимости: из всего, что нам хотелось бы увидеть в Солнечной системе, в принципе невозможно увидеть, не покинув Землю, только обратную сторону Луны. Зонд фотографировал Луну обычными (для той эпохи) фотоаппаратами с длиннофокусным и короткофокусным объективами, проявлял пленку на борту и с помощью фототелевизионной системы передавал полученные

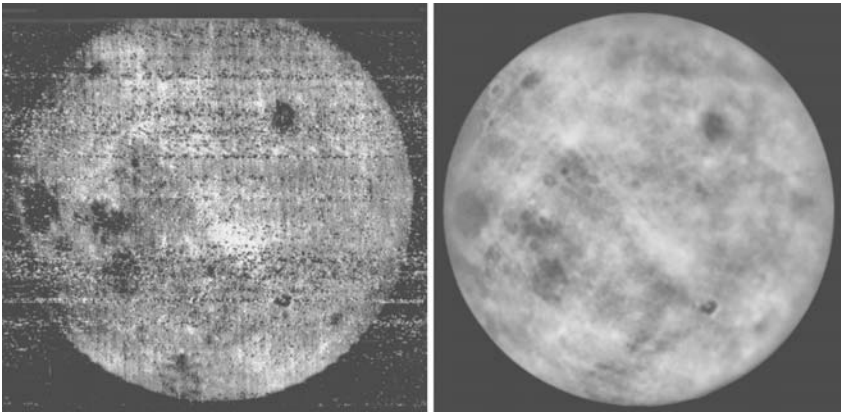

Рис. 1.2. Фотография обратной стороны Луны, полученная зондом «Луна-3» (СССР) 7 октября 1959 г. *Слева*: снимок, полученный от зонда; *справа*: то же изображение, очищенное от помех при помощи современных технологий.

изображения на Землю. Компьютеров на борту зонда не было вообще. И хотя техническое качество этого снимка невысокое, он принес большое открытие: обратная сторона Луны совершенно не похожа на видимую сторону. Эта загадка не решена до сих пор.

По сути, романтическая эпоха географических открытий не прерывалась. А сегодня у каждого из нас есть возможность быть «участником» сразу нескольких захватывающих экспедиций. Глазами роботов мы видим все то, что видят ученые, организовавшие полеты к другим планетам. Потрясающие марсианские ландшафты не могут оставить нас равнодушными. Мы с нетерпением ждем посадок зондов на поверхность спутников планет, астероидов и ядер комет. В наши дни впереди людей идут автоматы; вероятно, так будет уже всегда. Но острота наших ощущений от этого не снижается.

Интересно, сколько людей следило бы за экспедициями Колумба и Магеллана, если бы в то время на их кораблях были веб-камеры online? В наши дни у каждого есть возможность стать виртуальным первопроходцем. Но многие ли люди регулярно заходят на сайты NASA, чтобы следить за ходом марсианских и прочих межпланетных экспедиций? Оказывается, таких любознательных заметно меньше, чем посетителей порносайтов. К счастью, романтика поиска пока остается уникальным свойством человека: стремление к новому знанию уже тысячи лет помогает нам эволюционировать быстрее любого другого биологического вида и благодаря этому ра-

дикально улучшать условия нашей жизни. И так будет до тех пор, пока каравеллы плывут к неизведанным землям, а зонды летят к новым планетам!

Как известно, естественные науки и техника стимулируют друг друга. В полной мере это справедливо и для астрономии. Когда-то благодаря ей значительно ускорилось развитие механики и оптики, а сегодня технические достижения возвращают долг науке: начавшись во второй половине XX века, техническая революция в астрономии продолжается. Трудно было предвидеть лет 20 назад, каких высот достигнут сегодня возможности астрономических наблюдений. Телескопы-рефлекторы с главными зеркалами диаметром 5–6 м казались (и на самом деле были в то время) пределом технических возможностей, а сегодня уже работает несколько 10-метровых телескопов, строится 40-метровый и проектируются инструменты до 100 метров в диаметре! При этом астроном-наблюдатель как ученый-отшельник, проводящий в одиночку у телескопа долгие ночные часы, ушел в прошлое: современным 1000-тонным телескопом управляет команда инженеров и компьютеров, решая задачу, поставленную астрономом.

Астрономия — старейшая из наук, и всегда главным инструментом астронома был глаз. Сначала это был невооруженный глаз, затем — вооруженный телескопом. И даже в эпоху фотографии, существенно усилившей возможности телескопа, глаз оставался в строю, став из первичного приемника света вторичным: фотоэмульсию на стеклянной пластинке астроном до недавних пор мог изучать только глазом. Сейчас эта эпоха подошла к концу. С помощью автоматических фотометров астрономы скоро закончат сканирование и оцифровку всех когда-либо отснятых фотопластинок — а их миллионы! — и тогда эпоха визуальной астрономии закончится. При этом содержание драгоценных «стеклянных библиотек» всех обсерваторий мира станет доступным любому профессионалу и даже любителю.

Впрочем, по эффективности работы электронный глаз уже давно победил своего живого собрата. Последние 15 лет автоматизированные телескопы стали практически самостоятельно совершать открытия, причем с ошеломляющей эффективностью. Взять такую сравнительно рутинную работу, как поиск астероидов. С момента обнаружения первого из них (1801 г.) в течение 90 лет астрономы визуально открыли 322 малые планетки. В 1891 г. Макс Вольф в Гейдельбергской обсерватории (Германия) открыл первый фотографический

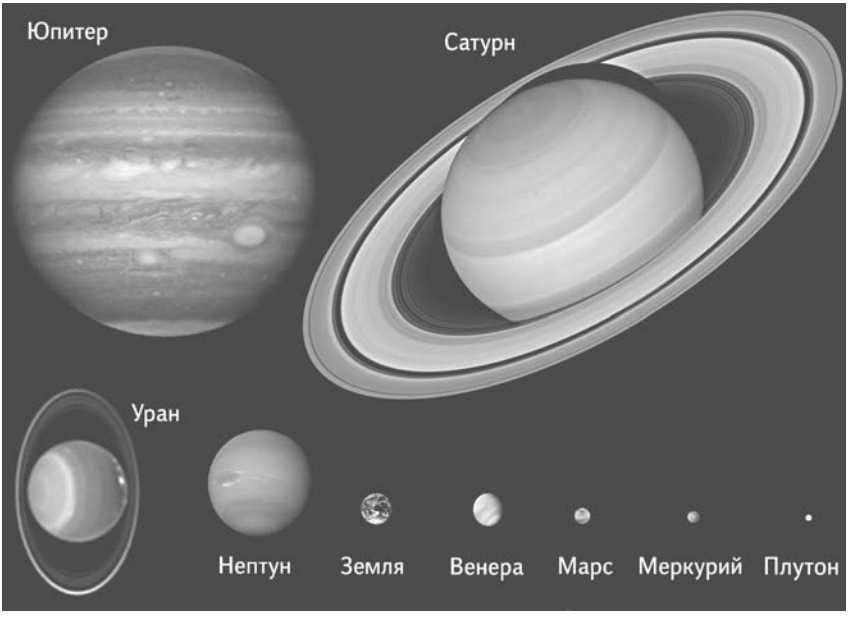

Рис. 1.2. Фотографии планет Солнечной системы, приведенные к единому масштабу. Для сравнения показана и планета-карлик Плутон. Более 90% массы нашей планетной системы заключено в Юпитере и Сатурне.

астероид (№ 323). По истечении века, к 1 января 1991 г., всего было обнаружено 4655 астероидов. Таким образом, «фотографический век» по сравнению с «визуальным веком» увеличил число астероидов на порядок. В 1990-е гг. фотопластинку и глаз стали заменять электронные приемники света, в основном ПЗС-матрицы. В результате к марту 2016 г. открыто около 1,3 млн астероидов, из которых 750 тыс. изучены достаточно подробно для точного определения их орбит. Всего лишь за четверть века количество известных астероидов возросло более чем на два порядка! Сейчас их открывают примерно по 5000 каждый месяц! Стремительно растет и количество известных спутников планет: в 1980 г. их было 45, сегодня (2026 г.) — 434, не считая сотен спутников у астероидов и объектов пояса Койпера. При таких темпах скоро будет закончена полная «инвентаризация» Солнечной системы.

Открытие большого числа новых объектов прежде всего требует их классификации. В последние годы введено много новых классов и изъяты некоторые старые: например, исчезла «малая плане-

та» как синоним «астероида». В 2006 г. Международным астрономическим союзом был принят новый термин «малое тело Солнечной системы» (small Solar system body, SSSB) для обозначения всех объектов Солнечной системы, не являющихся классическими планетами (Меркурий… Нептун) или планетами-карликами (dwarf planet), а также их спутниками. Таким образом, в число малых тел Солнечной системы попали все кометы, все традиционные астероиды (за исключением Цереры, отнесенной к планетам-карликам), все «кентавры» (centaur), движущиеся между орбитами планет-гигантов, все «троянцы», движущиеся по орбитам планет синхронно с ними, а также почти все объекты за орбитой Нептуна (trans-Neptunian object, TNO), кроме Плутона, Хаумеи, Макемаке и Эриды, отнесенных к планетам-карликам. Повторю: спутники планет не входят в число малых тел Солнечной системы. Не исключено, что со временем некоторые крупнейшие из малых тел Солнечной системы перейдут в разряд планет-карликов, если выяснится, что они имеют округлую форму, приобретенную под действием собственной гравитации (т. е. находятся в состоянии гидростатического равновесия). Очевидно, среди спутников планет некоторые входили когда-то в число малых тел Солнечной системы, а позже были захвачены на околопланетные орбиты; прежде всего это относится к иррегулярным внешним спутникам планет-гигантов. Что касается нижней границы масс малых тел Солнечной системы, то формально она не определена, и поэтому в их число можно включать даже мелкие объекты типа метеороидов размером 1–100 м. Именно поэтому в главе «Малые тела Солнечной системы» рассказано не только об астероидах и кометах, но также о метеорах и метеоритах.

Как видим, в исследовании Солнечной системы, помимо чисто «бухгалтерских» достижений, выражающихся количеством открытых объектов, есть прогресс и в принципиальных вопросах (как известно, количественные изменения неизменно переходят в качественные). За последние годы в популяции малых тел Солнечной системы открыто несколько новых классов объектов, интересных как своими физическими свойствами, так и характером движения. Например, выделено несколько новых семейств: сближающиеся с Землей астероиды, троянцы Нептуна и (возможно) Марса, кентавры, движущиеся на орбитах между планетами-гигантами, астероиды на подковообразных орбитах, астероиды со спутниками и двойные астероиды, а также временные спутники больших планет, объекты

пояса Койпера, сгорающие в атмосфере Солнца кометы, кувыркающиеся астероиды и спутники. Кроме этого, семейство планет разделилось на два подкласса: большие, или классические, планеты и планеты-карлики (пока их пять: Плутон, Церера, Хаумея, Макемаке и Эрида).

Решение об исключении Плутона из группы классических планет получило огромный общественный резонанс и для многих оказалось болезненным («Астрономы обещали найти десятую планету, а сами сократили их число до восьми!»). Страсти еще окончательно не улеглись, но понемногу новая номенклатура приживается. К тому же появляется все больше фактов, указывающих на существование полноценной девятой планеты на периферии Солнечной системы. Она может быть в несколько раз массивнее Земли и двигаться далеко за пределом пояса Койпера. Если ее существование подтвердится, то астрономы частично реабилитируют себя за историю с Плутоном.

Все малые тела за орбитой Юпитера теперь делятся на две основные группы — движущиеся внутри орбиты Нептуна (cis-Neptunian objects) и вне его орбиты (trans-Neptunian objects, TNOs). Между донептуновыми и за-нептуновыми объектами также обнаружились малые тела. Речь идет не о спутниках Нептуна, а об «условно-свободных» телах — троянцах Нептуна. Первый из них был открыт в 2001 г. В 2008 г. их уже было известно известно 5, а в 2016 г. — 17; все они в диаметре более 100 км, и все движутся более или менее по орбите Нептуна, из них 13 на 60° впереди него, в окрестности точки Лагранжа L_4, и еще 4 движутся на 60° позади планеты, в окрестности точки Лагранжа L_5. Кроме того, обнаружен один «прыгающий троянец», который движется сейчас в районе точки Лагранжа L_3. Чтобы не усложнять классификацию, всех троянцев Нептуна отнесли к группе донептуновых объектов. Если не принимать во внимание астероиды Главного пояса, то нынешняя классификация малых тел выглядит так, как показано ниже (с. 12).

Поясню, что классические объекты пояса Койпера называют «кьюбивано» (cubewano) в честь их прототипа, первого транснептунового объекта (не считая Плутона с Хароном), открытого в конце 1992 г. Дейвидом Джюитом и Джейн Луу из Гавайского университета в Гонолулу и получившего обозначение 1992 QB_1. Возможно, здесь не обошлось без реминисценции «Звездных войн», где одного из героев зовут Оби-Ван Кеноби.

Cis-Neptunian objects	**Объекты в орбите Нептуна**
Centaurs	Кентавры
Neptune Trojan	Троянцы Нептуна
Trans-Neptunian objects (TNOs)	**Объекты за орбитой Нептуна**
Kuiper belt objects (KBOs)	Объекты пояса Койпера
— classical KBOs (cubewanos)	— классические («кьюбивано»)
— resonant KBOs	— резонансные
plutinos (2:3 resonance)	плутино (резонанс 2:3)
twotinos (1:2 resonance)	тутино (резонанс 1:2)
and other resonances	*и другие резонансы*
Scattered disc objects (SDOs)	Объекты рассеянного диска
— resonant SBOs	— резонансные
Detached objects	Обособленные объекты
Sednoids	Седноиды
Oort cloud objects (OCOs)	Объекты облака Оорта

Резонансными называют объекты, орбитальные периоды которых находятся в простом целочисленном соотношении с орбитальным периодом Нептуна (165 лет). Например, в группе плутино, названной в честь Плутона, все «плутончики» имеют периоды около 250 лет, т. е. движутся в резонансе 2:3 с Нептуном. У объектов группы тутино (от англ. *two* — два) орбитальные периоды около 330 лет, т. е. вдвое больше, чем у Нептуна. Кроме этих групп, уже выделены и другие малонаселенные группы резонансного движения (2:5, 4:7, 3:5 и др.). Троянцев Нептуна тоже можно было бы включить в семейство резонансов (1:1), но их традиционно выделяют в самостоятельное семейство, поскольку они не в поясе Койпера.

Объекты рассеянного диска имеют большие эксцентриситеты и наклонения орбит. В перигелии их расстояние от Солнца более 30 а. е., а в афелии у большинства из обнаруженных доходит до 100–150 а. е. Впрочем, среди них встречаются и очень далекие объекты, с афелиями до 1000 а. е., но если они проходят перигелий ближе чем в 40 а. е. от Солнца, то время от времени могут испытывать гравитационные возмущения со стороны планет-гигантов, прежде всего Нептуна.

Обособленные объекты названы так потому, что они в своем движении не испытывают сильных возмущений со стороны планет-гигантов: перигелии их орбит лежат на расстояниях более 40 а. е. от Солнца. Еще дальше, на расстояниях более 75 а. е., лежат перигелии седноидов, названных в честь Седны, имеющей перигелий 76 а. е. и

афелий 956 а. е. А поскольку самый внешний из гигантов — Нептун — не удаляется от Солнца более чем на 30 а. е., ясно, что обособленные объекты и седноиды живут своей жизнью, если только на их движение не действует еще более далекая Девятая планета, а такое подозрение постепенно укрепляется.

Учитывая огромное количество новооткрытых малых тел, очевидно, в ближайшее время будут выделены и новые их группы. Например, предлагается выделить новое семейство «дамоклоидов» (Damocloids), названного по имени объекта 5335 Damocles, имеющего долгопериодическую высокоэксцентричную орбиту, такую, как у кометы Галлея, но при этом не демонстрирующего кому и хвост. Уже найдены десятки подобных объектов, вероятно, являющихся дегазированными ядрами комет, покрытыми толстой корой (поверхность у всех очень темная). Среди них сам Дамокл выделяется тем, что движется по ретроградной орбите — характерный признак кометы.

Как всегда в науке, накопление фактов и следующий за этим период классификации заканчиваются более глубоким пониманием эволюции и ее механизмов — за «линнеевским» периодом следует «дарвиновский». Скоро этот период наступит и в изучении Солнечной системы. Мы еще многого не понимаем в ее истории, а значит, самые интересные открытия — впереди!

Литература

Гребеников Ю. А., Рябов Ю. А. Поиски и открытия планет. М.: Наука, 1975.
Демин В. Г. Судьба Солнечной системы. М.: Наука, 1975.
Джонс Б. У. Жизнь в Солнечной системе и за ее пределами. М.: Мир, 2007.
Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М., 1983.
Ксанфомалити Л. В. Парад планет. М., 1997.
Рябов Ю. А. Движения небесных тел. М.: Наука, 1977.
Сурдин В. Г. Разведка далеких планет. М.: Физматлит, 2022.
Чемберлен Дж. Теория планетных атмосфер. М., 1981.

Глава 2

Небесная механика

К. В. Холшевников

2.1. Начало

Наряду с астрометрией небесная механика — древнейшая ветвь астрономии, существовавшая уже в третьем тысячелетии до н. э. Основная двуединая задача небесной механики от античности до наших дней — построение *математической модели* движения небесных тел и *определение ее параметров* из наблюдений.

В этой статье я буду использовать современные термины. Но для передачи аромата эпохи полезно иногда приводить и старые. Любя высокопарный стиль, наши предшественники говорили не «модель», а «Система Мира». Словосочетание *небесная механика* появилось и вошло в употребление лишь после публикации в 1798 г. одноименного сочинения П. С. Лапласа. А как же говорили до этого? В древности — никак. Астрономия, и всё тут! Потом стали добавлять прилагательные и долго отождествляли *теоретическую астрономию* и небесную механику. Потом теоретические разделы появились и в других ветвях астрономии — прежде всего в астрофизике, и сейчас термин «теоретическая астрономия» практически вышел из употребления.

История небесной механики делится на два больших периода: до и после выхода в 1686 г. книги И. Ньютона «Математические начала натуральной философии». С этого момента начинается наука в современном смысле слова. Движение предстало однозначным следствием физических причин, тогда как раньше причины известны не были и математические модели ничем не ограничивались, кроме как недостатком фантазии ученых или идеологическими догмами, господствовавшими в обществе.

Многие мои друзья-астрофизики (рождение астрофизики как современной науки произошло еще при жизни некоторых ныне здравствующих долгожителей) говорят мне, что небесная механика как наука началась с Ньютона, а до этого была только *преднаукой*.

Не буду спорить о терминологии, ведь, по существу, мы представляем развитие науки одинаково. Щедро предлагаю противоположное: добавить к возрасту астрофизики несколько тысячелетий. Ведь цвет и яркость Луны, Солнца, звезд, планет говорят кое-что об их физических свойствах; мерцание света и цвета звезд, изменение цвета и яркости светил в зависимости от высоты над горизонтом, изменение цвета и яркости Луны при полном лунном затмении говорят о свойствах атмосферы третьей планеты; неизменное появление четок Бейли и короны при полном солнечном затмении говорит о рельефе Луны и свойствах солнечной атмосферы и короны. Можно и продолжить: метеоры, метеориты, кометы, новые звезды…

Слушается дело о солнечном затмении

…Древний Китай, 2137 г. до н. э. Суд. Двое обвиняются в государственном преступлении. Обвинитель краток: «Императорские астрономы Хи и Хо *не предсказали* солнечного затмения! В результате дракон начал пожирать Солнце на глазах у пораженного народа, не предупрежденного теми, кто должен был сделать это по долгу службы». Он передохнул, вытянул обличающую руку в сторону бледных ученых и продолжал: «А они предавались разврату ночью вместо того, чтобы наблюдать за светилами, пьянствовали днем вместо того, чтобы вычислять и обрабатывать наблюдения. К счастью, бдительные стражи государственной безопасности подняли народ и бросили его на борьбу с драконом. Страшный шум от сковородок и тазов, по которым неистово колотил народ, испугал дракона, и тот убрался восвояси. Иначе исчезло бы Солнце и погибла бы Поднебесная империя (страшно подумать!) и все другие, варварские народы Земли (что, впрочем, несущественно и в обвинение не входит). Смерть государственным преступникам!» Несчастных казнили, как гласит легенда. А мы с вами сделаем выводы из этой печальной истории.

1. Свыше четырех тысяч лет назад астрономия в Китае уже была настолько развита, что специалисты почти безошибочно предсказывали затмения Луны и Солнца. Если бы они ошибались хотя бы в одном случае из десяти, в Китае переказнили бы всех астрономов. В действительности китайцы уже тогда неплохо представляли себе движение Луны и Солнца по небесной сфере, что и нужно для предвычисления затмений.

2. Астрономия находилась на государственной службе. Занятия наукой приравнивались к военным занятиям. Не потому ли Древний

Китай — одно из немногих древних государств, не исчезнувших с лица Земли вслед за Шумером, Вавилоном, Ассирией, Карфагеном…

3. Затмения предсказывают не за сутки, не за месяц, а по крайней мере на год-два вперед. Но астрономия была еще в зачаточном состоянии, и прогноз затмений изредка давал сбои. Подобное стало немыслимым в цивилизованных странах со II в. н. э. «Неожиданность» затмения перед битвой при Каяле свидетельствует лишь о дикости большинства (но не всех!) русских князей того времени.

2.2. До Ньютона

Какие научные истины о форме и движении блуждающих светил были твердо установлены учеными античности? Ограничимся Грецией, эллинистическим Египтом и Римом, где наука не была эзотерической, тайной, а была доступна любознательным свободным гражданам. Кстати, ученые той эпохи очень удивились бы постановке такого вопроса, никак не связывая между собой форму и движение планет. Но теперь мы знаем, что и то, и другое определяется гравитацией, и посему ставим вопросы рядом.

1. *Земля имеет форму шара.* В тысячах книг вы прочтете десятки доказательств этого. Например: в море горизонт кажется круглым, где бы ни находился ваш корабль. Действительно, только шар обладает таким свойством. Находись мы на огурце, расстояние до горизонта было бы различно в разных направлениях. Но с какой точностью нам известна округлость горизонта? С очень небольшой. Только астрономические наблюдения подтверждали шарообразность Земли с высокой точностью. Например, если вы равномерно идете точно на юг, Полярная звезда (точнее, полюс мира) равномерно опускается к горизонту, исчезает на экваторе, и вы видите равномерно подымающийся южный полюс мира. Первое определение размеров земного шара выполнил в III в. до н. э. александрийский ученый Эратосфен.

2. Античные ученые утверждали, что *Солнце и Луна — шары.* Что касается Луны, то тут были веские основания. На Луне нормальным невооруженным глазом видно много деталей, подчеркнем — неизменных. Поэтому ясно, что Луна обращена к нам одной стороной. Но принадлежит эта сторона плоскому диску или шару, без телескопа не различить. Однако форма линии терминатора убедительно показывает, что к нам обращено *полушарие* (рис. 2.1 и 2.2). Зато слепящий *диск* Солнца (последний термин употребляется в астрономии до сих пор) никак не выдает своей выпуклой формы.



Рис. 2.1. Вид Луны в полнолуние (слева) и в новолуние вполне согласуется с гипотезой о диске, но все остальные фазы Луны, например первую четверть (справа), можно объяснить только в том случае, если Луна — шар.

Итак, древние на самом деле *не знали* форму Солнца. Почему же они так возлюбили шар и убедили себя в шарообразности светил? Во-первых, по аналогии с Землей и Луной. Но главная причина — религиозные и философские (то есть идеологические) догмы. Небо совершенно, небесные тела совершенны, совершенна форма их поверхности, что по пифагорейским представлениям равносильно сферичности. Редчайший в науке случай, когда предвзятая, не имеющая ни малейшей естественнонаучной опоры догма приводит к правильному ответу. Теперь сферичность Земли и других ближних небесных тел не нуждается в доказательствах: достаточно взглянуть на снятые из космоса фотографии и кинофильмы. Научный интерес представляют лишь малые отклонения от сферической формы.

3. Солнце относительно звезд для земного наблюдателя движется по большому кругу небесной сферы, получившему странное имя *эклиптика*, что приблизительно означает *круг затмений*. Дело в том, что *лунные* затмения происходят как раз тогда, когда Луна в полнолуние попадает на эклиптику. Солнечные затмения тоже происходят на эклиптике, когда Луна попадает туда в новолуние и закрывает от нас Солнце. Но это тривиально: Солнце по определению всегда находится на эклиптике. Все же назвать солнечный путь эклиптикой — то же самое, что шоссе назвать «путем автокатастроф».

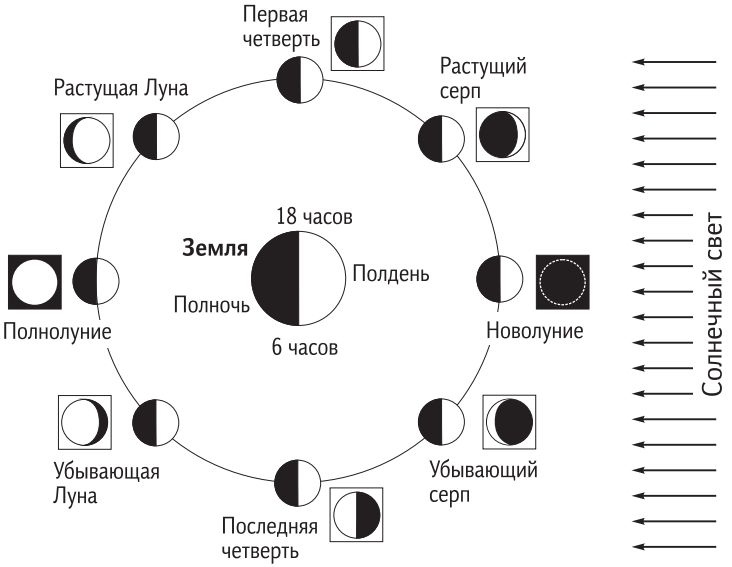

Рис. 2.2. Наблюдения Луны даже невооруженным глазом убеждают нас, что 1) Луна — шар (видимые фазы Луны показаны в рамках); 2) Луна обращается вокруг Земли (ее угловой размер почти неизменен); 3) Луна не светит сама, а отражает солнечный свет; 4) периоды вращения Луны вокруг оси и обращения вокруг Земли совпадают (неизменен рисунок на диске).

Движение Солнца неравномерно: зимой в северном полушарии оно движется быстрее, летом — медленнее. Движение Луны сложнее. Чтобы описать его, астрономы изобрели могущественнейший прием, играющий в механике важнейшую роль и сегодня: разложение сложного движения на совокупность простых. Именно, Луна описывает большой круг, наклоненный к плоскости эклиптики примерно на 5°. Но сама эта плоскость вращается вокруг оси эклиптики по часовой стрелке (если смотреть с севера), делая полный оборот за 18,6 лет. Как и Солнце, по своему кругу Луна тоже движется неравномерно, вдобавок точка ее наибольшей скорости (перигей) движется против часовой стрелки, делая полный оборот за 9,6 лет.

Знали астрономы и более тонкие детали в движениях Солнца и Луны по небу, что позволяло им с удивлявшей современников точностью предсказывать солнечные и лунные затмения.

4. Пути планет по небу чертят столь замысловатый клубок (рис. 2.3), что поражает воображение, как древние смогли распутать его и построить не превзойденный полторы тысячи лет шедевр — теорию их движения относительно земного наблюдателя. И, как обычно,

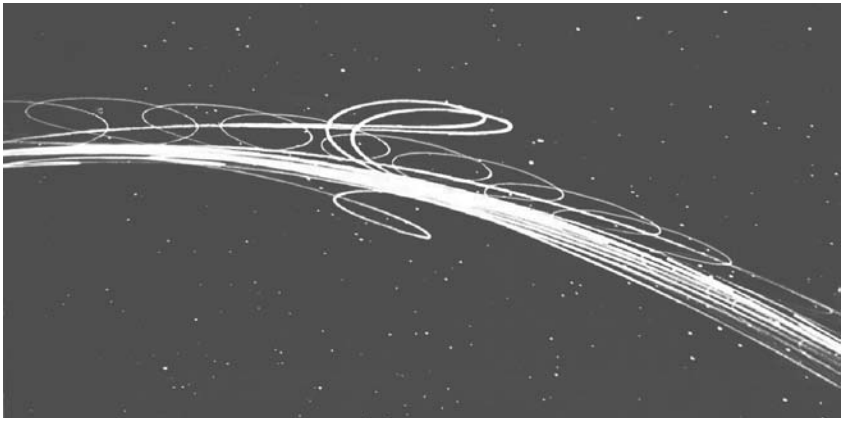

Рис. 2.3. Траектории планет на небесной сфере для земного наблюдателя (Hoyle F. Astronomy. N.-Y.: Doubleday Company, 1962, p. 75, fig. 3.13).

неблагодарные потомки ругали и, бывает, ругают их до сих пор за то, что эта теория *геоцентрична.*

Повторю, что античные ученые с высочайшей степенью совершенства описали движение планет по небесной сфере в прошлом, настоящем и будущем относительно звезд для земного наблюдателя. Решать же, как планеты движутся на самом деле, они фактически предоставили потомкам, так же как и поставленный лишь в XX веке вопрос, что же такое *на самом деле.*

В теории движения планет, разработанной Гиппархом (II век до н. э.) и доведенной почти до совершенства Клавдием Птолемеем (II век н. э.), условно можно выделить два направления. Одно описывало движения малым числом сложно устроенных элементов, второе — большим числом просто устроенных элементов. Не будь провала Средних веков, первое направление быстро привело бы к кеплеровскому эллипсу, второе — к ряду Фурье. Опишем лишь более понятное второе направление.

Воображаемая точка P_1 равномерно с угловой скоростью ω_1 движется по некоторой окружности радиуса R_1 (рис. 2.4). Воображаемая точка P_2 равномерно с угловой скоростью ω_2 движется по окружности радиуса R_2 с центром в точке P_1, и так далее. Всего имеется k окружностей, и по последней из них движется само светило P. Это может быть Луна, Солнце или любая из пяти известных древним планет. Описанные k окружностей назовем *эпициклами*, хотя сами авторы именовали так все окружности, кроме первой — *деферента.*

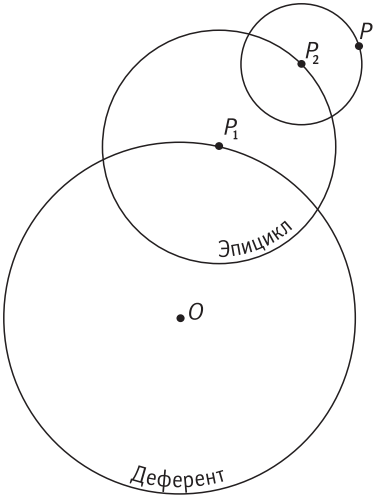

Рис. 2.4. Схема движения планеты (*P*) по деференту и эпициклам вокруг наблюдателя (*O*).

Как не очень трудно показать, при достаточно большом k и хорошо подобранных параметрах системы (радиусы R_s, угловые скорости ω_s, ориентации плоскостей эпициклов, т. е. долготы узлов Ω_s и наклоны i_s, положение центра деферента, начальные положения точек P_s) эпициклическая модель сколь угодно точно описывает реальное движение планет. Самое интересное, что необходимое число эпициклов для каждой планеты невелико, если ограничиться точностью античных наблюдений в 0,2°: например, 2 для Солнца и 4 для Марса. Так что миф о сложности системы Птолемея имеет лишь одно основание: вплоть до Коперника включительно параметры модели из наблюдений определяли безобразно плохо, что и влекло массу ненужных эпициклов, не обеспечивающих тем не менее требуемой точности. Модель Птолемея — чудо человеческого разума, рядом с которой меркнут все семь чудес древнего мира.

Начали греки и построение гелиоцентрической системы мира, описывающей в хорошем приближении, как движутся планеты «на самом деле», т. е. с точки зрения не земного, а удаленного наблюдателя, скажем, от звезды γ Дракона. Теперь, хоть и в ослабленной мере, мы имеем возможность взглянуть на Солнечную систему со стороны. Из дальнего космоса глазами «Пионеров», «Вояджеров», «Галилео», «Улисса», «Кассини» мы видим внутренние планеты, включая Землю с Луной, мчащимися вокруг Солнца.

Гелиоцентрическая модель гораздо экономичнее описывает движения небесных тел и позволяет находить *расстояния*, недоступные в классической геоцентрической теории. С чисто научной точки зрения непонятно, почему была отброшена система Аристарха Самосского, который жил много раньше Птолемея и даже Гиппарха, в III в. н. э., начал серьезную разработку гелиоцентрической системы мира, но был изгнан из Афин.

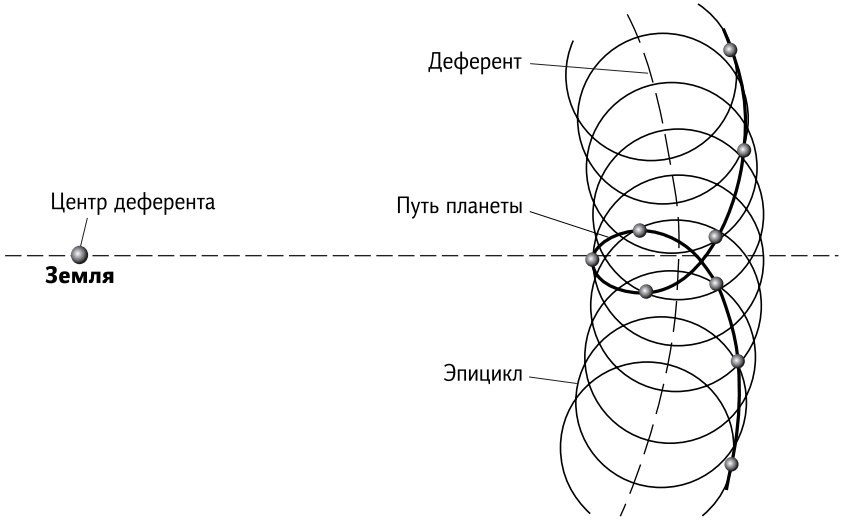

Рис. 2.5. Наблюдаемое петлеобразное движение внешней планеты воспроизводится ее равномерным круговым движением по эпициклу, центр которого равномерно движется по круговому деференту.

На небе, как на учебном пособии, простые траектории вокруг Солнца описывают Меркурий и Венера. Чтобы присоединить к ним Землю, Марс, Юпитер и Сатурн, нужен был гений Аристарха. Но как только идея высказана, она уже очевидна любому умному человеку. Только проклятием идеологических догм можно объяснить, что система Аристарха была объявлена неверной и даже вредной. Она была признана отвечающей действительности лишь через сто лет после смерти Коперника, т. е. тогда, когда от нее почти ничего не осталось, поскольку ее сменила значительно более совершенная модель Кеплера. Модель Кеплера стала последней чисто математической, т. е. описывающей движение без объяснения его причин. В конце XVII в. одним из многочисленных следствий ньютоновской революции в естествознании стало объяснение законов Кеплера единым фундаментальным законом всемирного тяготения.

О науке

Древний Египет. Народ толпится у храма бога Птаха. Сияет солнце. Выходит Верховный жрец: «Боги гневаются на вас! Вы погрязли в пороках! Вместо трудолюбия — лень. Пирамида, если считать от последней перестройки, выстраивается тридцатый год, а конца не ви-

дать. Ваши трудолюбивые предки, что ушли на Запад, делали больше за пять лет. Да что там, пятилетку они выполняли за четыре года! А ваша жадность? Личные интересы ставите выше общественных! Лишь бы набить живот. А где жертвы богам? Где приношения Храму? Я мог бы назвать еще множество мелких преступлений: убийства, кражи друг у друга и т. д., но и этого достаточно. Взгляните!» Театральным жестом показывает на Солнце.

Народ подымает глаза и в ужасе замирает. Пылающий диск уменьшается. В отчаянии все падают ниц.

«Кайтесь! Молитесь Птаху, Хатор, Ра! Клянитесь трудиться, как велит Моральный кодекс строителя пирамид! Не покладать рук от восхода до заката! Жертвуйте Храму! Всё лучшее — богам и их детям! Клянитесь громче, и да услышат вас бессмертные боги!» Долгий нечленораздельный, чередующийся с членораздельным, вой. Диск Солнца увеличивается, затмение кончается. Народ ликует — конец света отложен. Чаша «на воссоздание Храма Ра-Спасителя» быстро наполняется.

Какие выводы сделаем мы из этой обычной истории?

1. Астрономия была достаточно развита в Древнем Египте. Примерно то же можно сказать и о древней Месопотамии, где также происходили подобные сценки.

2. В отличие от Китая астрономия, да и вся наука, в Древнем Египте была не на государственной службе, а прозябала в храмах, была важной частью занятий жрецов и только жрецов.

3. Астрономия целиком (а другие науки — частично) была *эзотерической*, т. е. тайной. Жрецы тщательно скрывали свои занятия наукой, выдавая за общение с богами свои наблюдения светил, а за записи воли богов — свои вычисления моментов затмений путем решения алгебраических и тригонометрических уравнений (увы, дифференциальных им боги не открыли). Если бы кто-то из жрецов прочел бы публичную лекцию «Солнечные и лунные затмения, их причины и следствия», он не дожил бы до следующего дня. Убийства за нарушение эзотеричности были в то время обычным явлением. Ведь трудно удержаться и не рассказать хоть кому-то тайну, которой владеешь. Теперь эзотеричность науки осталась только в ее военной части. Желаю вам дожить до времени, когда она исчезнет совсем. А если вы увидите или услышите о «докторе эзотерических наук», отнеситесь к этому как к вредному, а не полезному ископаемому.

2.3. Всемирное тяготение

Согласно Исааку Ньютону, любые две материальные частицы Q_1 и Q_2 притягиваются друг к другу с силой F, прямо пропорциональной массам m_1, m_2 и обратно пропорциональной квадрату расстояния r:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}. \qquad (1)$$

Коэффициент пропорциональности G называют *постоянной тяготения* или *гравитационной постоянной.*

Какой контраст с прошлым! Вместо непонятно откуда взятых нагромождений кругов — простая, коротенькая и кристально ясная формула. Все сложные движения небесных тел, и не только в крошечной Солнечной системе, а во всей Вселенной, предстали математическими следствиями соотношения (1)! С точки зрения математики запись (1) приводит к *дифференциальным уравнениям* движения небесных тел. По определению, дифференциальные уравнения механики представляют собой закон, по которому положениям и скоростям всех небесных тел ставятся в соответствие их ускорения. Скорость **v** любого тела есть вектор, равный производной по времени от вектора положения **r**. Вектор ускорения **w** есть скорость изменения скорости, т. е. производная от скорости или, что то же, вторая производная от вектора положения. А сила и ускорение отличаются лишь скалярным множителем — массой.

Мы не будем здесь составлять и решать дифференциальные уравнения, дадим лишь пояснения. Дифференциальное уравнение всегда имеет бесконечно много решений. Именно: фиксируем какой-либо момент времени; положения и скорости всех тел в этот момент могут быть произвольными. Если их закрепить, то положения всех тел для любого времени t как в будущем, так и в прошлом определяются однозначно. В астрономии принято t_0 называть *начальной эпохой* (хотя ничего ни первоначального, ни эпохального здесь нет), положения и скорости — *состоянием системы*, положения и скорости в начальную эпоху — *начальными данными*. Таким образом, состояние системы однозначно определяется начальными данными.

В качестве простейшего примера приведем движение по прямой по инерции как решение дифференциального уравнения движения частицы в бессиловом поле. Силы нет, ускорение равно нулю и уравнение тривиально:

$$w = 0. \qquad (2)$$

Его общее решение описывает прямолинейное и равномерное движение:

$$v = v_0$$
$$r = r_0 + v_0(t - t_0), \qquad (3)$$

где индексом «0» помечены положение и скорость в начальную эпоху. То, что линейные функции времени (3) удовлетворяют уравнению (2), очевидно. То, что других решений нет, вытекает из теоремы, согласно которой интеграл определяется однозначно с точностью до постоянного слагаемого.

Вернемся к Ньютону. Формула (1) была ясна ему (и не одному ему) интуитивно, по аналогии со светом. Освещенность от точечного источника в среде без поглощения ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния. С чего бы гравитации подчиняться другому закону? Но интуиция может подвести даже гения (таких случаев история знает сколько угодно). Главная заслуга Ньютона — *доказательство* закона тяготения. Ученый выбрал метод, похожий на доказательство от противного. Именно, он выводит проверяемые следствия (1) и убеждается, что все они согласуются с наблюдениями в пределах ошибки измерений. Если хоть раз натолкнуться на разительное противоречие, то закон тяготения надо похоронить. Если нет... Математик скажет, что из последнего ничего не следует. «Противное» может лишь опровергнуть ваше предположение, но не доказать его. Но астрономия, физика, все естественные науки в корне отличны от математики. Закон (1) проверялся тысячами ученых на миллионах объектов во всех частях Вселенной в самых разных условиях и всегда выходил победителем. Так что истинность его установлена с наивысшей степенью надежности.

Тут самое время сделать существенную оговорку. Согласно любой из развитых философий, наши знания отражают действительность не точно, а с некоторой погрешностью. Прогресс науки заключается, в частности, в том, что эта погрешность усилиями ученых уменьшается, но нулем ее сделать невозможно. Некоторые отклонения в движениях светил от ньютоновских правил все же были обнаружены, что в конце концов привело к созданию А. Эйнштейном более совершенной теории тяготения, включающей ньютоновскую в предельном случае малых (по сравнению со скоростью света) скоростей и сравнительно слабых полей тяготения.

Модель Эйнштейна получила странное имя — «Общая теория относительности»; о ней мы поговорим позже. А пока заметим, что в подавляющем большинстве случаев релятивистскими эффектами (т. е. связанными с теорией относительности, общей или частной, от лат. *relativus* — относительный) можно пренебречь и считать ньютоновскую теорию абсолютной истиной. Рассмотрим, по каким траекториям будут тогда двигаться небесные тела.

2.4. Движение в главном поле

Траектории небесных тел сложны и запутанны. Чтобы в них разобраться, поступим согласно канонам *теории возмущений*. Именно, выделим главные силы, действующие на систему, и пренебрежем всеми остальными. Полученную упрощенную систему назовем невозмущенной. Решим ее. А уже потом добавим другие, малые силы. А малое воздействие — как принято говорить, малое возмущение — учесть значительно легче (об этом позже).

Массы планет значительно меньше массы дневного светила. Юпитер в тысячу раз легче Солнца, Сатурн в три раза легче Юпитера, Земля в сто раз легче Сатурна... Поэтому в первом приближении можно считать, что на каждую из планет действует только притяжение Солнца.

Еще более идеализируем задачу, предполагая планету материальной частицей пренебрежимо малой массы. Но Солнце считать «частицей» нельзя, оно имеет внушительные видимые размеры. Примем, что Солнце — идеальный шар, плотность которого зависит лишь от расстояния до его центра. Как доказал И. Ньютон, шар притягивает внешние частицы как материальная точка той же массы, помещенная в его центре. Мы пришли к модельной задаче одного притягивающего центра. Каковы траектории частицы в поле притяжения массивной центральной точки S? Как показал Ньютон, возможны четыре типа орбит.

1. *Луч* или *отрезок*, лежащие на прямой L, проходящей через центральное тело S. Этот случай имеет место, если начальная скорость направлена точно к S или точно в противоположную сторону. Это свойство сохраняется во все время движения, что лишний раз подчеркивает условность термина «начальная». Остальные три типа орбит — плоские кривые, не содержащие прямолинейных участков.

2. *Эллипс* (рис. 2.6). Центральное тело S, как ни странно это звучит, находится не в центре эллипса, а в одном из двух его *фокусов*.

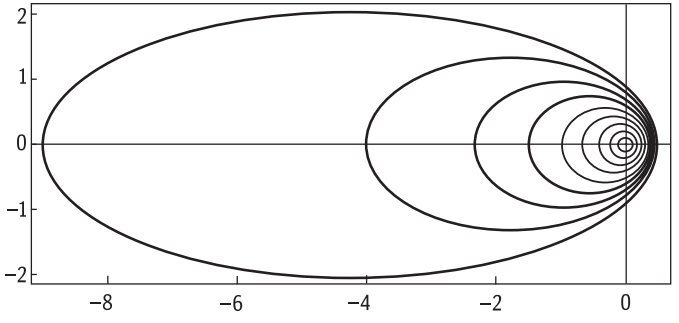

Рис. 2.6. Семейство эллипсов с общим фокусом в начале координат.

Отличие эллипса от окружности измеряется эксцентриситетом e — отношением расстояния между фокусами к длине большой оси. Эксцентриситет окружности равен нулю. Эллипс тем более вытянут, чем ближе e к единице.

3. *Парабола* (рис. 2.7). По параболе частица уходит в бесконечность. Скорость частицы уменьшается, неограниченно приближаясь к нулю. Фигурально выражаясь, частица уходит в бесконечность и останавливается там.

4. *Гипербола* (рис. 2.8). По гиперболе частица уходит в бесконечность, ее траектория приближается к некоторой прямой, *асимптоте*. Скорость частицы стремится к некоторой положительной величине v_∞ — скорости на бесконечности, оставаясь все время больше неё.

По какой из трех кривых будет двигаться частица, зависит от полной механической энергии E единицы массы, включающей в себя кинетическую E_k и гравитационную потенциальную E_p. Поскольку трения нет, то E сохраняется во все время движения. Оказывается, частица движется по эллипсу, если $E<0$; по параболе, если $E=0$; по гиперболе, если $E>0$. Напомню, что потенциальная энергия имеет смысл с точностью до постоянного слагаемого. В физике и астрономии это слагаемое принято фиксировать условием $E_p=0$, когда частица находится бесконечно далеко от S. При таком соглашении

$$E_k = \frac{v^2}{2} \quad \text{и} \quad E_p = -\frac{K^2}{r}, \tag{4}$$

где $K=\sqrt{GM}$, а M — масса S. Если расстояния измерять в километрах, время — в секундах, то $K=364\,305$, если S — Солнце; $K=631{,}35$, если S — Земля. На практике часто вместо E используют более наглядную величину — скорость $v=\sqrt{2E_k}$. Критическому значению $E=0$ отвечает *вторая космическая скорость* v_1 (называемая также скоростью убе-

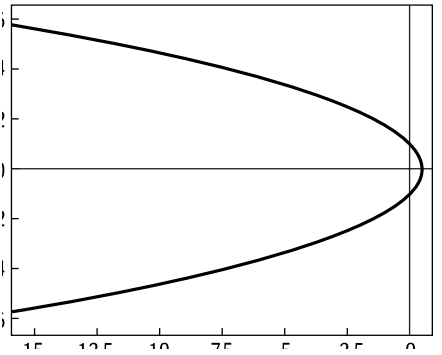

Рис. 2.7. Парабола с фокусом в начале координат.

гания или параболической скоростью).

Понятно, что v_{II} — не число, а зависящая от расстояния до S величина: скажем, для спутника Земли $v_{II} = 11$ км/с вблизи поверхности планеты, но $v_{II} = 1{,}5$ км/с у орбиты Луны. Полезно знать, что первая космическая (круговая) скорость v_I и параболическая скорость v_{II} различаются только множителем $\sqrt{2}$: $v_{II} = v_I\sqrt{2} \approx 1{,}41 v_{II}$.

Между круговой и параболической скоростями есть принципиальная разница. Чтобы двигаться по окружности, круговую скорость следует направить перпендикулярно радиусу-вектору, соединяющему центральное тело и частицу. Чтобы уйти на бесконечность, достаточно развить параболическую скорость; при этом ее направление безразлично, лишь бы избежать столкновения с S.

За исключением специального случая (когда скорость направлена точно к S или точно в противоположную сторону), орбиты оказались кривыми линиями. К тому же движение по орбитам неравномерно. Самая большая скорость — в перицентре (ближайшей к S точке орбиты), и чем дальше от перицентра, тем она меньше. Наименьшая скорость в случае эллипса — в апоцентре (наиболее удаленной от S точке орбиты).

Дадим количественные соотношения. Расстояние r_p от S до перицентра выражается через большую полуось a (среднее расстояние от движущегося тела до S) и эксцентриситет e по формуле $r_p = a(1-e)$. Расстояние r_a

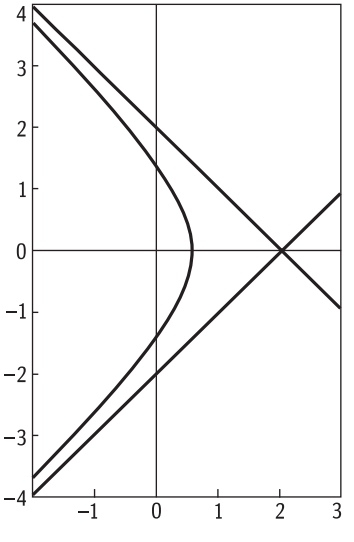

Рис. 2.8. Гипербола с фокусом в начале координат и двумя асимптотами.

от S до апоцентра $r_a = a(1+e)$. Скорости в экстремальных точках (апсидах) эллипса составляют:

$$v_p = v_l(a)\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \quad \text{и} \quad v_a = v_l(a)\sqrt{\frac{1-e}{1+e}}.$$

Здесь $v_l(a)$ — круговая скорость на расстоянии a от S. В свою очередь v_l убывает обратно пропорционально квадратному корню из расстояния до S: $v_l = K/\sqrt{r}$.

Между большой полуосью и периодом обращения существует связь, открытая еще И. Кеплером в начале XVII века:

$$P = 2\pi \frac{a^{3/2}}{K}. \qquad (5)$$

Разумеется, выражение постоянной K через G и M — заслуга Ньютона.

Если эллипс близок к окружности, различие скоростей в разных точках орбиты невелико. У Земли в ее движении вокруг Солнца $e = 0{,}016$, v_p=31 км/с, v_a=29 км/с. У кометы Галлея эллипс очень вытянут: $e = 0{,}96$; так что v_p=51 км/с, v_a=1 км/с. Такой характер ускорений и замедлений на орбите понять легко, если воспользоваться аналогией с вращением грузика на стержне вокруг горизонтальной оси. Внизу скорость наибольшая, наверху — наименьшая. В нашей задаче «вниз» — это направление к притягивающему центру, «вверх» — прочь от него.

Причина изменений скорости и для планеты, и для маятника одна: закон сохранения энергии. «Наверху» потенциальная энергия

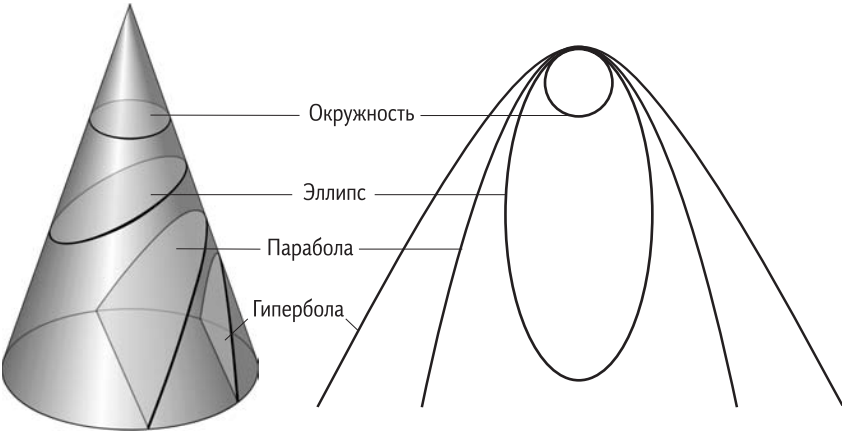

Рис. 2.9. Все кривые, по которым может двигаться материальная точка вокруг центрального тела, принадлежат семейству конических сечений.

гравитации максимальна, «внизу» — минимальна. Для кинетической энергии соотношение противоположно.

Набор орбит оказался небольшим. В век космонавтики мы можем выбирать высоту или период обращения искусственных небесных тел в широких пределах, но в силу (5) по отдельности, а не вместе. Наименьший период обращения искусственного спутника Земли (ИСЗ) — полтора часа — соответствует круговой орбите минимальной высоты. Максимального периода теоретически нет, но подавляющее большинство ИСЗ имеют период не более 24 часов.

2.5. Притяжение и форма небесных тел

Многие искусственные спутники Земли летают низко, почти царапая Землю: в масштабе школьного глобуса (1 : 50 000 000) — не далее сантиметра от него. Тут уж даже Землю шаром считать нельзя, хоть на глазок это и незаметно. А вот Юпитер и особенно Сатурн обладают отчетливо видимым сжатием. Одним словом, чтобы идти дальше, надо разобраться с формой небесных тел и их притяжением.

Начнем с последнего. Пусть нам известна форма и строение протяженного небесного тела T. Как определить силу тяготения, с которой T притягивает какую-либо частицу Q? Перейдем к ускорению — оно не зависит от массы пробной частицы (уникальное свойство гравитационного поля, открытое Г. Галилеем). Поэтому можно считать, что T создает вокруг себя (и в себе самом тоже) поле ускорений, математически точное описание гравитационного поля. Как найти его? Разобьем мысленно T на столь малые кубики, чтобы их размерами можно было бы пренебречь по сравнению с расстоянием до Q. Вектор ускорения $\mathbf{w}_s$, сообщаемого Q со стороны s-го кубика, равен, согласно (1),

$$\mathbf{w}_s = -\frac{Gm_s}{r_s^3}\mathbf{r}_s. \qquad (6)$$

Поясним, откуда взялись минус и куб в знаменателе. Модуль ускорения равен Gm_s/r_s^2, и он умножен на единичный вектор $-\mathbf{r}_s/r_s$ направления от массы m_s к точке Q (рис. 2.10). Полное ускорение равно векторной сумме (6) по всем кубикам. Разумеется, так получается приближенная величина. Чтобы вычислить точную, нужно перейти к пределу, устремляя ребро кубика к нулю. В пределе получим тройной интеграл по телу T. С помощью хорошего компьютера интеграл взять нетрудно, но ведь даже для данного тела его нужно считать в огромном количестве точек пространства. Чаще всего идут другим путем.

Оглавление

1. Эпоха первых межпланетных экспедиций 3

2. Небесная механика. 14
2.1. Начало 14
Слушается дело о солнечном затмении 15
2.2. До Ньютона 16
О науке 21
2.3. Всемирное тяготение 23
2.4. Движение в главном поле 25
2.5. Притяжение и форма небесных тел 29
2.6. Движение ИСЗ 36
2.7. Пассивное движение в системе Земля—Луна 41
2.8. Импульсные перелеты 44
2.9. Гравитационный маневр 48
2.10. Малая тяга. Солнечный парус 50
2.11. Движение в атмосфере 51
2.11.1. Парад планет 52
2.12. Эволюция планетной системы 54
2.13. Эволюция спутниковых систем 58
2.14. Релятивистская небесная механика 60
2.15. Заключение 62

3. Луна 65
3.1. Характеристики Луны 65
3.2. Любительские наблюдения Луны 67
3.2.1. Фазы Луны 67
3.2.2. Наблюдения Луны в небольшой телескоп 68
3.2.3. Лунные затмения 71
3.2.4. Фотографирование Луны 72
3.2.5. Может ли любитель астрономии принести пользу селенологии? . 73
3.3. По Луне измеряют время 74
3.4. Изучение Луны в телескоп 76
3.5. Космические исследования Луны 78
3.5.1. Исследования Луны в 1950—1970-е годы 78
3.5.2. «Клементина» и «Лунар Проспектор» исследуют Луну 84
3.5.3. «Смарт-1» и другие 90
3.5.4. Возможна ли жизнь на Луне? 98
3.6. Строение и история Луны 99
3.6.1. Поверхность Луны и ее недра 99
3.7. Прошлое Луны и гипотезы о ее происхождении 102

4. Меркурий 106
4.1. Характеристики Меркурия 106
4.2. Особенности движения Меркурия 111
4.2.1. Ошибка Скиапарелли 113

4.3. Происхождение рельефа Меркурия . . . 115
4.4. Равнина Жары . . . 120
4.5. Реголит Меркурия . . . 123
4.6. Строение недр Меркурия . . . 125
4.7. Экзосфера Меркурия . . . 127
4.8. Магнитное поле Меркурия . . . 128
4.9. О происхождении Меркурия . . . 130

5. Венера . . . 133
5.1. Характеристики Венеры . . . 133
5.2. Необычное вращение Венеры и роль Меркурия в ее эволюции . . . 136
5.3. Первые полеты к Венере . . . 138
5.4. Состав и строение атмосферы . . . 140
5.5. Парниковый эффект . . . 141
5.6. Малые составляющие атмосферы . . . 142
5.7. Ветер Венеры . . . 143
5.8. Природа облаков Венеры и их роль в тепловом балансе . . . 144
5.8.1. Строение облаков Венеры . . . 144
5.8.2. Состав облаков Венеры . . . 145
5.8.3. Тепловой баланс Венеры . . . 146
5.9. Динамика и химия облаков . . . 146
5.10. Прямые исследования поверхности Венеры . . . 148
5.11. Радиолокационные карты и география Венеры . . . 154
5.12. Парадокс устойчивости рельефа . . . 169
5.13. «Электрический дракон» Венеры . . . 170
5.14. Недра Венеры. Отсутствие магнитного поля . . . 172

6. Марс . . . 175
6.1. Характеристики Марса . . . 175
6.2. Второе открытие Марса . . . 176
6.3. Орбита, масса, период вращения и физические условия на Марсе . . . 179
6.4. Рельеф равнин планеты . . . 184
6.5. Спящие вулканы и лавовые поля равнин . . . 188
6.6. Каньоны и древние реки Марса . . . 191
6.7. Особенности движения Марса . . . 196
6.8. Потери воды в первую половину истории Марса . . . 196
6.9. Новые гипотезы о природе полярных районов . . . 198
6.10. Автоматические станции на поверхности Марса . . . 200
6.11. Вновь на Марсе . . . 203
6.12. Большой марсианский десант . . . 206
6.13. Поиск жизни на Марсе . . . 210
6.14. Микроокаменелости в метеорите ALH 84001 . . . 216

7. Юпитер . . . 222
7.1. Характеристики Юпитера . . . 222
7.2. Основные свойства планет-гигантов . . . 223

7.3. Большое Красное Пятно 226
7.4. Состав, строение и динамика атмосферы 229
7.5. Вихри в атмосфере Юпитера 231
7.6. Облачный покров и прилегающие слои атмосферы 234
7.6.1. Облака Юпитера. 235
7.7. Первый зонд в атмосфере Юпитера 235
7.8. Внутреннее строение и магнитное поле. 238
7.9. Радиоизлучение Юпитера. 241
7.10. Встреча Юпитера с кометой 243
7.11. Кольцо Юпитера 245

8. Сатурн 247
8.1. Характеристики Сатурна 247
8.2. Пояса, зоны, вихри и ветры 248
8.3. Радиоисточник у 80° с. ш. и магнитосфера Сатурна. 253
8.4. Беспокойные кольца. 256
8.4.1. Кольцо F 262
8.4.2. Гипотезы о структуре колец 262
8.4.3. Споки 265

9. Уран. 269
9.1. Характеристики Урана 269
9.2. Уран по наблюдениям «Вояджера-2». 273
9.3. Новые данные об Уране 276
9.4. Магнитный «штопор» и строение недр 277
9.5. Кольца Урана. 280

10. Нептун 282
10.1. Характеристики Нептуна 282
10.2. Планета-океан? 284
10.3. Различия между Нептуном и Ураном. 285
10.4. Большое Темное Пятно 287
10.5. Беспокойная атмосфера Нептуна. 289
10.6. Наклонный ротатор. 291
10.7. Внутреннее строение Нептуна 292
10.8. Незамкнутые кольца Нептуна. 293

11. Плутон и Харон 296
11.1. Характеристики Плутона и Харона 296
11.2. Происхождение Плутона. 297
11.3. Плутон и Харон 299
11.3.1 Атмосфера Плутона. 301
11.3.2. Харон. 306
11.4. Транснептуновые объекты 308

12. Спутники планет 313
12.1. Введение 313

12.2. Спутники Марса 315
12.3. Спутники Юпитера 321
12.3.1. Ио 323
12.3.2. Европа 324
12.3.3. Ганимед 325
12.3.4. Каллисто 326
12.3.5. Прочие члены системы Юпитера 327
12.4. Кольца и спутники Сатурна 328
12.5. Спутники Урана 338
12.6. Спутники Нептуна 340
12.7. Спутники Плутона 342
12.8. Кольца планет 347
12.9. Заключение 349

13. Пылевые околопланетные комплексы 351
13.1. Введение 351
13.2. Кольцо Сатурна теряет уникальность 353
13.3. Жизнь колец 357
13.4. Где кольца внутренних планет? 359
13.5. Заключение 361

14. Малые тела Солнечной системы 362
14.1. Астероиды 362
14.1.1. Общие сведения 362
14.1.2. Как мог возникнуть Главный пояс астероидов? 375
14.1.3. Орбиты астероидов 376
14.1.4. Астероиды, сближающиеся с Землей 378
14.1.5. О других астероидных поясах 379
14.1.6. О методах исследования астероидов 381
14.1.7. Спектральные типы астероидов 384
14.1.8. О происхождении малых тел 387
14.1.9. О том, чего мы пока не знаем 390
14.2. Кометы 391
14.2.1. История кометной астрономии 391
Предыстория изучения комет 391
Рождение научной кометографии 393
14.2.2. Орбиты комет и их классификация 395
Мини-кометы 398
14.2.3. Форма головы и хвоста кометы 398
Аномальные хвосты 400
14.2.4. Физические процессы в атмосфере кометы 401
14.2.5. Поведение кометы 402
14.2.6. Ядра комет 404
14.2.7. Опасно ли для Земли столкновение с кометой? 412
14.2.8. О происхождении комет и их эволюции 414
14.3. Метеоры и метеориты 417

14.3.1. Метеорные явления и «камни, падающие с неба» 417
14.3.2. «Падающие звезды» — метеоры и болиды 417
14.3.3. Звездопады — метеорные дожди 418
14.3.4. Начало метеоритных исследований 419
14.3.5. Случаи падения метеоритов на территории России 420
14.3.6. Физические явления, вызванные полетом метеороида в атмосфере 423
14.3.7. О метеоритных кратерах и других последствиях падений метеоритов 425
14.3.8. Состав и строение метеоритного вещества 427
14.3.9. Хондриты 428
14.3.10. Дифференцированные метеориты 432
14.3.11. Методы изучения метеоритов и их результаты 435
14.3.12. Сложная история метеоритного вещества 438
14.3.13. Обломки других планет? 440
14.3.14. Лунные и марсианские метеориты 441
14.3.15. Окаменелости древней марсианской жизни? 441
14.3.16. О нерешенных проблемах 443
Полезно знать 444

Именной указатель. . . . . .

Предметный указатель. . . . . .