



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Астрономию с полным правом можно считать старейшей из наук. Со времен глубочайшей древности небо привлекало внимание людей. Постигание закономерностей движения Солнца, Луны, планет дало человечеству математику, механику, физику... Нет ни одной древней цивилизации, представители которой, изучая небо, не создавали бы системы счета времени и календари, упорядочивая и регламентируя таким образом свою жизнь. Развитие человечества на Земле невозможно представить без истории познания неба, построения системы астрономических знаний.

Изучая движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем, астрономия в конечном итоге дает представление о строении и развитии Вселенной в целом. Предметами и объектами исследования в астрономии являются Солнце и звезды, большие и малые планеты и их спутники, кометы и метеорные тела, туманности, звездные системы, а также вся материя и силовые поля, заполняющие межзвездное и межпланетное пространство. В повседневной жизни человек сталкивается с различными системами счета времени, календарными датами и периодами, точками горизонта и географическими картами, ориентированием по Солнцу и звездам. Непосредственно наблюдаются чередование времен года на Земле, смена фаз Луны, приливы и отливы и ряд других явлений, которые оказывают воздействие на многие процессы, происходящие на Земле, и в той или иной мере связаны с окружающим космическим пространством.

Астрономия занимает важное место в системе наук, изучаемых на естественно-научных факультетах университетов. Предметная область астрономии как науки охватывает наиболее общие закономерности природы и базируется в первую очередь на курсах общей и теоретической физики, математики, географии и химии. Курс астрономии призван развить и объединить в логически стройную систему астрономические знания, полученные студентами в средней школе и при изучении физических и математических общих и специальных курсов, а также, используя всю полноту знаний, приобретенных в высшей школе, привести студентов к пониманию современной картины явлений, происходящих во Вселенной, и единства научного знания о мире. В связи с этим, с нашей точки зрения, каждый образованный человек должен обладать некоторым минимумом астрономических знаний, а преподавание астрономии неотделимо от задачи формирования у молодого человека современного целостного научно обоснованного мировоззрения, понимания места и роли человека во Вселенной. Кроме того, в настоящее время, используя новейшие достижения физики и последние технические разработки, астрономия вносит заметный вклад в прикладные науки.

В последние полвека астрономия развивалась особенно бурно, что обусловлено прежде всего научной и практической необходимостью, а также стремительным развитием космонавтики и ракетной техники. Потребности современной цивилизации заставляют человека разрабатывать и совершенствовать теоретическую основу астрономических знаний, методы и средства астрономических наблюдений и экспериментов. Астрономия дает уникальный материал, демонстрирующий изменение места и роли человека в процессе освоения и познания мира, его превращение из стороннего беспомощного наблюдателя, привязанного к поверхности Земли, в активного исследователя многих астрономических и физических явлений, происходящих во Вселенной, деятельный объект физической реальности. Очевидно, что в недалеком будущем успех развития цивилизации будет в основном зависеть от масштабов освоения и использования космических объектов и пространства, а астрономия и смежные с ней отрасли знаний превратятся в непосредственную производительную силу. Уже сейчас остро стоит вопрос о подготовке специалистов в областях, в той или иной степени связанных с астрономией.

Важность астрономических исследований для современной цивилизации подчеркивается объявлением ЮНЕСКО 2009 года Международным годом астрономии. В XXI в. ученые-астрофизики уже шесть раз (в 2002, 2006, 2011, 2017, 2019 и 2020 гг.) становились лауреатами Нобелевской премии по физике.

В связи с этим особенно актуальной, на наш взгляд, является задача повышения уровня астрономических знаний (и в области естествознания в целом) школьников и студентов, особенно естественно-научных специальностей. Заметим, что именно в школе закладывается интерес к определенным дисциплинам и базовый уровень для дальнейшего образования.

В то же время нельзя не отметить, что значительная часть выпускников школ имеют чрезвычайно слабые знания по астрономии. Это объясняется прежде всего недостаточным вниманием в школах к данной дисциплине и отсутствием учителей — специалистов в этой области. Другой причиной (а может быть, и основной) подобного положения дел является очевидная нехватка учебной и научно-популярной литературы, предназначенной для формирования знаний подрастающего поколения. В течение нескольких последних лет остро ощущается дефицит учебников и задачников по астрономии в университетских библиотеках. При этом фундаментальные астрономические и астрофизические открытия последних лет (анизотропия реликтового излучения, темная материя и энергия, экзопланеты и др.) не всегда успевают в полной мере найти отражение в массовых учебных изданиях, а зачастую становятся предметом псевдонаучных спекуляций.

Кроме того, развития астрономического образования требуют и некоторые аспекты социальной жизни общества. Во-первых, недостаток знаний автоматически удовлетворяется за счет разного рода малонаучных теорий (астрологических, оккультных и др.), а во-вторых, непонимание важности внеземного развития человеческой цивилизации приводит к

определенному неприятию космических исследований («Зачем это нужно? Пустая трата сил и средств»). Важность «всеобщей астрономической грамотности» подтверждает и тот факт, что астрономия является, пожалуй, единственной естественно-научной дисциплиной, где до сих пор важную роль играют любительские исследования.

Таким образом, серьезного подхода к астрономическому образованию требуют как научно-производственные, так и социальные аспекты развития современного общества [23]. В то же время можно с уверенностью утверждать, что за последнее десятилетие было издано очень мало учебных пособий для учреждений высшего образования сколько-нибудь заметным тиражом.

Настоящее издание призвано частично компенсировать дефицит учебной литературы для студентов, принимая при этом во внимание развитие научно-методической базы данной дисциплины. Учебник содержит краткий теоретический материал по основным разделам курса общей астрономии: сферической астрономии (измерение времени и др.), небесной механике (определение видимых и действительных положений и движений планет и др.), астрофизике Солнца, звезд и их систем, больших и малых планет Солнечной системы и пр. Теоретическая часть учебника частично опирается на материал учебных и научно-популярных изданий [2, 7, 8, 10–13, 16, 22, 24, 29–33, 35–38, 41–43], а также обзоров [1, 3–6, 17–20, 26–28, 34, 39, 40]. С учетом новейших научных достижений в области астрономии разработаны разделы о космогонии, общей теории относительности, космологии и некоторые другие. Тексты задач сформулированы с учетом результатов современных исследований и реалий сегодняшнего дня. Значительная часть задач представляет собой оригинальные разработки авторов, имеющих многолетний опыт преподавания астрономии в Белорусском государственном университете. Использовались также материалы пособий [9, 14, 15, 21, 25] и олимпиад по астрономии различных уровней. По сравнению с учебным пособием 2016 г. [43] дополнен ряд разделов, учтены научные достижения в области астрономии последних лет, добавлено около 50 задач.

Астериском (звездочкой) «\*» отмечены задачи повышенной трудности. Приводятся ответы и решения задач (некоторые сопровождаются краткими комментариями и указаниями, а задачи повышенной сложности – полными решениями). Приложение включает необходимую справочную информацию. Электронное приложение, доступное по QR-коду, содержит более 1500 изображений (фотографий, схем, рисунков) и более 100 видеобъектов (видеозаписей, компьютерных анимаций и симуляций), которые предназначены для ознакомления с астрономическими явлениями и объектами, а также для подготовки презентаций и демонстрации во время проведения занятий. Содержание приложения подготовлено на основе материалов NASA, Wikipedia, Science Photo Library и некоторых других открытых ресурсов, а также включает оригинальные изображения и видеofilмы авторов пособия.

# ВВЕДЕНИЕ

## Предмет и задачи астрономии. Разделы астрономии

**Астрономия** (от греч. «ἄστρον» — звезда, светило и «νόμος» — закон) — это наука о Вселенной, изучающая расположение, движение, строение, происхождение и эволюцию небесных тел и образованных ими систем. Астрономия исследует Солнце, звезды, планеты и их спутники, астероиды, кометы, метеоры, туманности, звездные системы, вещество и физические поля, заполняющие пространство между звездами и планетами. Основными задачами астрономии являются:

□ изучение видимых на небесной сфере, а затем и действительных положений и движений небесных тел в пространстве, определение их размеров и формы;

□ изучение строения небесных тел, исследование химического состава и физических свойств вещества в них, а также окружающего их пространства;

□ решение проблемы происхождения и эволюции отдельных небесных тел и образуемых ими систем.

Принято выделять три основных раздела астрономии: астрометрию, небесную механику и астрофизику.

**Астрометрия** изучает положение и движение небесных тел и Земли. У астрометрии две важные задачи: установление системы небесных координат и получение параметров, наиболее полно характеризующих закономерности движения небесных тел и вращения Земли (в частности, измерение времени).

**Небесная механика** изучает движение небесных тел под действием тяготения, разрабатывает методы определения их орбит, позволяет рассчитать координаты тел на дальнейшее время (эфемериды), рассматривает движение и устойчивость систем естественных и искусственных небесных тел.

**Астрофизика** изучает происхождение, строение, химический состав, физические свойства и эволюцию как отдельных тел, так и их систем, вплоть до Вселенной в целом. Астрофизика подразделяется на практическую и теоретическую.

## Общее представление о структуре и масштабах Вселенной и физическом состоянии материи во Вселенной

Планета Земля, на которой в настоящее время существует жизнь и человеческая цивилизация, — это небесное тело практически сфериче-

ской формы, одна из планет Солнечной системы, обращающаяся вокруг центральной звезды – Солнца. Средний радиус орбиты Земли равен примерно 149,6 млн км, или 1 а.е.

В состав **Солнечной системы** также входят другие планеты, карликовые планеты, астероиды, спутники планет, карликовых планет и астероидов, кометы, метеоритные тела, космическая пыль, газ, частицы космических лучей.

Центральное тело Солнечной системы, **Солнце**, представляет собой типичную звезду спектрального класса G2V, желтый карлик, находящийся на стадии главной последовательности. Звезды (в широком смысле) – это находящиеся в состоянии гидростатического равновесия небесные тела, в которых происходили, происходят или будут происходить термоядерные реакции. Однако чаще всего под **звездой** понимают газоплазменный объект, форма которого близка к сферической и в недрах которого в настоящее время идут термоядерные реакции. Масса Солнца составляет 99,8% от массы всей Солнечной системы.

Вокруг Солнца по орбитам, форма которых близка к окружности, обращаются восемь планет (в порядке удаления от Солнца): Меркурий, Венера, Земля, Марс (планеты земной группы, или земли), Юпитер, Сатурн (газовые гиганты, или юпитеры), Уран и Нептун (ледяные гиганты, или непуны). Средний радиус орбиты Меркурия равен 0,38 а.е., Венеры – 0,72, Земли – 1, Марса – 1,62, Юпитера – 5,20, Сатурна – 9,54, Урана – 19,19, Нептуна – 30,07 а.е. (более точные и подробные данные о планетах приведены в Приложении).

Под **планетой** (этот класс объектов, чтобы подчеркнуть их особый статус, часто называют **классическими планетами**) в настоящее время принято понимать небесное тело, которое:

- обращается вокруг звезды и при этом само не является звездой;
- обладает достаточной массой, чтобы иметь форму, близкую к сферической;
- очищает соседнее пространство вокруг своей орбиты (т.е. рядом с планетой вдоль ее орбиты нет других сравнимых с ней (или крупнее) тел).

У большинства планет имеются естественные спутники. **Спутником** называют объект, обращающийся вокруг центрального тела (планеты, карликовой планеты или астероида) так, что барицентр его орбиты (центр масс системы) находится внутри центрального тела. Если барицентр орбиты находится вне центрального тела, то объект считается компонентом системы, состоящей из двух или нескольких планет (карликовых планет, астероидов).

У Меркурия и Венеры нет естественных спутников. У Земли один естественный спутник – Луна. Барицентр орбиты Луны находится на расстоянии примерно 4700 км от центра Земли (средний радиус Земли

равен 6400 км). У Марса два спутника — Фобос и Деймос. У Юпитера на момент написания этой книги известно 79 спутников, у Сатурна — 82, у Урана — 27, у Нептуна — 14. Все планеты-гиганты обладают также системами колец (наиболее развитая система наблюдается у Сатурна), состоящих из мелких частиц и пыли.

Между орбитами Марса и Юпитера (в основном на расстояниях от 2,2 до 3,6 а.е. от Солнца) находится *Главный пояс астероидов*. Количество астероидов диаметром более 1 км в Главном поясе оценивается почти в 2 млн. Однако общая масса всех астероидов Главного пояса составляет всего около 4% от массы Луны (или примерно  $5 \cdot 10^{-4}$  массы Земли), причем на Церере (карликовую планету) и три крупнейших астероида — Весту, Палладу и Гигею — приходится чуть больше половины (51%) массы всех астероидов Главного пояса. Таким образом, большая часть астероидов имеет ничтожную массу. При столкновениях между собой астероиды дробятся и разрушаются. В результате этого пространство в области Главного пояса астероидов заполнено роем твердых обломков размером от долей микрометра до самых больших астероидов (диаметр Паллады составляет 500 км). Выбрасываемые гравитационными возмущениями на новые орбиты, такие тела, если сталкиваются с Землей, выпадают на ее поверхность в виде метеоритов.

За пределами орбиты Нептуна, на расстояниях примерно 40–50 а.е. от Солнца, располагаются малые тела, принадлежащие так называемому *поясу Койпера*, или транснептуновые объекты (ТНО). Пояс Койпера открыт в 1992 г. Эта область Солнечной системы подобна Главному поясу астероидов, но примерно в 20 раз больше по протяженности и (оценочно) в 20–200 раз — по массе. В отличие от каменных и металлических астероидов Главного пояса ТНО состоят в основном из замороженного метана, аммиака и воды. Пояс Койпера включает как минимум четыре из пяти известных к моменту написания этой книги карликовые планеты — Плутон, Эриду, Хаумеа и Макемаке.

Под *карликовой планетой* понимают небесное тело, которое:

- обращается по орбите вокруг звезды;
- имеет достаточную массу для того, чтобы под действием сил гравитации поддерживать гидростатическое равновесие и иметь форму, близкую к сферической;
- не доминирует на своей орбите, т.е. не может расчистить пространство от других объектов вокруг своей орбиты;
- не является спутником каких-либо других, кроме центральной звезды, небесных тел.

Термин «карликовая планета» был принят на XXVI Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (МАС, или IAU — International Astronomical Union) в августе 2006 г. в рамках классифика-

ции обращающихся вокруг Солнца тел на три категории. Тела, достаточно большие для того, чтобы расчистить окрестности своей орбиты, определены как планеты, а недостаточно большие, чтобы достичь даже гидростатического равновесия (т.е. не имеющие сферической формы), — как малые тела Солнечной системы. Карликовые планеты занимают промежуточное положение между этими двумя категориями. Предполагается, что по меньшей мере около 40 из известных объектов в Солнечной системе могут принадлежать к категории карликовых планет.

У Плутона известно пять спутников: большой спутник Харон, а также четыре малых — Гидра, Никта, Кербер (открыт в июне 2011 г.) и Стикс (открыт в июне 2012 г.). Барицентр системы Плутон — Харон находится вне поверхности Плутона, поэтому Плутон и Харон считают двойной планетой (двойной планетной системой). Еще у двух карликовых планет — Хаумеа и Эриды — также имеются спутники.

К *малым телам* Солнечной системы отнесены все обращающиеся вокруг Солнца объекты, кроме классических и карликовых планет и их спутников. В эту категорию входят классические, «тройанские» и другие астероиды Главного пояса, большинство ТНО и кометы.

В настоящее время известно более 1000 транснептуновых объектов, и предполагается, что всего в поясе Койпера их может быть более 70 000 диаметром около 100 км.

Сфера гравитационного влияния Солнца простирается гораздо дальше пояса Койпера (на расстоянии во много тысяч астрономических единиц). В настоящее время предполагается, что внутренняя часть Солнечной системы окружена так называемым облаком Оорта, существование которого пока не подтверждено наблюдениями. Объекты в облаке Оорта должны состоять в значительной степени из водяных, аммиачных и метановых льдов. Здесь расположены афелии орбит долгопериодических комет. Иногда под действием различных гравитационных возмущений объекты облака Оорта покидают эту область и попадают во внутренние области Солнечной системы, где могут достигать орбит Земли и других планет. Предполагаемое расстояние до внутренних границ облака Оорта от Солнца составляет около 20 тыс. а.е., а до внешних — от 50 до 100 тыс. а.е., т.е. около одного светового года (1 св. год — это расстояние, которое свет в вакууме проходит за 1 год (365,25 средних солнечных суток), распространяясь со скоростью 299792,458 км/с; 1 св. год  $\approx$  9460,7 млрд км, или 63,2 тыс. а.е.). Внешняя граница облака Оорта определяет гравитационную границу Солнечной системы.

Кроме того, в Солнечной системе существует ряд компонентов, чрезвычайно важных для понимания ее формирования и современного состояния: пылевые частицы; электромагнитное излучение Солнца во всем диапазоне длин волн; солнечный ветер (поток горячей квазинейтральной



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	6
<b>ГЛАВА 1. Сферическая астрономия .....</b>	<b>16</b>
1.1. Небесная сфера. Системы небесных координат. Преобразование координат .....	16
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	24
<i>Примеры решения задач</i> .....	25
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	27
1.2. Измерение времени. Системы счета времени .....	30
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	36
<i>Примеры решения задач</i> .....	36
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	37
1.3. Подвижная карта звездного неба .....	39
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	41
<i>Примеры решения задач</i> .....	41
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	42
1.4. Факторы, влияющие на положение светил на небесной сфере .....	43
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	51
<i>Примеры решения задач</i> .....	52
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	53
1.5. Задачи практической астрономии .....	54
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	58
<i>Примеры решения задач</i> .....	58
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	60
<b>ГЛАВА 2. Небесная механика .....</b>	<b>62</b>
2.1. Видимые и действительные движения планет .....	62
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	75
<i>Примеры решения задач</i> .....	76
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	77
2.2. Движение Земли и Луны .....	86
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	89
<i>Примеры решения задач</i> .....	90
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	91
2.3. Движение искусственных тел .....	94
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	96
<i>Примеры решения задач</i> .....	97
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	98

<b>ГЛАВА 3. Основы астрофизики</b> .....	103
3.1. Астрофизика планет и звезд .....	103
3.1.1. Земля – планета Солнечной системы .....	103
3.1.2. Другие планеты Солнечной системы .....	114
3.1.3. Планеты у других звезд (экзопланеты) .....	120
3.1.4. Астрофизика Солнца и других звезд .....	124
3.1.5. Галактическая астрофизика .....	157
3.1.6. Элементы космогонии .....	163
3.1.7. Элементы космологии и общей теории относительности .....	173
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	206
<i>Примеры решения задач</i> .....	207
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	208
3.2. Астрофизические приборы .....	234
<i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....	238
<i>Примеры решения задач</i> .....	239
<i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....	240
Ответы и решения .....	244
Приложение .....	328
Литература .....	348