

А.П. Клищенко, В.И. Шупляк

Астрономия

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



А.П. Клищенко
В.И. Шупляк

Астрономия

Учебное пособие



МОСКВА ООО «НОВОЕ ЗНАНИЕ» 2004

УДК 52(075.8)

ББК 22.6я73

К49

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор кафедры ядерной физики

Белорусского государственного университета *В.В. Тихомиров*;

старший преподаватель кафедры методики преподавания физики физического факультета
Белорусского государственного педагогического университета им. М. Танка *А.А. Шимбалева*

Клищенко А.П.

К49 **Астрономия: Учеб. пособие / А.П. Клищенко, В.И. Шупляк. — М.: Новое знание, 2004. — 224 с.: ил.**

ISBN 5-94735-050-5.

Кратко и емко изложен учебный курс астрономии для вузов. Несомненным достоинством является наличие большого количества задач с примерами решения и ответами. Это позволяет применять учебное пособие и для самоподготовки, и в качестве задачника на практических занятиях. При подготовке материала авторы использовали результаты астрономических исследований последних лет.

Для студентов и преподавателей вузов, а также для школьников и учителей средних школ, интересующихся современной астрономией и астрофизикой.

УДК 52(075.8)

ББК 22.6я73

ГЛАВА 1. СФЕРИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

1.1. Небесная сфера. Системы небесных координат. Преобразование координат

Небесной сферой называется воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в выбранной точке наблюдения. На поверхности этой сферы светила расположены так, как они видны на небе в некоторый момент времени из данной точки пространства. Чтобы правильно представить себе астрономическое явление, следует считать, что радиус небесной сферы намного больше радиуса Земли ($R_{\text{сф}} \gg R_{\text{З}}$), т.е. полагать, что наблюдатель находится в центре небесной сферы, причем одна и та же точка (одна и та же звезда) видна из разных мест земной поверхности по параллельным направлениям.

Под *небесным сводом*, или *небом*, понимают внутреннюю поверхность небесной сферы, на которую проецируются небесные тела. Для наблюдателя на Земле днем на небе видно Солнце, иногда Луна, реже — Венера. В безоблачную ночь видны звезды, Луна, планеты, иногда кометы и другие тела. Видимых невооруженным глазом звезд порядка 6000. Взаимное расположение звезд почти не изменяется из-за большого расстояния до них. Положение небесных тел, которые относятся к Солнечной системе, изменяется относительно звезд и друг друга, что определяется их заметным угловым, а также линейным суточным и годовым смещением.

Небесный свод вращается как единое целое с находящимися на нем светилами около воображаемой оси. Это вращение суточное. Если наблюдать суточное вращение звезд в северном полушарии Земли, стоя к северному полюсу лицом, то небо будет вращаться против часовой стрелки. На востоке звезды восходят, на западе заходят. Каждая звезда восходит и заходит в одних и тех же точках горизонта. Максимальная высота для каждой звезды в данной местности постоянна. Некоторые звезды не заходят, а описывают полные круги (за сутки) над горизонтом, вращаясь вокруг неподвижной точки (северного полюса мира). Солнце и Луна восходят и заходят в течение суток. В отличие от звезд, это происходит в разных точках горизонта в течение года. С помощью наблюдений можно заметить, что Луна, перемещаясь на фоне звезд, передвигается с запада на восток со скоростью около 13° в сутки и совершает полный круг по небу за 27,32 сут. Солнце также проходит этот путь, но в течение года, перемещаясь со скоростью $59'$ в сутки.

Яркие звезды объединены в созвездия. Всего на небе 88 созвездий. Из них 56 может видеть наблюдатель, находящийся в средних широтах северного полушария Земли. Все созвездия имеют названия. Одни из них связаны с названиями животных (Большая Медведица, Лев, Дракон), другие — с именами героев греческих мифов (Кассиопея, Андромеда, Персей) или названиями предметов, очертания которых они напоминают (Северная Корона, Треугольник, Весы). Некоторые звезды

в созвездиях обозначаются буквами греческого алфавита, а наиболее яркие (около 200) получили имена собственные (например, α Большого Пса — Сириус, α Орiona — Бетельгейзе, β Персея — Алголь, α Малой Медведицы — Полярная звезда, около которой находится точка северного полюса мира). Пути Солнца и Луны на фоне звезд почти совпадают и проходят по двенадцати созвездиям, которые называются зодиакальными, поскольку большинство из них носят названия животных (от греч. «зоон» — животное). Это созвездия Овна, Тельца, Близнецов, Рака, Льва, Девы, Весов, Скорпиона, Стрельца, Козерога, Водолея и Рыб.

На рис. 1.1 показаны основные точки и линии небесной сферы. Центр O небесной сферы — точка наблюдения. Прямая ZOZ' , которая совпадает с направлением нити отвеса в месте наблюдения, называется отвесной или вертикальной линией. Отвесная линия пересекается с поверхностью небесной сферы в двух точках: в *зените* Z над головой наблюдателя и в диаметрально противоположной точке Z' — *надире*. Большой круг небесной сферы ($SWNE$), плоскость которого перпендикулярна отвесной линии, называется *математическим* или *истинным горизонтом*. Математический горизонт — плоскость, касательная к поверхности Земли в точке наблюдения.

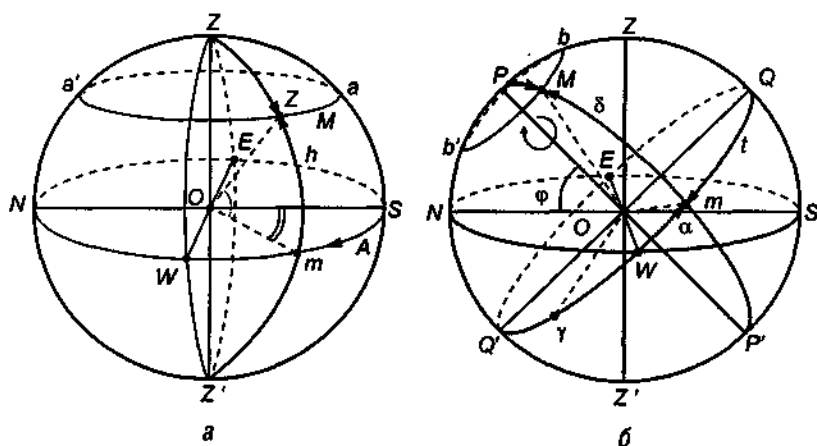


Рис. 1.1. Основные точки и линии небесной сферы и связанные с ними системы небесных координат: а — горизонтальная система координат; б — первая и вторая экваториальные системы координат

Следует отметить, что истинный горизонт отличается от видимого. На ровной земной поверхности видимый горизонт представляет собой малый круг, на который опирается конус, образованный касательными к поверхности Земли лучами зрения наблюдателя. На ровной местности видимый горизонт ниже истинного (рис. 1.2).

Так как $H \ll 2R_c$, то $d = \sqrt{2R_c H}$. Если $R_c = 6\,371\,000$ м и H измерять в метрах, а d — в километрах, то $d = 3,57\sqrt{H}$, а с учетом рефракции в атмосфере $d = 3,80\sqrt{H}$.

С другой стороны (рис. 1.2), $d = R_c \cdot \lg \sigma = \sqrt{2R_c H}$. В итоге получаем значение σ (угл. мин): $\sigma' \approx 1', 93\sqrt{H}$, а с учетом рефракции $\sigma' \approx 1', 77\sqrt{H}$.

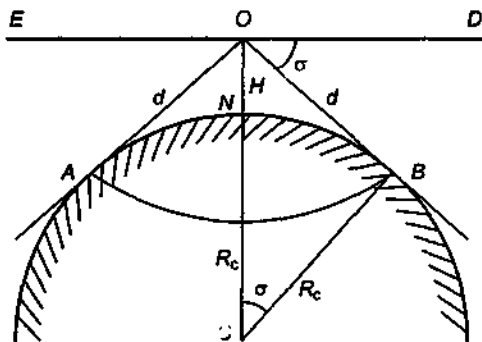


Рис. 1.2. Понижение видимого горизонта: ON — наблюдатель высотой H ; C, R_c — центр и средний радиус Земли; OA, OB — лучи зрения наблюдателя; AB — видимый горизонт; EOD — плоскость истинного горизонта; d — расстояние до видимого горизонта; σ — угол понижения видимого горизонта

Малый круг небесной сферы (aMa'), проходящий через светило M , плоскость которого параллельна плоскости математического горизонта, называется *альмукантаратом* светила (см. рис. 1.1). Большой полуокруг небесной сферы ZMZ' называется *кругом высоты*, *вертикальным кругом* или просто *вертикалом* светила.

Диаметр PP' , вокруг которого происходит вращение небесной сферы, называется *осью мира*. Она пересекается с поверхностью небесной сферы в двух точках: в *северном полюсе мира* P , со стороны которого небесная сфера вращается по часовой стрелке, если смотреть на сферу извне, и в *южном полюсе мира* P' . Ось мира наклонена к плоскости математического горизонта под углом, который равен географической широте точки наблюдения φ . Большой круг небесной сферы $QWQ'E$, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется *небесным экватором*. Малый круг небесной сферы (bMb'), плоскость которого параллельна плоскости небесного экватора, называется *небесной* или *суточной параллелью* светила M . Большой полуокруг небесной сферы PMP' называется *часовым кругом* или *кругом склонения* светила.

Небесный экватор пересекается с математическим горизонтом в двух точках: в точке *востока* E и в точке *запада* W . Круги высот, которые проходят через точки востока и запада, называются *первыми вертикалами* (восточным и западным).

Большой круг небесной сферы $PZQSP'Z'Q'N$, плоскость которого проходит через отвесную линию и ось мира, называется *небесным меридианом*. Плоскость небесного меридиана пересекается с плоскостью математического горизонта по прямой NOS , которая называется *полуденной линией*. Небесный меридиан пересекается с математическим горизонтом в точке *севера* N и в точке *юга* S . Небесный

меридиан пересекается с небесным экватором также в двух точках: в *верхней точке экватора* Q , которая ближе к зениту, и в *нижней точке экватора* Q' , которая ближе к надиру.

В *горизонтальной системе небесных координат* основной плоскостью является плоскость математического горизонта $NWSE$ (см. рис. 1.1, а).

Одной координатой является или *зенитное расстояние* z или *высота светила* над горизонтом h . Высотой h светила M называется дуга вертикального круга mM от математического горизонта до светила, или центральный угол mOM (в плоскости вертикального круга). Высота рассчитывается в пределах $0...+90^\circ$ (к зениту) и $0...-90^\circ$ (к надиру). Зенитное расстояние z светила M — дуга вертикального круга ZM от зенита до светила или центральный угол ZOM . Зенитное расстояние определяют в пределах $0...180^\circ$ в направлениях от зенита к надиру, отсюда $z + h = 90^\circ$.

Другой координатой в этой системе координат является *азимут* A . Азимут A светила M называется дуга математического горизонта Sm от точки юга S до вертикального круга, проходящего через светило, или центральный угол SOM (в плоскости математического горизонта). Азимуты отсчитываются в сторону суточного вращения небесной сферы, т.е. к западу от точки юга S , в пределах $0...360^\circ$.

В *первой экваториальной системе координат* основной является плоскость небесного экватора $QWQ'E$ (см. рис. 1.1, б). Одна координата здесь — *склонение* светила δ . Склонением δ светила M называется дуга mM часового круга $PMmP'$ от небесного экватора до светила, или центральный угол mOM (в плоскости часового круга). Отсчитывается в пределах $0...+90^\circ$ к северному полюсу мира и $0...-90^\circ$ к южному. Иногда склонение заменяют полярным расстоянием p (также дуга PM или центральный угол POM). Отсчитывается в пределах $0...180^\circ$ от северного полюса мира к южному, отсюда $p + \delta = 90^\circ$.

Другой координатой в этой системе координат является *часовой угол* t светила M — дуга небесного экватора Qt от верхней точки Q небесного экватора до часового круга $PMmP'$, проходящего через светило, или центральный угол QOm (в плоскости небесного экватора). Часовые углы отсчитываются в сторону суточного вращения небесной сферы, т.е. к западу от верхней точки Q небесного экватора, в пределах $0...360^\circ$ или $0...24^h$.

Во *второй экваториальной системе координат* основная плоскость и склонение δ те же, что и в первой экваториальной системе. Другой координатой, определяющей положение часового круга светила, является *прямое восхождение* α . Прямым восхождением α светила M называется дуга небесного экватора Υm от точки весеннего равноденствия Υ до часового круга, проходящего через светило, или центральный угол ΥOm (в плоскости небесного экватора). Прямые восхождения α отсчитываются в сторону, противоположную суточному вращению небесной сферы, т.е. к востоку от Υ , в пределах $0...360^\circ$ или $0...24^h$.

Поскольку ось мира параллельна оси вращения Земли, высота полюса мира h_p над горизонтом всегда равна географической широте φ места наблюдения, а наклон небесного экватора к истинному горизонту определяется углом $90^\circ - \varphi$.

С помощью наблюдений нетрудно установить, что Солнце в течение года перемещается среди звезд с запада на восток по большому кругу небесной сферы, который называется *эклиптикой*. Плоскость эклиптики $\xi'\Upsilon\xi$ (рис. 1.3) наклонена к плоскости небесного экватора под углом $\varepsilon = 23^\circ 26'$. Диаметр PP' , перпендикулярный плоскости эклиптики, называется *осью эклиптики* и пересекается с поверхностью небесной сферы в *северном* P (в северном полушарии) и *южном* P' (в южном полушарии) *полюсах эклиптики*. Эклиптика пересекается с небесным экватором в двух точках: в *точке весеннего равноденствия* Υ и в *точке осеннего равноденствия* Ω .

Точки эклиптики, отстоящие от точек равноденствия на 90° , называются *точкой летнего* ξ (в северном полушарии) и *зимнего* ξ' (в южном полушарии) *солнцестояния*. Большой полукруг небесной сферы PMQ называется *кругом широты светила* M .

Эклиптики $\xi'\Upsilon\xi$ и Υ положены в основу эклиптической системы небесных координат. Одна координата — *эклиптическая широта* β светила M , которой называется дуга круга tM от эклиптики до светила, или центральный угол tOM (рис. 1.3). Эклиптические широты отсчитываются от 0 до $+90^\circ$ к P и от 0 до -90° к P' .

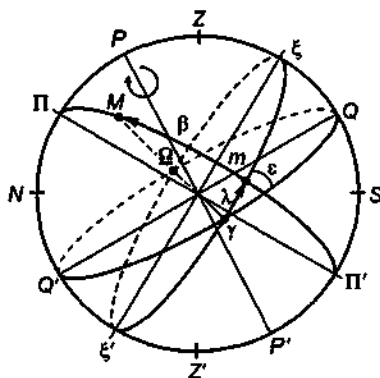


Рис. 1.3. Основные точки и линии небесной сферы, связанные с эклиптической системой небесных координат

Другая координата — *эклиптическая долгота* λ , которая определяет положение самого круга широты на небесной сфере. Эклиптическая долгота λ светила M — дуга Υm эклиптики от Υ до круга широты светила, или центральный угол ΥOm в плоскости эклиптики. Эклиптическая долгота отсчитывается в сторону видимого годичного движения Солнца по эклиптике, т.е. с запада на восток, от 0 до 360° .

Рассмотрев *параллактический треугольник* (треугольник на небесной сфере), образованный пересечением небесного меридиана, вертикального круга и часового круга светила, вершинами которого являются полюс мира P , зенит Z и светило M , а также с помощью основных уравнений сферической тригонометрии можно получить формулы пересчета горизонтальных координат в экваториальные, и наоборот:

$$\begin{cases} \sin \delta = \sin \varphi \cdot \cos z - \cos \varphi \cdot \sin z \cdot \cos A, \\ \cos \delta \cdot \sin t = \sin z \cdot \sin A, \\ \cos \delta \cdot \cos t = \cos \varphi \cdot \cos z + \sin \varphi \cdot \sin z \cdot \cos A; \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t, \\ \sin z \cdot \sin A = \sin t \cdot \cos \delta, \\ \sin z \cdot \cos A = -\cos \varphi \cdot \sin \delta + \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t. \end{cases} \quad (1.2)$$

За сутки светило дважды пересекает небесный меридиан — южную половину ($t = 0^h$, что соответствует его наивысшему положению над горизонтом) и северную половину ($t = 12^h$, что соответствует нижнему положению относительно горизонта). Эти моменты прохождения небесного меридиана называются *верхней* и *нижней кульминациями*. Используя формулы (1.1), (1.2), можно определить условия видимости для данной широты местности φ определенного светила со склонением δ и звездного неба в целом. Светило будет *незаходящим* в данной местности с широтой φ , если его высота $h_{\text{нк}}$ в нижней кульминации больше 0° ($h_{\text{нк}} \geq 0^\circ$ или $z_{\text{нк}} \leq 90^\circ$). *Невосходящими* будут небесные объекты, для которых $h_{\text{вк}} \leq 0^\circ$ или $z_{\text{вк}} \geq 90^\circ$. Значения h и z можно посредством формул (1.1), (1.2) связать с δ и таким образом определить условия незаходящих и невосходящих светил. Если $\delta \geq (90^\circ - \varphi)$, то светило не заходит ($h_{\text{нк}} \geq 0^\circ$), а если $\delta \leq -(90^\circ - \varphi)$, то оно не восходит в течение суток над горизонтом на данной широте φ в северном полушарии Земли ($\varphi > 0$).

Все светила со склонениями δ в пределах $-(90^\circ - \varphi) \dots (90^\circ - \varphi)$ восходят и заходят в данной местности. Таким образом, анализ взаимосвязи между δ и φ для верхней и нижней кульминаций позволяет установить вид звездного неба на любой географической широте. На рис. 1.4, а представлен вид звездного неба на широте φ , которая отличается от 0 и 90° . Здесь обозначены суточные параллели светил, которые не заходят (ll), не восходят (kk), а также восходят и заходят (aa , QQ' , bb) в данной местности. Заштрихованные участки на рис. 1.4, б обозначают области небесной сферы с незаходящими (северное полушарие) и невосходящими (южное полушарие) светилами. Незаштрихованная часть круга обозначает область светил, которые восходят и заходят. Нетрудно убедиться, что на северном полюсе ($\varphi = 90^\circ$) наблюдателю будет видна только северная половина небесной сферы,

а все ее светила будут незаходящими; на экваторе ему будет видна вся небесная сфера, а светила на ней будут восходяще-заходящими.

Поскольку Солнце, Луна и большинство планет движутся по эклиптике (или вблизи нее), которая находится под углом к небесному экватору, то склонение δ этих небесных объектов изменяется со временем, из-за чего условия наблюдения также изменяются. Склонение Солнца в течение года изменяется в пределах $-23^\circ 26' \leq \delta \leq +23^\circ 26'$. Это приводит к смене сезонов (времен года) и существованию *тепловых поясов* на Земле.

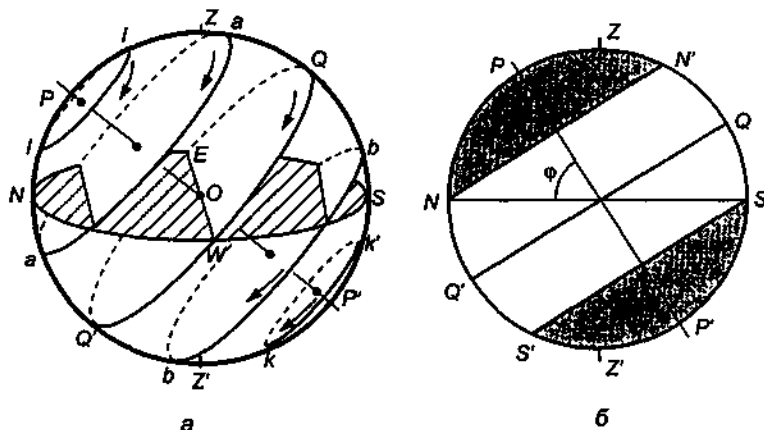


Рис. 1.4. Суточное движение светил на небесной сфере для широты φ : а — суточные параллели незаходящих (II), невосходящих (kk), а также восходящих и заходящих (aa, QQ', bb) светил в данной местности; б — области небесной сферы с незаходящими (заштрихованная часть, северное полушарие) и невосходящими (заштрихованная часть, южное полушарие) светилами

Смена времен года связана с *тропическим*, или *солнечным*, годом. Это промежуток времени между двумя последовательными моментами, когда Солнце проходит точку весеннего равноденствия Υ ($Y_{\Upsilon} = 365^d 5^h 48^m 56^s = 365^d,2422$).

В период между весенним и осенним равноденствием северный полюс Земли наклонен к Солнцу. Между днями осеннего и весеннего равноденствия все наоборот. Границы тепловых (климатических) поясов на Земле проведены по астрономическим признакам. В *жарком поясе* Солнце в истинный полдень проходит через зенит в местностях, где $\varphi = \delta$ в этот день. Так как $\delta_{\max} = \varepsilon = \pm 23^\circ 26'$ для Солнца, то и границы пояса (*тропики*) расположены на географических параллелях с $\varphi = \delta = \varepsilon \pm 23^\circ 26'$. В зените северного тропика ($\varphi = +23^\circ 26'$) Солнце находится в день летнего солнцестояния, в зените южного тропика ($\varphi = -23^\circ 26'$) — в день зимнего солнцестояния. На земном экваторе в полдень Солнце проходит через зенит в дни равноденствия. *Холодные пояса* ограничены *полярными кругами*, т.е. географическими параллелями, положение которых определяется условиями

незаходящего и невосходящего Солнца при $\delta = \varepsilon$, т.е. $\varphi = \pm(90^\circ - \varepsilon) = \pm 66^\circ 34'$. В этих поясах Солнце является невосходящим или незаходящим более одних суток в году (на полюсах это явление длится полгода). *Умеренные пояса* находятся между широтами $+23^\circ 26' \leq \varphi \leq +66^\circ 34'$ (северный) и $-23^\circ 26' \geq \varphi \geq -66^\circ 34'$ (южный).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Каковы основные линии и точки небесной сферы?
2. Как расположены основные линии и точки небесной сферы, если наблюдатель стоит лицом к северу?
3. Почему путь по эклиптике Луна проходит за 27,32 сут., а Солнце — за год?
4. С какими явлениями на небесной сфере связаны понятия «полдень» и «полночь»?
5. Почему по знаку склонения светила нельзя определить, заходящее оно или незаходящее?
6. Почему звезды всегда восходят и заходят в одних и тех же точках горизонта, а Солнце и Луна — нет?
7. Почему прямое восхождение α отсчитывается от точки весеннего равноденствия в сторону, противоположную направлению вращения небесной сферы?
8. При каких условиях и где на Земле высота звезды над горизонтом в течение суток не изменяется?
9. Составьте таблицу взаимосвязи между значениями прямого восхождения, выраженными в угловой и часовой мере.
10. Предложите способ определения координат Солнца в течение года.

Примеры решения задач

Задача 1. Незаходящая звезда находится на высоте 20° в нижней кульминации и 50° — в верхней. Определите склонение этой звезды и широту места наблюдения.

Решение. Задача имеет два решения в зависимости от того, где будет выбрано положение верхней кульминации: к северу или к югу от зенита.

Пусть верхняя кульминация наблюдалась к северу от зенита. Тогда с помощью рис. 1.4, а можно составить систему уравнений:

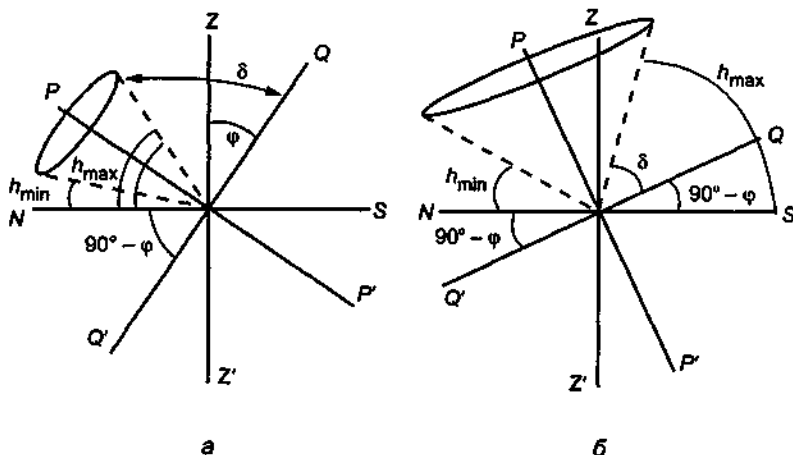
$$\begin{cases} \delta = 90^\circ - \varphi + h_{\min}, \\ 180^\circ = 90^\circ - \varphi + h_{\max} + \delta \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \delta = 110^\circ - \varphi, \\ \varphi = \delta - 40^\circ. \end{cases}$$

$$\text{Следовательно, } \begin{cases} \delta = 75^\circ, \\ \varphi = 35^\circ. \end{cases}$$

Пусть верхняя кульминация наблюдалась к югу от зенита. Тогда согласно приведенному ниже рисунку (б) можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \delta = 90^\circ - \varphi + h_{\min}, \\ \delta = h_{\max} - (90^\circ - \varphi) \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \delta = 110^\circ - \varphi, \\ \delta = \varphi - 40^\circ. \end{cases}$$

Следовательно, $\begin{cases} \delta = 35^\circ, \\ \varphi = 75^\circ. \end{cases}$



a

b

Задача 2. Экваториальный спутник S должен пройти над щитом P с координатами $\lambda = -105^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ на геоцентрическом расстоянии $R_{sp} = 42\,190$ км (см. рисунок, а). В это время спутник будут наблюдать на станции T в пункте с координатами $\lambda_0 = -6^\circ$, $\varphi = 40^\circ$. Определите горизонтальные координаты спутника в этот момент времени в пункте T .

Решение. Для дальнейших выводов и рассуждений нужны формулы сферической тригонометрии:

$$\cos(c) = \cos(a) \cdot \cos(b) + \sin(a) \cdot \sin(b) \cdot \cos(C),$$

$$\sin(c) \cdot \cos(A) = \sin(b) \cdot \cos(a) - \cos(b) \cdot \sin(a) \cdot \cos(C),$$

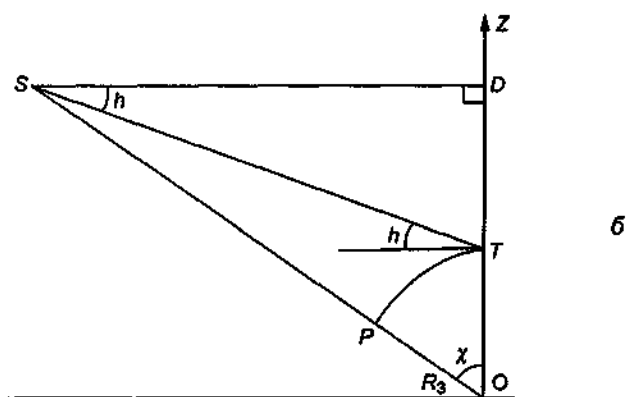
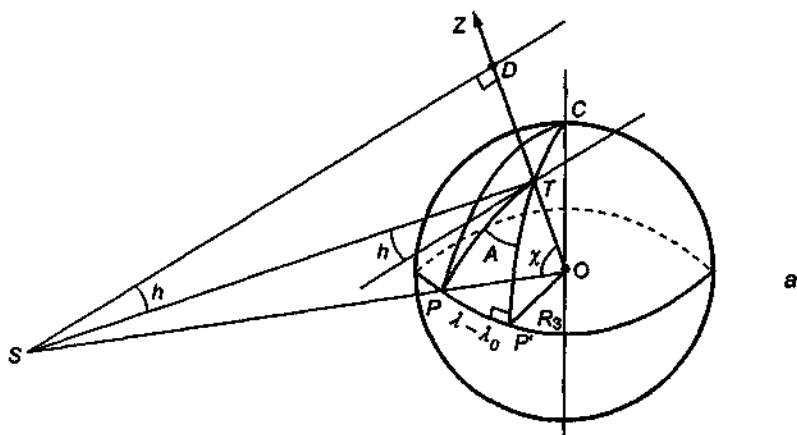
$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C},$$

где a, b, c — стороны сферического треугольника; A, B, C — соответствующие им противолежащие углы.

На рисунке (а) видно, что $\triangle PTP'$ прямоугольный, а $\angle PP'T$ прямой. Если это угол C (см. формулы выше), то $\cos(PT) = \cos(P'T) \cdot \cos(PP') = \cos\varphi_0 \cdot \cos(\lambda - \lambda_0) = \cos 40^\circ \cdot \cos 15^\circ = 0,75$. Следовательно, $\angle PT = \angle \chi = 42^\circ, 27$.

Из теоремы синусов, учитывая, что $\angle PP'T = 90^\circ$, получаем выражение для азимута A :

$$\frac{\sin(\lambda - \lambda_0)}{\sin A} = \frac{\sin \chi}{1} \Rightarrow \sin A = \frac{\sin(\lambda - \lambda_0)}{\sin \chi} = \frac{\sin 15^\circ}{\sin 42^\circ, 27} = 0,39 \Rightarrow A = 22^\circ, 7.$$



Высоту h над горизонтом легко определить с помощью рисунка (б):

$$\operatorname{tg}(h) = \frac{DT}{SD} = \frac{OD - OT}{SD} = \frac{R_{\text{св}} \cos \chi - R_3}{R_{\text{св}} \sin \chi} = 0,88 \Rightarrow h = 41^\circ, 31'.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Выразите прямое восхождение звезд $2^{\text{h}}10^{\text{m}}09^{\text{s}}$ в градусной мере.
2. Полярное расстояние звезды равно $20^\circ15'$. Каково ее зенитное расстояние в Вологде ($\varphi = 59^\circ13'$) в момент нижней кульминации?
3. Чему равно звездное время, если звезда с прямым восхождением $22^{\text{h}}08^{\text{m}}24^{\text{s}}$ имеет часовой угол $126^\circ11'28''$?
4. 22 июня Солнце кульминирует в верхней кульминации. Каков часовой угол звезды в данный момент, если $\alpha = 12^{\text{h}}24^{\text{m}}$?
5. 23 сентября звезда с $\alpha = 45^\circ00'$ и $\delta = 0$ имеет часовой угол $t = 13^{\text{h}}30^{\text{m}}$. Вычислите солнечное время.

6. В некотором пункте Солнце 18 февраля находилось в полдень на высоте 20° . Определите широту местности.

7. 21 марта Солнце было в нижней кульминации, а звезда имела часовой угол $t = 3^h 12^m$. Определите α звезды.

8. Какова максимальная высота Солнца над горизонтом 10 апреля в пункте, который находится на широте $\varphi = 20^\circ$?

9. Определите высоту Солнца над горизонтом в Минске в полдень 20 мая ($\varphi = 53^\circ 55'$).

10. 23 сентября Солнце заходит, а звезда находится в верхней кульминации. Определите ее α .

11. 23 сентября Солнце заходит, а звезда имеет часовой угол $6^h 30^m$. Вычислите ее α .

12. 21 марта Солнце имеет часовой угол $t = 6^h 00^m$. Каков часовой угол звезды в данный момент, если ее $\alpha = 96^\circ 23' 18''$?

13. 22 декабря Солнце находилось в нижней кульминации, а звезда имела часовой угол $t = 3^h 12^m$. Вычислите α звезды.

14. Определите широту местности, до которой 10 декабря Солнце не будет восходить над горизонтом.

15. 22 июня Солнце кульминирует в верхней кульминации. Найдите часовой угол звезды в данный момент, если $\alpha = 22^h 12^m$.

16. 23 сентября звезда с $\alpha = 36^\circ 38'$ заходит точно на западе. Каков часовой угол Солнца?

17. 22 декабря Солнце имеет часовой угол $t = -3^h 00^m$. Определите α звезды, находящейся в нижней кульминации.

18. До какого склонения видны звезды южного полушария в Санкт-Петербурге ($\varphi = 59^\circ 57'$) и Ташкенте ($\varphi = 41^\circ 20'$)?

19. В Одессе ($\varphi = 46^\circ 29'$) на зенитном расстоянии $63^\circ 5'$ наблюдалась верхняя кульминация Сириуса. Каково его склонение?

20. Выразите в градусной мере угол между кругами склонения двух звезд, из которых одна кульминировала в $3^h 18^m$, а другая — в $21^h 31^m$.

21. 21 марта Солнце восходит, а звезда имеет часовой угол $2^h 30^m$. Определите α звезды.

22. Прямые восхождения звезд, равные $241^\circ 24' 17''$ и $28^\circ 41' 36''$, выразите в часах, минутах и секундах.

23. Через 12 ч после прохождения через зенит звезда находилась на высоте $76^\circ 34'$. Какова широта места наблюдения? Какие значения склонения могла иметь звезда?

24. В каких двух случаях высота светил над горизонтом в течение суток не изменяется?

25. Каковы наибольший и наименьший углы, которые образуют эклиптика и горизонт в Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$)?

26. При каких условиях полюс эклиптики совпадает с зенитом наблюдателя?
27. Какой угол с горизонтом образует эклиптика в момент восхода точки весеннего равноденствия для широты $+55^\circ$ в момент захода этой точки? Определите то же для широты $+66^\circ 34'$.
28. Каковы астрономические широта и долгота северного полюса мира?
29. Каковы прямое восхождение и склонение северного полюса эклиптики?
30. Где будет находиться на небе Сириус ($\alpha = 6^h 41^m$) 21 марта через час после захода Солнца, 23 сентября через час после восхода Солнца (для средних широт северного полушария)?
31. Каково положение звезды, имеющей прямое восхождение 7^h и склонение 40° , 21 марта через час после захода Солнца для наблюдателя, который находится на широте 40° ?
32. Одни из самых ярких звезд Вега и Капелла имеют прямые восхождения $18^h 34^m$ и $5^h 10^m$. В какой стороне неба (в западной или восточной) и под каким часовым углом они находятся в момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия, в момент ее нижней кульминации?
33. Используя условия предыдущей задачи, ответьте на вопрос: какой интервал звездного времени проходит от нижней кульминации Капеллы до верхней кульминации Веги?
34. Через сколько времени после своей верхней кульминации Солнце будет находиться на высоте $h = 35^\circ$ 13 июня в Киеве ($\varphi = 50^\circ 27'$), если склонение этого светила $\delta = +23^\circ 12'$?
35. При каких условиях азимут звезды не изменяется от ее восхода до кульминации?
36. У каких светил, наблюдающихся в Минске, азимут никогда не равен нулю?
37. Москва и столица Эфиопии Аддис-Абеба находятся почти на одном меридиане (широта Москвы и Аддис-Абебы соответственно $+56^\circ$, $+9^\circ$). Какова разность высот, на которых Сириус в момент верхней кульминации видят наблюдатели в этих городах?
38. Каково зенитное расстояние Веги ($\delta = +38^\circ 42'$) во время верхней кульминации в Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$)?
39. Восходит ли в Архангельске ($\varphi = 64^\circ 35'$) Фомальгаут (α Южной Рыбы), у которого $\delta = -30^\circ 05'$?
40. Определите, где на Земле начинает быть видимым созвездие Южного Креста, расположенное в пределах южного склонения от -55° до -64° ? В каких местах оно видно полностью?
41. Каково склонение звезды, наблюдавшейся в Архангельске ($\varphi = 64^\circ 35'$), в нижней кульминации на высоте 10° ?
42. К югу от зенита высота нижнего края Солнца в меридиане была $84^\circ 21'$, склонение центра этого светила $+18^\circ 39'$. Определите широту, учитывая, что угловой диаметр Солнца равен $32'$.

43. Незаходящая звезда наблюдалась в верхней кульминации к северу от зенита на зенитном расстоянии $29^{\circ}47'$, а в нижней — на $41^{\circ}49'$. Определите географическую широту места наблюдения.

44. Каковы координаты кометы (α и δ), если она находилась в меридиане на $3^{\circ}51''$ севернее звезды с $\alpha = 19^{\text{h}}10^{\text{m}}14^{\text{s}}$ и $\delta = 18^{\circ}14'9''$? Меридиан комета прошла раньше звезды на $1^{\text{m}}1^{\text{s}}$.

45. Какова минимальная и максимальная полуденная высота Солнца в вашем городе?

46. Какая доля общего количества звезд на данной широте φ никогда не заходит? Звезды считайте равномерно распределенными по небесной сфере.

47. Через 12 часов после прохождения через зенит звезда находилась на высоте $76^{\circ}34'$. Какова широта места наблюдения? Какие значения склонения могла иметь звезда?

48. Около 1100 г. до нашей эры китайские астрономы определили, что в день летнего солнцестояния высота Солнца в полдень равнялась $79^{\circ}7'$, а в день зимнего солнцестояния — $31^{\circ}19'$ (к югу от зенита). Каковы были широта места наблюдения и наклонение эклиптики к экватору?

1.2. Измерение времени. Системы счета времени

Основными единицами измерения времени в астрономии являются звездные, истинные солнечные и средние солнечные сутки в зависимости от того, какая точка на небесной сфере выбрана в качестве основного ориентира для их измерения.

Звездные сутки — промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия Υ на одном и том же географическом меридиане. Начало звездных суток — момент верхней кульминации Υ . Время, прошедшее от верхней кульминации Υ до любого другого ее положения, выраженное в долях звездных суток (в звездных часах, минутах и секундах), называется *звездным временем* s . Следовательно, на данном меридиане в любой момент

$$s = t_{\Upsilon} = \alpha + t, \quad (1.3)$$

Здесь t_{Υ} — часовой угол Υ , выраженный в часовой мере; α , t — прямое восхождение и часовой угол светила M (см. рис. 1.1, б).

В момент верхней кульминации светила его часовой угол $t = 0$, а звездное время совпадает с прямым восхождением этого светила $s = \alpha$. Таким образом, звездное время в любой момент суток равно прямому восхождению α светил, находящихся в этот момент в верхней кульминации.

Поскольку в каждом пункте земной поверхности географический и небесный меридианы совпадают (лежат в одной плоскости), то очевидно, что направления

на точку весеннего равноденствия Υ с любой точки поверхности Земли являются параллельными (рис. 1.5). Звездное время будет одинаковым на одном меридиане и различным — на разных. Если D — точка Гринвичского меридиана, где $s_0 = t_{0\Upsilon}$, то на географической долготе λ (точка E) звездное время $s_\lambda = s_0 + \lambda$.

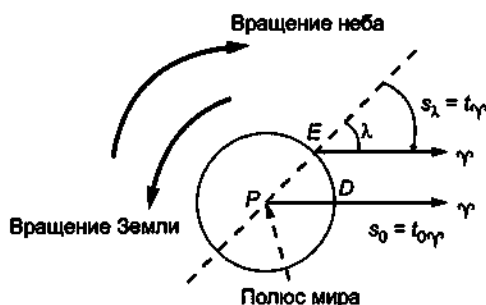


Рис. 1.5. Определение звездного времени на меридиане с географической долготой λ .

Истинные солнечные сутки — промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра солнечного диска на одном и том же географическом меридиане. Начало истинных солнечных суток — момент нижней кульминации Солнца (истинная полночь). Время, которое прошло с момента нижней кульминации Солнца до любого другого его положения, выраженное в долях истинных суток (в истинных солнечных часах, минутах, секундах), называется *истинным солнечным временем* $T_\odot$. Тогда $T_\odot = t_\odot + 12^h$ ($t_\odot$ — часовой угол Солнца).

В момент верхней кульминации Солнца (истинный полдень) его часовой угол $t_\odot = 0^h$, а истинное солнечное время $T_\odot = 12^h$; в момент нижней кульминации $T_\odot = 24^h$ ($t_\odot = 12^h$).

В связи с движением Земли по орбите вокруг Солнца каждая последующая верхняя кульминация центра солнечного диска будет происходить приблизительно на 4^m (точнее $3^m 56^s,56$) позже очередной кульминации точки весеннего равноденствия. Поэтому истинные солнечные сутки на $\sim 4^m$ продолжительнее звездных суток.

Поскольку продолжительность истинных солнечных суток — величина непостоянная, в астрономии введено понятие математически определяемой (фиктивной) точки — *среднего экваториального солнца*, которое равномерно движется по небесному экватору со среднегодовой скоростью истинного Солнца по эклиптике.

Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями среднего экваториального солнца на одном и том же географическом меридиане называется *средними солнечными сутками* (*средними сутками*). Начало средних солнечных суток — момент нижней кульминации среднего экваториального солнца (средняя полночь). Время, прошедшее от нижней кульминации

среднего экваториального солнца до любого другого его положения, выраженное в долях средних солнечных суток (в средних часах, минутах, секундах), называется *средним солнечным временем*, или *средним временем* T_m . Оно может быть выражено через часовую угол среднего экваториального солнца t_m : $T_m = t_m + 12^h$.

Разность между средним временем и истинным солнечным временем в один и тот же момент называется *уравнением времени* η :

$$\eta = T_m - T_{\odot} = t_m - t_{\odot} = \alpha_{\odot} - \alpha_m \quad (1.4)$$

или

$$T_m = T_{\odot} + \eta,$$

$$T_m = t_{\odot} + 12^h + \eta. \quad (1.4a)$$

Кривая уравнения времени (рис. 1.6, кривая 1) является суммой двух синусоид — с годичным (уравнение от эксцентриситета) и полугодовым (уравнение от наклона эклиптики) периодами.

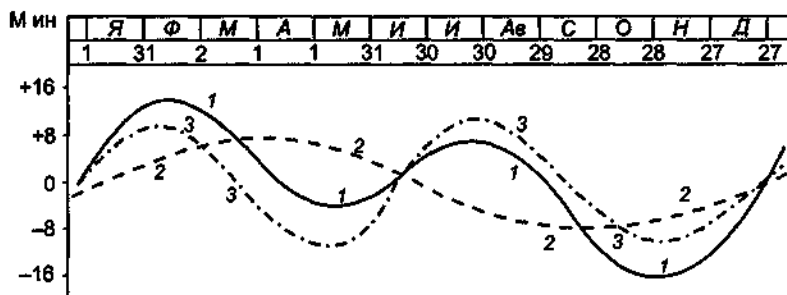


Рис. 1.6. Графики уравнения времени (кривая 1), уравнения от эксцентриситета (кривая 2) и от наклона эклиптики (кривая 3)

Поскольку в тропическом году 365,2422 средних солнечных суток и 366,2422 звездных суток, т.е. средние экваториальные сутки длиннее звездных на $3^m56^s,555$ ($\sim 4^m$), то интервалы звездного и среднего времени на одном и том же географическом меридиане могут быть связаны с помощью коэффициентов

$$K = \frac{366,2422}{365,2422} = 1,002738, \quad K' = \frac{365,2422}{366,2422} = 0,997270$$

следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta s &= K \cdot \Delta T_m, \\ \Delta T_m &= K' \cdot \Delta s. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Если S — звездное время в ближайшую предшествующую среднюю полночь на этом же меридиане, то среднее время в некоторый момент $T_m = (s - S) \cdot K'$, соот-

ветственно звездное время $s = S + T_m \cdot K$. Зная S_0 — звездное время в ближайшую предшествующую среднюю полночь на Гринвичском меридиане (табл. 1.1), можно легко вычислить S на любом другом меридиане, если известна его долгота к востоку от Гринвича λ , выраженная в часах и в долях часа:

$$S = S_0 - \frac{\lambda^h}{24^h} \cdot 3^m 56^s,555. \quad (1.6)$$

Таблица 1.1

Звездное время S_0 в ближайшую предшествующую среднюю полночь на Гринвичском меридиане

Дата	S_0	Дата	S_0	Дата	S_0
22 сентября	0 ^h	21 января	8 ^h	23 мая	16 ^h
22 октября	2 ^h	21 февраля	10 ^h	22 июня	18 ^h
22 ноября	4 ^h	23 марта	12 ^h	23 июля	20 ^h
22 декабря	6 ^h	22 апреля	14 ^h	22 августа	22 ^h

Среднее солнечное время на Гринвичском меридиане называется *всемирным временем* T_0 . Для любого пункта на Земле с долготой места λ *местное время* $T_\lambda = T_0 + \lambda$. Поскольку для двух сколь угодно близко расположенных пунктов с различной долготой местности λ_1 и λ_2 местное время $T_{\lambda_1} \neq T_{\lambda_2}$, необходима была такая система счета времени, которая позволила бы сохранить реальное различие местного времени для достаточно удаленных друг от друга по долготе населенных пунктов и не учитывать такое различие для близко расположенных пунктов. Такая система, появившаяся в 1884 г., называется *поясной*, поскольку в ней введено поясное время, которое является постоянным (независимо от долготы местности) в пределах одного пояса. Земная поверхность разделена по меридианам на 24 пояса (от нулевого, или Гринвичского, до 23-го). Средние меридианы каждого пояса находятся на расстоянии 15° по долготе друг от друга. Таким образом, поясное время T_n пояса с номером n связано с всемирным временем соотношением $T_n = T_0 + n$. Взаимосвязь между местным временем T_λ какого-либо пункта и его поясным временем T_n выражается так: $T_n - T_\lambda = n - \lambda$ (λ — долгота местности, находящейся в данном поясе). Разность $(T_n - T_\lambda)$ не должна превышать 30^m , хотя из-за того, что реальные границы часовых поясов чаще всего проводятся по административным границам (как правило, довольно извилистым), она может достигать 1^h .

Для измерения более длительных промежутков времени используется *тропический год* (365,2422 ср. солн. суток) — промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра солнечного диска через точку весеннего равноденствия.

Тропический год положен в основу григорианского календаря, принятого в большинстве стран мира (подобные календари называются *солнечными*, в отличие от *лунных*, где за основу взята продолжительность лунного месяца $29^d,53$, или *лунно-солнечных*, где в основу положены и лунный месяц и тропический год одновременно). При составлении любого солнечного календаря следует учитывать то, что продолжительность календарного года в среднем за несколько лет должна быть как можно ближе к продолжительности тропического года; календарный год должен содержать целое число средних солнечных суток.

В современном календаре год состоит из 365 дней в течение 3 лет подряд, каждый четвертый год (високосный) состоит из 366 дней. К високосным годам относятся те, порядковый номер которых делится на 4. Однако в григорианском календаре високосным не считается последний год столетия, когда число сотен не делится на 4 (1700, 1800, 1900, 2100, 2200 г. и т.д.). Таким образом, период современного календаря составляет 400 лет: из них 97 високосных и 303 простых. Календарный год в григорианском календаре отличается от тропического на 0,0003 сут., что даст ошибку в одни сутки за 3300 лет (юлианский календарь, который существовал до 10 октября 1582 г., давал ошибку 0,0078 сут. в год, 1 сут. за 128 лет).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Почему звездные сутки короче солнечных?
2. Чем вызвано введение уравнения времени?
3. Почему солнечные сутки неравномерны?
4. Какие системы счета времени используются в повседневной жизни?
5. Минск и Москва находятся в одном часовом поясе. Почему их время различается на один час?
6. Предложите свой солнечный календарь, который удовлетворял бы основным критериям при создании календарей.

Примеры решения задач

Задача 1. В котором часу (по белорусскому времени) сегодня наступит истинный полдень в том месте, где вы находитесь? Воспользуйтесь графиком уравнения времени.

Решение. Для определенности предположим, что сегодня 17 января и вы находитесь в Минске.

Истинный полдень — момент, когда истинное солнечное время $T_{\odot} = 12^h$. Среднее солнечное время $T_m = T_{\odot} + \eta$ (η — уравнение времени). Используя график, дающий уравнение времени для разных дат (рис. 1.6), получаем, что 17 января $\eta \approx +8^m$. Следовательно, $T_m = 12^h08^m$.

Всемирное время $T_0 = T_m - \lambda$, а долгота центра Минска $\lambda \approx 27^\circ 40' \approx 1^h 51^m$, поэтому $T_0 = 10^h 17^m$. Теперь определим поясное время. Минск находится во втором часовом поясе, поэтому $T_n = T_0 + n^h = 12^h 17^m$. Летнее время, когда добавляется еще 1 ч, 17 января не действует, поэтому получаем $T_{\text{всн}} = T_n = T_0 + n^h = 12^h 17^m$.

Задача 2. Когда по солнечному времени 10 февраля будет кульминировать звезда Арктур ($\alpha = 14^h 12^m$)?

Решение. Учитывая, что с 21 января до 10 февраля прошло 20 дней, с помощью табл. 1.1 определяем звездное время в ближайшую предшествующую полночь: $S = 8^h + 20 \cdot 4^m = 9^h 20^m$. Поскольку нижняя кульминация Арктура в наших широтах не видна, то, очевидно, в задаче идет речь о верхней кульминации, для которой часовой угол $t = 0$. Следовательно, звездное время этого события $s = \alpha + t = 14^h 12^m$.

Воспользовавшись формулой $T_m = (s - S) \cdot K'$, находим $T_m = (14^h 12^m - 9^h 20^m) \times \times 0,997270 \approx 4^h 51^m, 2$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Выразите разность прямых восхождений звезд $132^\circ 14' 31''$ и $218^\circ 06' 58''$ как интервал времени.

2. В Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$) наблюдалась верхняя кульминация появившейся кометы (ее $\alpha = 12^h 10^m 10^s$ и $\delta = 42^\circ 43'$). Вычислите зенитное расстояние кометы в момент кульминации и звездное время этого события.

3. 23 сентября заходит звезда с $\alpha = 138^\circ 23'$ и $\delta = 0$. Определите солнечное время.

4. Чему равно звездное время, если звезда с прямым восхождением $22^h 08^m 24^s$ имеет часовой угол $126^\circ 11' 28''$?

5. Какие значения α и δ должны иметь две звезды, которые в $7^h 35^m 15^s$ звездного времени кульминировали бы в Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$) на $z = 60^\circ$ одна — к югу, а другая — к северу от зенита? Рассчитайте то же самое для зенитного расстояния $z = 40^\circ$.

6. За какое время накапливается ошибка в 1 сут в юлианском и григорианском календарях по сравнению с тропическим (солнечным) годом?

7. В котором часу по звездному времени происходит нижняя кульминация звезды, имеющей прямое восхождение $158^\circ 27'$?

8. Если сегодня звезда кульминировала в $20^h 00^m$, то когда это случится через 10 дней?

9. Рассчитайте приблизительно, какие звезды будут находиться в верхней кульминации в 10 ч вечера 28 июля.

10. Определите приблизительно месяц и число, когда звезда, прямое восхождение которой равно 18^h , находится в меридиане в 8 ч вечера.

11. Звезда δ Ориона 14 ноября восходит в 8 ч вечера. В какой день она взойдет в $5^h 30^m$ вечера? Каково приблизительно ее прямое восхождение, если склонение равно нулю?

12. В Киеве ($\varphi = 50^\circ 27'$) наблюдалась кульминация появившейся кометы. Измеренное зенитное расстояние (к югу от зенита) оказалось равным $3^\circ 52'$, а по звездным часам момент кульминации $15^h 15^m 10^s$. Определите значения α и δ .

13.* На какой максимальной высоте h над горизонтом будет Солнце 1 марта над Минском ($\varphi = 53^\circ 54'$ с.ш., $\lambda = 27^\circ 40'$ в.д.)? Когда это произойдет по среднему местному и поясному времени? Уравнение времени в этот день $+12^m$. Какова продолжительность этого дня?

14. В мусульманском (лунном) календаре в основу положен цикл 30 лет: 19 лет — по 354 дня и 11 лет — по 355 дней. Определите точность календаря. Средний лунный месяц $29^d 12^h 44^m 2^s, 78$.

15. Каково наибольшее возможное количество воскресений в феврале, для кого и при каких условиях?

16. В XI в. в Персии был введен солнечный календарь, в основу которого положен цикл, составляющий 33 года. В нем 25 простых и 8 високосных лет. Определите среднюю продолжительность года и ошибку, которую дает этот календарь. Сравните его с ошибкой григорианского.

17. Каково было бы соотношение солнечного и звездного времени, если бы Земля вращалась в направлении, противоположном действительному направлению ее вращения?

18. Солнце находится в верхней кульминации в 0^h всемирного времени. Определите долготу (уравнением времени пренебречь).

19. Земля — сфероид со сжатием $1/300$. Определите, на сколько за сутки уйдут вперед маятниковые часы на полюсе Земли по сравнению с такими же часами на экваторе. Как следует изменить длину маятника часов на полюсе, чтобы часы шли так же, как на экваторе? Центробежную силу не учитывать.

20. Известно, что продолжительность суток увеличивается на $2 \cdot 10^{-2}$ с за 1000 лет. На сколько через 1000 лет показания часов, синхронизированных по вращению Земли с учетом ее вихревого замедления, будут отличаться от показаний атомных часов, синхронизированных с постоянной начальной скоростью вращения Земли?

21. Известно, что в феврале 1920 г. было пять воскресных дней. Определите предыдущий и последующий годы, когда отмечалось то же самое.

22. Когда по поясному времени в Казани (по времени III пояса) 22 июня (долгота города $\lambda = 3^h 16^m 29^s$) произойдет кульминация Солнца, если в этот день уравнение времени $\eta = +1^m 20^s$?

23. Верхняя кульминация Прокциона ($\alpha = 7^h 36^m$) в пункте с долготой $\lambda = 2^h 30^m$ произошла в ночь с 30 на 31 декабря в $1^h 15^m$ по часам, которые идут по декретному времени данного пункта. Какова их поправка?

24. 11 февраля по поясному времени Солнце взошло в $7^h 6^m$, а зашло в $16^h 24^m$. Чему равна разница между поясным и средним местным временем данного места (11 февраля — максимум уравнения времени $\eta = +14^m$)?

1.3. Подвижная карта звездного неба

Подвижная карта звездного неба (рис. 1.7, см. вклейку) представляет собой стереографическую проекцию северной и частично южной небесных полусфер на плоскость небесного экватора. На карте изображены сетка небесных координат (склонение δ и прямое восхождение α), а также основные созвездия, представленные наиболее яркими звездами. Северный полюс мира находится в центре карты, в точке пересечения кругов склонения. Круги склонения изображены радиальными линиями, проведенными через 1^h прямого восхождения, и оцифрованы в часовой мерс. Небесный экватор и три небесные параллели северной полусферы с интервалом 30° изображены концентрическими окружностями, оцифрованы в точках пересечения с начальным кругом склонения ($\alpha = 0^h$) и с диаметрально противоположным ему кругом склонения ($\alpha = 12^h$). На карте изображены также часть южной небесной полусферы со склонением до -45° и небесная параллель для $\delta = -30^\circ$, радиус которых больше, чем радиус небесного экватора. Их размер — следствие искажения южных областей сферы при стереографической проекции. Изображения созвездий южной полусферы чрезвычайно растянуты и сильно отличаются от привычного их вида на небе.

Эксцентрический овал, пересекающийся с небесным экватором в двух диаметрально противоположных точках равноденствий (Υ и Ω), изображает эклиптику. На наружном обресе карты, называемом лимбом дат, — календарные числа и названия месяцев.

Накладной круг, который прилагается к карте (рис. 1.8, см. вклейку), позволяет установить вид звездного неба в любой день года для любого времени суток. С этой целью внешний обрест круга (часовой лимб) разделен на 24 часа. Штрихи на часовом лимбе нанесены через каждые 10 мин. В накладном круге есть овальный вырез, положение которого определяется географической широтой места наблюдения. Он вырезается по соответствующему овалу из начерченных на накладном круге. Контур овального выреза изображает математический горизонт с нанесенными на нем точками (север, юг, запад, восток).

Для определения вида звездного неба следует совместить часовой лимб с лимбом дат (необходимое время T — с нужной датой n) таким образом, чтобы небесный меридиан (линия север — юг) проходил через северный полюс мира. В асимметрично расположенном овале накладного круга окажутся созвездия, которые видны в этот момент над горизонтом.

С помощью подвижной карты звездного неба можно решать многие астрономические задачи (например, определять положение небесных светил в любое время суток и года). Это хорошее подспорье при переходе к визуальным наблюдениям. Расположение определенных звезд и созвездий можно установить благодаря перемещению точек наблюдения на небесной сфере относительно ярких и наиболее

заметных созвездий, которые могут служить ориентиром. Так, взяв за основу семь ярких звезд созвездия Большой Медведицы (звезды «ковша»), можно определить положение групп так называемых «зимних» и «летних» созвездий. «Зимние» хорошо видны на небе с ноября по февраль (созвездия Возничего, Тельца, Ориона, Большого Пса, Малого Пса, Близнецов). Их положение можно определить, если от Большой Медведицы провести через две звезды ковша (δ , α) прямую (вправо, если смотреть на юг, или против направления «ручки ковша»), продолжение которой позволит найти Капеллу (α) в созвездии Возничего. Двигаясь по большому кругу в этом направлении по часовой стрелке, наблюдатель попадает в созвездие Тельца с яркой звездой Альдебаран (α), а затем — в созвездие Ориона со звездами Бетельгейзе (α), Беллатрикс (γ) и Ригель (β). При этом движении по окружности внизу будет созвездие Большого Пса с самой яркой звездой на небе — Сириусом (α). Завершая это движение по кругу, мы пройдем по созвездиям Малого Пса (α М.Пса — Процион), Близнецов (α и β — Кастор и Поллукс) и замкнем окружность в созвездии Возничего.

Таким же образом, проведя прямую через звезды γ , δ Б.Медведицы, мы пройдем вблизи северного полюса мира и попадем в группу «летних» созвездий. Они хорошо видны с июня по сентябрь. «Летними» являются созвездия Лебедя (α Лебедя — Денеб), Лир (α Лир — Вега), Орла (α Орла — Альтаир).

С помощью этого способа мы можем найти созвездия вблизи северного полюса мира (созвездия Цефея, Кассиопеи, М.Медведицы), проведя прямую через β и α звезды Б.Медведицы. Продолжив кривую, проходящую через три звезды «ручки ковша» созвездия Б.Медведицы, мы попадем туда, где находятся созвездия Волопаса (α Волопаса — Арктур) и Девы (α Девы — Спика).

Благодаря известным ориентирам на ночном небе наблюдатель может достаточно легко найти любое созвездие, звезду или какой-то другой космический объект.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Каковы основные элементы, изображенные на неподвижном круге звездной карты?
2. Какую роль выполняет подвижный круг?
3. Какую часть звездного неба открывает подвижный круг?
4. От чего зависит вид наблюдаемой части звездного неба?
5. Какова погрешность в измерениях, которые проводятся с помощью подвижной карты?

Примеры решения задач

Задача 1. Используя подвижную карту звездного неба, определите время, в течение которого звезда Спика (α Девы) будет видна над горизонтом в ночь с 14 на 15 мая (считайте, что ночь — время от захода до восхода Солнца).

Решение. С помощью карты получаем, что восход звезды 14.05 в $16^{\text{h}}57^{\text{m}}$, а заход — в $2^{\text{h}}52^{\text{m}}$. Восход Солнца 14.05 в $4^{\text{h}}05^{\text{m}}$, а заход в $19^{\text{h}}55^{\text{m}}$. Следовательно, звезда Спика будет ночью над горизонтом в промежуток времени с $19^{\text{h}}55^{\text{m}}$ до $2^{\text{h}}52^{\text{m}}$, т.е. $\Delta T = 26^{\text{h}}52^{\text{m}} - 19^{\text{h}}55^{\text{m}} = 6^{\text{h}}57^{\text{m}}$.

Задача 2. Определите с помощью подвижной карты звездного неба, где будет находиться Сириус ($\alpha = 6^{\text{h}}44^{\text{m}}$, $\delta = -16^{\circ}41'$) 21 марта через час после захода Солнца, т.е. найдите его азимут и высоту над линией горизонта.

Решение. Определив положение Солнца на эклиптике 21 марта (день весеннего равноденствия), располагаем эту точку эклиптики в положении, соответствующем местному времени 19^{h} (известно, что 21 марта Солнце заходит в 18^{h} местного времени). Найдя на карте Сириус, определяем его координаты: $A \approx 4^{\circ}$, $h \approx 18^{\circ}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. В Киеве ($\varphi = 50^{\circ}27'$) в полдень Солнце находилось на высоте 32° . В какой день года это могло быть?

2. В Тбилиси ($\varphi = 41^{\circ}31'$) в полдень Солнце находилось на высоте 45° . В какой день года это могло произойти?

3. В Санкт-Петербурге ($\varphi = 59^{\circ}40'$) в полдень Солнце было на высоте 40° . Определите день года, когда это могло быть.

4. Когда лучше всего виден Млечный Путь в Республике Беларусь? Широту примите равной 55° с.ш.

5. В каком созвездии находится полюс галактической системы координат, если его координаты $\alpha = 12^{\text{h}}49^{\text{m}}$, $\delta = +27,4^{\circ}$?

6. В каком созвездии находится северный полюс мира Сатурна, если координаты этого полюса $\alpha = 38,4^{\circ}$, $\delta = +83,3^{\circ}$? Определите координаты южного полюса мира для планеты Сатурн.

7. Как путешественник может определить стороны света, если звезда Ригель (β Ориона), которую он видит, находится прямо над его головой ($\delta = -8^{\circ}15'$)? При помощи подвижной карты звездного неба определите время года путешествия.

8. Будет ли Юпитер виден 25 августа в момент $s = 20^{\text{h}}40^{\text{m}}$ звездного времени, если он находится в противостоянии? Обоснуйте ответ, используя подвижную карту звездного неба, и определите примерные горизонтальные координаты планеты.

9. С помощью подвижной карты звездного неба определите положение звезды (азимут и высоту над горизонтом), имеющей прямое восхождение $\alpha = 7^{\text{h}}$ и склонение $\delta = 65^{\circ}$ в день летнего солнцестояния через час после захода Солнца.

10. В каких созвездиях находится в течение суток точка зенита для широты 54° с.ш.?

11. В каком созвездии будет находиться Луна 15 октября в момент верхней кульминации в фазе первой четверти? Воспользуйтесь картой звездного неба.

12. Можно ли наблюдать 25 апреля Юпитер в момент $s = 14^h 40^m$ звездного времени, если он находится в точке весеннего равноденствия? Обоспуйте ответ, используя подвижную карту звездного неба.

13.* Определите с помощью подвижной карты звездного неба координаты Марса 10 марта, если он находился в западной квадратуре по отношению к Земле. Считайте, что плоскости орбит Марса и Земли совпадают.

14. Над пунктом, широта которого $\varphi = 53^\circ 08'$, 25 ноября 1916 г. в $11^h 49^m$ дня в зените появился яркий болид, упавший на Землю в этом месте в виде двух метеоритов массой 50 и 200 кг. Определите созвездие, по направлению от которого метеориты упали на Землю, а также звезду, рядом с которой находился их радиант.

15. Определите созвездие и примерные экваториальные координаты Земли для наблюдателя, который находится на Луне, если при наблюдении с Земли 10 апреля Луна находилась в последней четверти. Считайте, что плоскость орбиты Луны совпадает с плоскостью эклиптики.

1.4. Факторы, влияющие на положение светил на небесной сфере

Световые лучи, проходя через земную атмосферу, преломляются. Это явление называется *астрономической рефракцией* (рис. 1.9). Угол M_1OM_2 — угол рефракции, или рефракция ρ . Угол ZOM_1 — видимое зенитное расстояние светила z' , угол ZOM_2 — истинное зенитное расстояние z ($z - z' = \rho$; $z = z' + \rho$).

Рефракция приподнимает светило над горизонтом ($\rho > 0$) по отношению к его истинному положению. Если плоскость падения совпадает с небесным меридианом (светило находится в кульминации), то при рефракции вместе с z и h изменяется δ , но не α . Для случая, когда плоскость луча OM_2 не совпадает с меридианальной, изменяется также и значение α . Очевидно, что рефракция не изменяет азимут светила A .

При давлении P (мм рт. ст.) и температуре t ($^\circ\text{C}$) приближенное значение рефракции для $0^\circ \leq z' < 70^\circ$ можно получить по формуле

$$\rho = 60'' \cdot 25 \cdot \frac{P}{760} \cdot \frac{273^\circ}{273^\circ + t^\circ} \cdot \text{tg}(z'), \quad (1.7)$$

т.е. при $t = 0^\circ\text{C}$ и $P = 760$ мм рт. ст. $\rho = 60'' \cdot 25 \cdot \text{tg}(z')$.

При $z' > 70^\circ$ формулы дают ошибку $\Delta\rho \gg 1''$, которая при дальнейшем увеличении z' возрастает до бесконечности, хотя в действительности значение рефракции вблизи горизонта $\sim 35'$. Определить ρ при $z' > 70^\circ$ можно с помощью специальных таблиц (табл. 1.2).

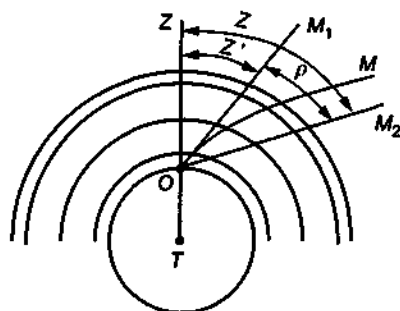


Рис. 1.9. Влияние рефракции света в атмосфере Земли на астрономические наблюдения (OM и OM_2 — истинные направления на светило; OM_1 — видимое направление на светило; ρ — угол рефракции)

Таблица 1.2

Угол рефракции для больших зенитных углов

z'	70°00'	70°30'	71°00'	71°20'	71°40'	72°00'	72°20'	72°40'
ρ	2'36",9	2'41",3	2'45",7	2'48",8	2'52",0	2'55",4	2'58",8	3'02",4
z'	73°00'	73°20'	73°40'	74°00'	74°10'	74°20'	74°30'	74°40'
ρ	3'06",1	3'10",0	3'13",9	3'18",1	3'20",5	3'22",4	3'24",6	3'26",9
z'	74°50'	75°00'	75°10'	75°20'	75°30'	75°40'	75°50'	76°00'
ρ	3'29",2	3'31",5	3'34",0	3'36",5	3'39",0	3'41",6	3'44",2	3'46",9
z'	76°10'	76°20'	76°30'	76°40'	76°50'	77°00'	77°10'	77°20'
ρ	3'49",6	3'52",5	3'55",3	3'58",2	4'01",2	4'04",3	4'07",5	4'10",7
z'	77°30'	77°40'	77°50'	78°00'	78°10'	78°20'	78°30'	78°40'
ρ	4'14",0	4'17",3	4'20",8	4'24",4	4'28",1	4'31",8	4'35",7	4'39",7
z'	78°50'	79°00'	79°10'	79°20'	79°30'	79°40'	79°50'	80°00'
ρ	4'43",9	4'47",8	4'52",1	4'56",6	5'01",1	5'05",8	5'10",6	5'15",5

Координаты одного и того же небесного тела, определенные с Земли, разные в различных точках ее поверхности. Такие координаты называются *топоцентрическими*. Особенно ощутимо это различие для светил, находящихся в пределах Солнечной системы (Солнце, Луна, планеты, малые тела), однако оно не столь существенно для звезд. Зависимость координат светил от точки наблюдения на Земле связана со смещением проекции светила на небесной сфере, которое называется *параллаксом*.

Основным считается направление на светило из центра Земли. Оно дает геоцентрическое положение светила и определяет его *геоцентрические* координаты.

Угол между направлениями (рис. 1.10), под которыми видно светило M' из центра Земли и с какой-нибудь точки на ее поверхности, называется *суточным параллаксом светила* p' . Это угол, под которым со светила был бы виден радиус Земли в месте наблюдения. Для светила в зените $p' = 0$. Если светило на горизонте, то значение p' будет максимальным, это горизонтальный параллакс p . Из треугольников TOM' и TOM получим:

$$\frac{R}{\Delta} = \frac{\sin p'}{\sin z'} \quad \text{и} \quad \frac{R}{\Delta} = \sin p.$$

Следовательно, $\sin p' = \sin p \cdot \sin z'$.

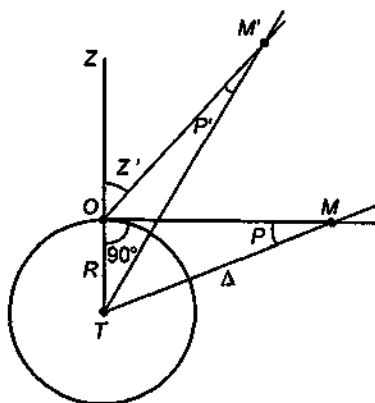


Рис. 1.10. Суточный параллакс p' светила M' и горизонтальный параллакс p светила M (R — радиус Земли; Δ — расстояние от центра Земли до светила)

Так как горизонтальный параллакс — величина небольшая (для Луны в среднем $p = 57'$, для Солнца $p = 8'',79$, для планет $p < 1'$), то $p' = p \cdot \sin z'$.

Горизонтальный параллакс, вычисленный для экватора (экваториальный радиус Земли $R_0 \approx 6378$ км), называется *горизонтальным экваториальным параллаксом* p_0 .

Расстояния до тел Солнечной системы можно определить с помощью их горизонтальных параллаксов. Если $TO = R_0$ — экваториальный радиус Земли, то $\Delta = \frac{R_0}{\sin p_0}$ — расстояние от центра Земли до светила M . Так как параллаксы

очень малы для всех тел, кроме Луны, то (p_0 , угл. с)

$$\Delta = \frac{206265'' \cdot R_0}{p_0''}. \quad (1.8)$$

Измерение расстояний в астрономии на основе экваториального радиуса Земли R_0 или горизонтального экваториального параллакса используется лишь в пределах Солнечной системы. Для определения расстояний до звезд в основу положен средний радиус орбиты Земли, равный 1 а.е. (астрономическая единица).

Угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты a при условии, что направление на звезду перпендикулярно радиусу, называется *годовым параллаксом звезды* π (рис. 1.11).

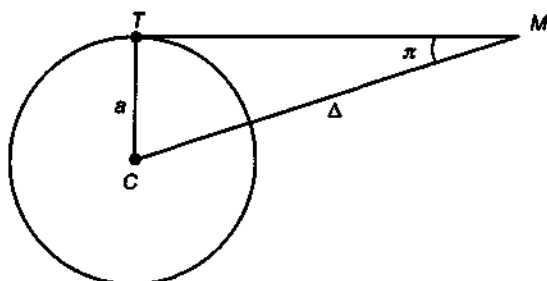


Рис. 1.11. Годичный параллакс звезды M (C — Солнце; T — Земля)

Расстояние от звезды M до Солнца Δ можно выразить так: $\Delta = \frac{a}{\sin \pi}$. Поскольку $\pi < 1''$, то для звезд (π — в секундах дуги)

$$\Delta = \frac{206265'' \cdot a}{\pi''}. \quad (1.9)$$

При $\pi = 1''$ расстояние $\Delta = 1 \text{ пк} = 206265 \text{ а.е.}$ (парсек — параллакс в секунду). Если расстояние выражать в парсеках, то формулу (1.9) можно записать в виде

$$\Delta = \frac{1}{\pi''}.$$

В табл. 1.3 приведены соответствия различных единиц расстояния, используемых в астрономии.

Таблица 1.3

Соответствие между единицами расстояния, используемыми в астрономии

Единицы	1 км	1 а.е.	1 св. год	1 пк
1 км	1	$6,6846 \cdot 10^{-9}$	$1,057 \cdot 10^{-13}$	$3,2408 \cdot 10^{-14}$
1 а.е.	$1,49598 \cdot 10^8$	1	$1,5813 \cdot 10^{-5}$	$4,8481 \cdot 10^{-6}$
1 св. год	$9,4605 \cdot 10^{12}$	63240	1	0,3066
1 пк	$3,0857 \cdot 10^{13}$	206265	3,2616	1

Наблюдатель вместе с Землей движется по орбите вокруг Солнца, поэтому направление на близкую звезду будет изменяться, а звезда будет описывать эллипс на небесной сфере в течение года. Этот эллипс, который называется параллактическим, тем больше сжат от окружности до отрезка или дуги, чем ближе звезда к эклиптике. Размер его будет тем меньше, чем дальше звезда от Земли. Большие полуоси *параллактических эллипсов* равны годовым параллаксам звезд.

Вторым результатом движения Земли является *абберация*. Это явление заключается в том, что движущийся наблюдатель видит светило не в том направлении, в котором он видел бы его в тот же момент, если бы находился в состоянии покоя. Абберация — это угол σ между наблюдаемым (видимым) и истинным направлениями на светило.

Представим, что с Земли, движущейся со скоростью v по орбите вокруг Солнца, наблюдают в телескоп за звездой с эклиптической широтой β . Если бы скорость света была значительно выше v (или бесконечна), то движением Земли можно было пренебречь (время прохождения светом тубуса телескопа от объектива до окуляра можно было бы считать равным нулю), и звезда была бы видна в том месте неба, где она находится на самом деле. Из-за конечности скорости света, чтобы увидеть звезду, телескоп следует повернуть на угол абберационного смещения σ :

$$\sin \sigma = \frac{v}{c} \sin \theta. \quad (1.10)$$

Так как угол σ мал, то $\sigma = 206265'' \cdot \frac{v}{c} \sin \theta$.

Здесь θ — угловое расстояние видимого направления на звезду от точки неба, в которую направлена скорость наблюдателя (*апекс* движения наблюдателя); v — скорость Земли; c — скорость света.

Повернем телескоп на угол σ от истинного направления на звезду. Пока луч света проходит расстояние от объектива телескопа до его окуляра, наблюдатель вместе с Землей смещается в направлении апекса на некоторое расстояние так, чтобы глаз его (фотоприемного устройства) «встретился» с лучом света, исходящим от звезды.

Наблюдатель участвует в суточном вращении Земли и в годовом ее движении ($v = 29,78$ км/с) вокруг Солнца, поэтому различают *суточную* и *годовую абберации*. В результате годового движения $\sigma = 20'',496 \cdot \sin \theta \approx 20'',50 \cdot \sin \theta$ ($k_0 = 20'',496 \approx 20'',50$ — постоянная абберации), а видимые положения звезд описывают *абберационные эллипсы* с полуосями $20'',50$ и $20'',50 \cdot \sin \beta$, где β — эклиптическая широта звезды.

Линейная скорость точек поверхности Земли, обусловленная ее вращением, значительно меньше скорости движения Земли по орбите (для точек на экваторе — 464 м/с) и пренебрежимо мала по сравнению со скоростью света. В связи с этим суточную абберацию обычно не учитывают при определении координат небесных объектов.

Измерения угловых размеров небесных объектов и их суточных параллаксов (с учетом поправок на рефракцию и аберрацию) позволяют определять линейные размеры и форму тел (рис. 1.12) (как правило, в пределах Солнечной системы), а также расстояния до них. При этом за основу принимают экваториальный радиус Земли R_0 :

$$r = R_0 \frac{\rho}{p_0}, \quad (1.11)$$

где ρ и r — угловой и линейный (например, радиус) размеры тела; p_0 — его экваториальный горизонтальный параллакс.

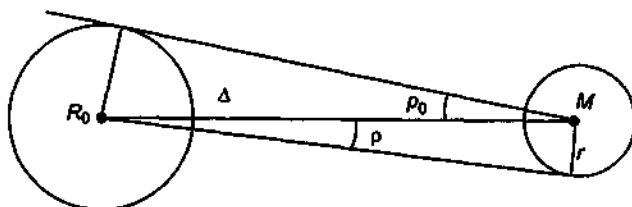


Рис. 1.12. Определение размеров и формы тел Солнечной системы: ρ и p_0 — угловой радиус и горизонтальный экваториальный параллакс светила M радиусом r

Если бы Земля была сферой и обладала свойствами абсолютно твердого тела, то она вращалась бы как единое целое с постоянным периодом и постоянным направлением оси вращения в пространстве. Однако Земля близка к сфероиду, и ее притяжение каким-либо телом L можно разложить на три силовые составляющие: $\vec{F}$, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ (рис. 1.13).

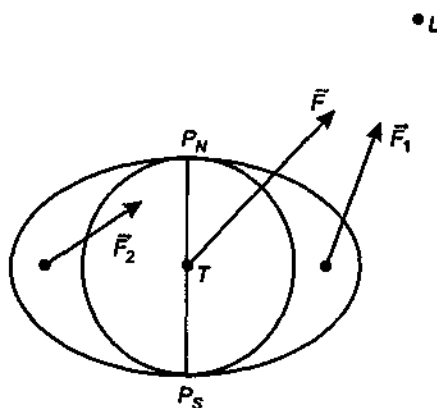


Рис. 1.13. Притяжение сфероида внешним телом L

Поскольку $|\vec{F}_1| > |\vec{F}_2|$, то сила притяжения телом L стремится повернуть ось вращения сфероида $P_N P_S$ так, чтобы плоскость экватора совпала с направлением TL .

В этом случае ось $P_N P_S$ будет перемещаться в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой находятся силы $\vec{F}_1, \vec{F}_2$. На экваториальные выступы Земли действуют силы притяжения со стороны Луны и Солнца, и ось Земли совершает сложные движения в пространстве.

Ось Земли описывает конус вокруг оси эклиптики, оставаясь под углом $66^\circ 34'$ к ее плоскости. Это движение называется *прецессионным*, его период — 26 000 лет. Полюсы мира за этот же период тоже описывают около полюса эклиптики круги угловым радиусом $23^\circ 26'$. Эта прецессия, вызываемая действием Луны и Солнца, называется *лунно-солнечной*.

Кроме того, ось Земли совершает мелкие колебания около своего среднего положения. Происходит так называемая *нута́ция* земной оси. Это связано с непрерывным периодическим изменением $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (рис. 1.13) по величине и направлению. Основное нутационное колебание совершается за период, равный 18,6 года, т.е. равен периоду обращения лунных узлов. Вследствие этого полюсы мира описывают на небесной сфере эллипсы, большие оси которых равны $18'',42$, а малые — $13'',72$.

Притяжение планет является незначительным, чтобы влиять на положение оси вращения Земли в пространстве, но оно изменяет положение плоскости земной орбиты, т.е. плоскости эклиптики. Это так называемая *планетарная* прецессия, которая смещает точку весеннего равноденствия к востоку на $0'',114$ в год.

В результате *лунно-солнечной* и *планетарной* прецессий изменяются положения как небесного экватора, так и эклиптики. Точки пересечения небесного экватора с эклиптикой (точки равноденствий) медленно перемещаются относительно звезд к западу. В результате координаты (α, δ) светил с течением времени изменяются.

Скорость перемещения точки весеннего равноденствия за год $l = \frac{360^\circ}{26000} = 50'',26$

(общая годовая прецессия в эклиптике). Общая годовая прецессия на экваторе $m = 50'',26 \cdot \cos(\epsilon) = 46'',11$. Так как Υ и Солнце движутся навстречу друг другу по эклиптике, то Солнце приходит в эту точку раньше, чем если бы Υ была неподвижна (прецессию называют еще предварением равноденствий (лат. *praecessio* — предварение). По этой причине тропический год примерно на 20 мин короче периода обращения Земли вокруг Солнца, называемого *звездным годом* (365,2564 ср. солн. сут.).

Если, наблюдая звезды, исключить влияние прецессии, нутации, абберации и параллакса, то можно выделить собственное движение звезд. *Собственным движением звезды* μ называется ее видимое угловое перемещение по небесной сфере за год, вызванное ее движением в пространстве относительно Солнца. Большинство звезд имеют собственные движения $\sim 0'',001$ и $\sim 0'',01$. Самое большое значение $\mu = 10'',27$ у «летающей» звезды Барнарда.

Собственное движение звезды μ (рис. 1.14), образующее с направлением к северному полюсу мира угол ϕ (отсчитывается против часовой стрелки), происходит

по дуге большого круга и может быть разложено на два компонента: μ_α — по прямому восхождению (в часовой мере), μ_δ — по склонению (в угловой мере):

$$\begin{aligned}\mu &= \sqrt{\mu_\delta^2 + (15 \cdot \mu_\alpha \cdot \cos \delta)^2}, \\ \mu_\delta &= \mu \cdot \cos \varphi, \\ 15 \cdot \mu_\alpha \cdot \cos \delta &= \mu \cdot \sin \varphi.\end{aligned}\tag{1.12}$$

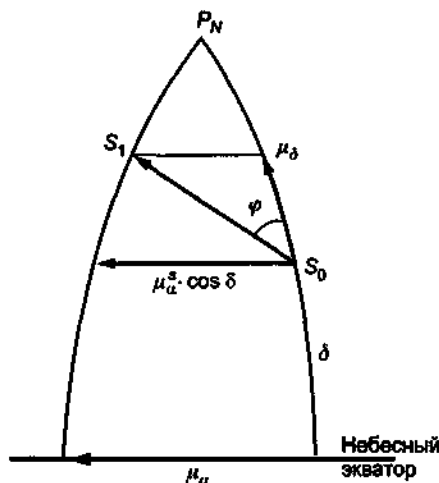


Рис. 1.14. Компоненты собственного движения звезды

Зная измеренное собственное движение звезды, можно рассчитать ее тангенциальную скорость v_t (скорость, перпендикулярную лучу зрения):

$$v_t = 4,74 \frac{\mu''}{\pi''} \text{ км/с},\tag{1.13}$$

а также полную скорость звезды в пространстве:

$$v = \sqrt{v_t^2 + v_r^2},\tag{1.14}$$

где v_r — лучевая скорость (скорость вдоль луча зрения), которую можно определить из рассмотрения эффекта Доплера (см. гл. 3).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Если рефракция приподнимает светило над горизонтом, то как изменяет небесные координаты светил суточный параллакс?
2. Как зависят от расстояния суточный и годичный параллаксы?
3. Во сколько раз годичная абберация больше суточной?
4. Почему происходят прецессия и нутация земной оси?

5. Как прецессия земной оси связана с продолжительностью тропического и звездного годов?
6. Почему звездный год длиннее тропического?
7. Почему прецессионные явления вызывают изменения экваториальных координат?
8. В каком случае нельзя обнаружить собственное движение даже для близкого небесного объекта?

Примеры решения задач

Задача 1. Созвездие Ориона имеет экваториальные координаты около $\alpha \approx 6^h$, $\delta \approx 0^\circ$, а созвездие Южной Короны — $\alpha \approx 18^h$, $\delta \approx -40^\circ$. Каковы условия видимости этих созвездий в Минске сейчас? Какими они будут через 13 000 лет?

Решение. Выясним условия видимости этих созвездий в Минске ($\varphi \approx 54^\circ$) в настоящее время. Для Ориона $\alpha \approx 6^h$, что означает верхнюю кульминацию в полночь зимой. Высота созвездия в верхней кульминации такая же, как и Солнца в конце марта, т.е. 36° . Для Южной Короны $\alpha \approx 18^h$, что означает верхнюю кульминацию в полночь летом, а высота в верхней кульминации примерно -4° . Таким образом, созвездие Ориона хорошо видно зимой, а Южная Корона не видна совсем.

За 13 000 лет (половина периода прецессии) плоскость экватора, составляющая угол $\varepsilon \approx 23,5^\circ$ с плоскостью эклиптики, повернется на 180° вокруг оси эклиптики. Вследствие прецессии экваториальные координаты Ориона через 13 000 лет будут $\alpha' = \alpha + 12^h = 18^h$, $\delta' = \delta - 2\varepsilon = -47^\circ$, а координаты Южной Короны станут $\alpha' = \alpha + 12^h = 6^h$, $\delta' = \delta + 2\varepsilon = +7^\circ$.

Через 13 000 лет созвездие Ориона будет в верхней кульминации в полночь летом, а высота его при этом будет равняться -11° , так что знаменитый пояс Ориона и другие красоты этого созвездия станут недоступны минчанам. Зато Южная Корона, которую нельзя увидеть сейчас, будет хорошо видна в Минске зимой, кульминируя на высоте 43° .

Задача 2. В обсерватории под широтой $55^\circ 45' 20''$ измеренное зенитное расстояние звезды в верхней кульминации $47^\circ 59' 48''$. Чему равно склонение звезды с учетом средней рефракции?

Решение. Истинное зенитное расстояние звезды с учетом рефракции $z = z' + \rho$. Считая атмосферные условия нормальными и учитывая, что $z < 70^\circ$, поправку на рефракцию можно записать: $\rho = 60'',25 \cdot \operatorname{tg}(z') = 66'',91 \approx 1'7''$. Для сформулированных в задаче условий $z = 48^\circ 00' 55''$. Так как звезда находится в верхней кульминации, определяем ее склонение: $\delta = \varphi - z = 55^\circ 45' 20'' - 48^\circ 00' 55'' = 7^\circ 44' 25''$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Измеренная с ледакола полуночная высота нижнего края Солнца была $14^{\circ}11'5''$. Склонение Солнца в этот день $+21^{\circ}19'34''$, а угловой радиус $15'47''$. Определите с учетом рефракции широту, на которой находилось судно.

2. Наблюдая на меридианном круге недавно открытую малую планету, астроном определил, что верхняя ее кульминация произошла на высоте $37^{\circ}19'55''$ в $5^h18^m14^s$ по звездным часам, имеющим поправку -3^m19^s . При этих условиях поправка на рефракцию была $1'3''$. Каковы координаты α и δ планеты? Широта обсерватории $43^{\circ}19'1''$.

3. Влияет ли рефракция на обе экваториальные координаты светил или только на одну и всегда ли это происходит?

4. Влияет ли рефракция на обе эклиптические координаты светил или только на одну и всегда ли это бывает?

5. * На сколько действие рефракции удлинит продолжительность дня на экваторе Земли?

6. * Можно ли одновременно видеть над горизонтом Солнце и полную Луну? Ответ обоснуйте.

7. Увеличивает или уменьшает рефракция видимые диаметры Солнца и Луны около горизонта?

8. По измерениям горизонтальный параллакс Солнца равен $8'',7940$. Определите расстояние от Земли до Солнца и оцените погрешность результата (радиус Земли принять равным $6371,03$ км).

9. Звезда совершает в плоскости эклиптики видимые колебания в пределах угла $\delta\theta = 41''$. Определите скорость Земли по орбите.

10. * У Альтаира (α Орла) годичный параллакс $\pi = 0'',198$, а его собственное движение $\mu = 0'',658$, лучевая скорость $v_r = -26$ км/с, блеск $m = 0'',89$. Когда и на какое наименьшее расстояние Альтаир сблизится с Солнцем? Какой будет тогда его видимая звездная величина?

11. В каком направлении (слева направо или справа налево) перемещается из-за прецессии точка весеннего равноденствия?

12. * Координаты Сириуса таковы: $\alpha = 6^h41^m$, $\delta = -16^{\circ}35'$. Его собственное движение по прямому восхождению $\mu_\alpha = -0'',0374$, а по склонению $\mu_\delta = -1'',209$ в год, лучевая скорость $v_r = -7,5$ км/с, параллакс $\pi = 0'',38$. Определите полную пространственную скорость Сириуса относительно Солнца и угол, образуемый вектором скорости с лучом зрения.

1.5. Задачи практической астрономии

Наиболее простые и доступные способы измерения положения светил связаны с использованием горизонтальной системы координат. Для измерения углов в этой системе пользуются переносным оптическим прибором — универсальным

инструментом (УИ) (или более простым — теодолитом). По вертикальной шкале установленного строго горизонтально УИ можно определить высоту h (или зенитное расстояние z) светила. Его азимут A определяется по горизонтальной шкале. Точность нахождения азимута зависит от точности определения положения небесного меридиана в месте измерения и его отметки на шкале прибора.

Склонение δ и прямое восхождение α звезд определяются в астрономических обсерваториях. Способ определения экваториальных координат светил называется *абсолютным*, если он не зависит от ранее определенных α , δ и не опирается на известные координаты других звезд.

Абсолютным способом проще всего определяются склонения незаходящих светил. Измерив z'_B и z'_H (зенитные расстояния светила в верхней и нижней кульминациях) и учитывая рефракцию, находим z_B и z_H . Далее из соотношений для верхней и нижней кульминаций

$$z_B = \pm(\varphi - \delta) \text{ и } z_H = 180^\circ - \varphi - \delta$$

определяем δ :

$$\begin{aligned} \delta &= 90^\circ - \frac{z_H + z_B}{2}, \text{ если } \varphi > \delta; \\ \delta &= 90^\circ - \frac{z_H - z_B}{2}, \text{ если } \delta > \varphi. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Географическую широту φ можно определить, например, с помощью наблюдений в момент кульминации светил. Так как в кульминации $t = 0^\circ$ или 180° , то если светило кульминирует в верхней кульминации к югу от зенита — $\varphi = \delta + z$; к северу от зенита — $\varphi = \delta - z$; в нижней кульминации — $\varphi = 180^\circ - \delta - z$.

Измерение прямого восхождения α связано с определением точного времени — солнечного T и звездного s .

Задача определения точного времени сводится к определению поправки часов или хронометра. *Поправкой часов* и называется разность между точным временем T и показаниями часов T' в некоторый момент: $u = T - T'$ или $T = T' + u$. При этом, если $u > 0$, говорят, что часы отстают, если $u = 0$ — часы точны, если $u < 0$ — часы ушли вперед.

Из-за несовершенства часов и в результате влияния внешней среды $u \neq \text{const}$. Изменение поправки часов за определенный промежуток времени называется *ходом часов* ω :

$$\omega = \frac{u_2 - u_1}{T'_2 - T'_1}. \quad (1.16)$$

Таким образом, $\omega > 0$, если u увеличивается (часы отстают), и $\omega < 0$, если u уменьшается (часы спешат).

На основании формулы (1.16) можно определить поправку для любого значения T между T'_1 и T'_2 , т.е. $u = u_1 + \omega (T - T'_1)$.

С помощью наблюдений обычно определяют местное звездное время s , а затем — местное среднее солнечное время T_m , которое можно выразить в любой другой системе счета времени:

$$s = T' + u = \alpha + t \quad \text{или} \quad u = \alpha + t - T', \quad (1.17)$$

где α — прямое восхождение некоторого светила.

Если отмечают показание часов в момент верхней кульминации ($t = 0$), то $u = \alpha - T'$, а в момент нижней кульминации ($t = 180^\circ$) $u = \alpha - T' + 12^h$.

На измерении u основан метод определения *географической долготы* λ . Если T_m — местное время какого-либо меридиана с восточной долготой λ от Гринвича, а T_0 — всемирное время, то $\lambda = T_m - T_0$; $T_m = T' + u$; $T_0 = T' + u_0$. Следовательно, $\lambda = u - u_0$. Гринвичское время определяют по сигналам точного времени по радио, а T_m — с помощью наблюдений.

Абсолютный метод определения α применим только к ярким звездам (их называют часовыми), которые видны даже днем благодаря оптическим инструментам. По тщательно отрегулированным звездным часам снимают показания этих часов $s'_1, s'_2, \dots, s'_n$ в момент верхней кульминации этих звезд. В момент верхней кульминации Солнца также отмечают показания звездных часов $s'_\odot$ и измеряют его зенитное расстояние $z_\odot$. По измеренному $z_\odot$ Солнца затем вычисляют его склонение $\delta_\odot$ и прямое восхождение $\alpha_\odot$ по формуле

$$\sin \alpha_\odot = \frac{\operatorname{tg} \delta_\odot}{\operatorname{tg} \varepsilon}, \quad (1.18)$$

где $\varepsilon = 23^\circ 26'$ — угол между небесным экватором и эклиптической.

Эти измерения повторяются многократно, чтобы достигнуть высокой точности. Наблюдения Солнца, очевидно, нужны только для фиксации на небесной сфере точки весеннего равноденствия. Затем по формуле $s = \alpha_\odot = s'_\odot + u$ определяют поправку часов в моменты наблюдения Солнца, а по выражению (1.16) — ход часов ω . Поправки часов в момент наблюдения звезд, согласно формуле (1.16), равны: $u_i = u + \omega (s_i - s'_\odot)$, где $i = 1, 2, \dots, n$. Так как $\alpha_i = s'_i + u_i$, получим

$$\alpha_i = s'_i + u + \omega (s_i - s'_\odot). \quad (1.19)$$

Прямые восхождения и склонения остальных звезд и других небесных тел рассчитывают, как правило, *относительными* или *дифференциальными* методами, отталкиваясь от уже известных значений α и δ звезд, которые определены с помощью абсолютных методов.

Зная точные значения склонения δ светила и широты местности φ , можно рассчитывать характеристики, связанные с восходом и заходом небесного объекта.

Выражения для вычисления моментов времени и азимутов *восхода* и *захода светил* можно получить по формулам (1.1). Для часового угла t получаем

$$\cos t = \frac{\cos z - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta}.$$

При восходе и заходе видимое зенитное расстояние $z' = 90^\circ$. Из-за рефракции истинное зенитное расстояние $z = z' + 35'$, а из-за суточного горизонтального параллакса $z = z' - p$. Итак, $z = z' + \rho_{90} - p = 90^\circ + \rho_{90} - p$.

Для Солнца и Луны координаты относятся к центру их видимого диска, а восходом (заходом) их считается момент появления (исчезновения) на горизонте верхней точки края диска. Следовательно, истинное зенитное расстояние центра диска светил в этот момент будет больше зенитного расстояния верхней точки края диска на величину видимого углового радиуса R диска (для Солнца и Луны $R \sim 16'$). В общем случае при вычислении часового угла светила в момент восхода и захода надо брать $z = 90^\circ + \rho_{90} - p + R$:

$$\cos t = \frac{\cos(90^\circ + \rho_{90} - p + R) - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta}. \quad (1.20)$$

По этой формуле t вычисляется только для Луны: $R_\zeta = 16'$, $p_\zeta = 57'$ и $\rho_{90} = 35'$ и $z = 89^\circ 54'$. При определении t для Солнца его горизонтальным параллаксом можно пренебречь ($p_\odot \sim 0$), тогда $R_\odot = 16'$, $\rho_{90} = 35'$, $z = 90^\circ 51'$. Для остальных светил можно пренебречь и размерами, тогда $z = 90^\circ 35'$. Если пренебречь и рефракцией, то $\cos(t) = -\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta)$.

Каждое уравнение дает два значения часового угла: $t_1 = t$ (заход) и $t_2 = -t$ (восход), местное звездное время $s_s = \alpha - t$, $s_z = \alpha + t$. Отсюда можно получить T_m восхода и захода светил.

Для Солнца не нужно вычислять s . Сразу получаем истинное солнечное время ($T_\odot = t_\odot + 12^h$) и среднее солнечное время ($T_s = 12^h - t_\odot + \eta$, $T_z = 12^h + t_\odot + \eta$).

Азимуты точек восхода и захода вычисляем также по формулам (1.1) (без учета ρ_{90} , p , R), если $z = 90^\circ$:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}. \quad (1.21)$$

Получаем два значения: $A_1 = A$ (заход) и $A_2 = 360^\circ - A$ (восход).

С восходом и заходом Солнца, продолжительностью дня и ночи связано понятие *сумерки* (постепенное ослабление дневного света или уменьшение ночной темноты). Это явление связано с рассеянием света Солнца, находящегося под горизонтом, атмосферой Земли. Различают *гражданские* и *астрономические* сумерки. Продолжительность гражданских сумерек определяется интервалом времени от захода Солнца (исчезновение верхнего края солнечного диска) до момента,

когда центр солнечного диска не окажется на высоте $h_{\odot} = -6^{\circ}$ (вечерние), или от момента времени, когда $h_{\odot} = -6^{\circ}$, до появления верхнего края солнечного диска над истинным горизонтом (утренние).

Астрономические сумерки длятся дольше, так как для определения их продолжительности необходимо зафиксировать момент времени, соответствующий высоте центра солнечного диска $h_{\odot} = -18^{\circ}$. На географической широте $\varphi = 60^{\circ}34'$ в день летнего солнцестояния ($\delta_{\odot} = 23^{\circ}26'$) высота Солнца в нижней кульминации $h_{\odot} = -6^{\circ}$. В этом случае конец вечерних и начало утренних гражданских сумерек совпадают, т.е. сумерки длятся всю ночь. Такие ночи называют *белыми*. Для других географических широт и календарных дней в году белые ночи наступают при $\delta_{\odot} \geq 84^{\circ} - \varphi$.

Продолжительность Δt сумерек определяется по формуле

$$\cos(t + \Delta t) = \frac{\sin h_{\odot} - \sin \varphi \cdot \sin \delta_{\odot}}{\cos \varphi \cdot \cos \delta_{\odot}}. \quad (1.22)$$

Здесь t — часовой угол восхода (захода) Солнца; $h_{\odot}$ — высота Солнца под горизонтом (гражданские сумерки — $h_{\odot} = -6^{\circ}$, астрономические сумерки — $h_{\odot} = -18^{\circ}$).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Почему измерения координат горизонтальной системы более простые, чем измерения экваториальных координат?
2. Предложите способы определения положения небесного меридиана в данной точке местности.
3. Как найти склонение заходящих светил?
4. Как вычислить долготу дня в определенный календарный день года?
5. Зависит ли долгота дня от долготы местности?
6. Как рефракция влияет на продолжительность светлой части суток?
7. Какие сумерки длиннее — гражданские или астрономические?
8. Почему значение прямого восхождения α светила изменяется со временем? А для Солнца?

Примеры решения задач

Задача 1. В точке северного полушария, широту которой нужно определить, вертикально установлен стержень длиной $l = 2,5$ м. Через $3^{\text{h}}40^{\text{m}}$ звездного времени после верхней кульминации Солнца он отбрасывает на горизонтальную плоскость тень длиной $l' = 3,831$ м. Какова географическая широта этого места, если склонение Солнца в день наблюдения $\delta = +15^{\circ}20'$?

Решение. Из условий задачи можно определить косинус зенитного угла Солнца в момент наблюдения: $\cos z = \frac{l}{\sqrt{l^2 + l'^2}} \approx 0,5465$. Далее, воспользовавшись формулой

для параллактического треугольника из (1.2) $\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t$ и учитывая, что $t = 3^h 40^m = 55^\circ$ и $\delta = +15^\circ 20'$, получаем тригонометрическое уравнение относительно широты φ :

$$0,5465 = 0,2644 \cdot \sin \varphi + 0,5532 \cdot \cos \varphi.$$

В тригонометрии известны формулы для решения подобных уравнений:

$$\begin{cases} a = b \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi = r \cdot \sin(\varphi + \omega) \text{ или} \\ a = b \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi = r \cdot \sin(180^\circ - \varphi - \omega). \end{cases}$$

$$\text{Здесь } r = \sqrt{b^2 + c^2}; \quad \operatorname{tg} \omega = \frac{c}{b}.$$

Поскольку из приведенных уравнений получаем $r = 0,6131$, а $\omega = 64^\circ,4552$, то в итоге

$$\begin{cases} \sin(\varphi + \omega) = 0,8914 \text{ или} \\ \sin(180^\circ - \varphi - \omega) = 0,8914, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi \approx -1^\circ,41 \text{ или} \\ \varphi \approx 52^\circ,5. \end{cases}$$

Первый вариант ответа не подходит, так как речь в задаче идет о северном полушарии Земли, поэтому ответ такой: $\varphi \approx 52^\circ 30'$.

Задача 2. Вычислите продолжительность самого длинного и самого короткого дня в Санкт-Петербурге ($\varphi = 59^\circ 57'$), Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$), Душанбе ($\varphi = 38^\circ 35'$). Какая зависимость связывает продолжительность таких дней в данном месте (без учета рефракции)?

Решение. Поскольку продолжительность дня — время от восхода до захода Солнца, определим вначале часовые углы этих событий по формуле $\cos(t) = -\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta)$ (без учета рефракции). В качестве значений склонения Солнца подставим величины $\delta_1 = +23^\circ 26'$ и $\delta_2 = -23^\circ 26'$, так как очевидно, что самый длинный (1) и самый короткий (2) день будет соответственно в дни летнего и зимнего солнцестояния, когда Солнце поднимается над горизонтом наиболее высоко и опускается наиболее низко. Косинус — функция четная, и у нас получается два ответа: $|t|$ и $-|t|$. Первый ответ (положительный) соответствует заходу, а второй (отрицательный) — восходу. Следовательно, продолжительность дня будет $\Delta t = 2 \cdot |t|$.

Подставив склонение и широту указанных мест, получим:

для Санкт-Петербурга	$t_1 = 138^\circ,57$, $\Delta t_1 = 18^h 28^m,6$; $t_2 = 41^\circ,43$, $\Delta t_2 = 5^h 31^m,4$;
для Москвы	$t_1 = 129^\circ,57$, $\Delta t_1 = 17^h 16^m,6$; $t_2 = 50^\circ,43$, $\Delta t_2 = 6^h 43^m,4$;
для Душанбе	$t_1 = 110^\circ,25$, $\Delta t_1 = 14^h 42^m$; $t_2 = 69^\circ,75$, $\Delta t_2 = 9^h 18^m$.

Во-первых, из полученных значений видно, что сумма продолжительности самого длинного и самого короткого дня в году равна 24^h . Во-вторых, чем больше широта места, тем длиннее самый длинный день, короче самый короткий и боль-

ше их разница. Такая закономерность проявляется вплоть до полярного круга ($\varphi = 66^\circ 34'$): здесь самый длинный день 24^h , а самый короткий — 0^h (проверьте). При больших широтах ($66^\circ 34' < \varphi < 90^\circ$) продолжительность самого длинного дня составляет более суток, а на полюсе ($\varphi = 90^\circ$) самый длинный день длится ровно полгода (без учета рефракции). На самом деле, если учесть рефракцию, самый длинный день на полюсе будет чуть дольше чем полгода (см. задачу 5 из § 1.4), продолжительность дня — немного больше приведенных значений, а продолжительность дня и ночи весной реально станут одинаковыми чуть раньше, чем Солнце придет в точку весеннего равноденствия, осенью — чуть позже, чем Солнце окажется в точке осеннего равноденствия.

Задачи для самостоятельного решения

1. Астроном наблюдал прохождение светила через меридиан в $7^h 35^m 15^s$ по звездным часам и определил его зенитное расстояние ($44^\circ 15'$). Поправка часов $+0^m 33^s$. Определите координаты светила, если широта обсерватории $\varphi = 56^\circ 20'$.

2. В пункте с широтой $\varphi = 55^\circ 20'$ ожидают верхнюю кульминацию α Большой Медведицы ($\alpha = 10^h 15^m 34^s$, $\delta = 62^\circ 8'$). Для этого был установлен теодолит в плоскости меридиана. Определите угол, на который труба должна быть отклонена от зенита; время кульминации по звездным часам, поправка которых $u = -2^m 3^s$.

3. * В некотором городе Солнце зашло 22 марта на $1^m 36^s$ позже, чем накануне. Определите широту этого города, если $\sin \varepsilon = \sin 23,5^\circ = 0,40$.

4. На каких географических широтах можно наблюдать Луну в зените?

5. Сколько раз в году Луна находится в зените на экваторе?

6. Марсоход движется вдоль экватора и перемещается из пункта с долготой 210° з.д. до места с долготой 233° з.д. Какое расстояние он пройдет? Экваториальный радиус Марса принять равным 3397 км.

7. Лазерный импульс отразился от Луны и возвратился через 2,4354567 с. Определите расстояние от Земли до Луны в этот момент и оцените погрешность результата. Скорость света принять равной 299 792 458 м/с.

8. Определите широту местности, если нижний край полуночного Солнца наблюдался 10 июля на высоте $h' = 4^\circ 11'$ ($d_\odot = 32^\circ 32'$).

9. * Телеграфный столб высотой $l = 10$ м освещается Солнцем в полдень 14 июня в местности с широтой $\varphi = 48^\circ 25'$. Определите длину полутени от столба на горизонтальной поверхности. Видимый угловой диаметр Солнца $d_\odot = 32'$.

10. Каков азимут Солнца в момент его восхода на земном экваторе 21 марта, 22 июня, 23 сентября, 22 декабря?

11. Где длиннее день 27 августа и 27 апреля — в Гринвиче или в Иркутске, если их широта одинаковая, а по долготе Иркутск восточнее примерно на 7^h ?

12. * Вычислите (с учетом рефракции) продолжительность астрономических сумерек в Санкт-Петербурге ($\varphi = 59^\circ 56',6$) 25 марта, когда склонение Солнца $\delta_\odot = 2^\circ 1',9$.

13. Какова высота полюса мира в том месте Земли, где высота центра Солнца в полдень 22 июня равна $69^{\circ}38'$? Какой будет высота Солнца в том же месте в полдень 22 декабря?

14. Когда в Гринвиче $10^{\text{h}}17^{\text{m}}14^{\text{s}}$, в некотором пункте $12^{\text{h}}43^{\text{m}}21^{\text{s}}$. Какова долгота этого пункта?

15. Когда в Харькове полдень, часы в Казани показывают $12^{\text{h}}46^{\text{m}}$. Какова долгота Казани от Гринвича? (Долгота Харькова от Гринвича $2^{\text{h}}25^{\text{m}}$).

16. В некотором месте в момент кульминации Арктура (α Волопаса), у которого $\alpha = 14^{\text{h}}12^{\text{m}}$, звездные часы, привезенные из Пулкова и поставленные по Пулковскому меридиану, показывали $6^{\text{h}}25^{\text{m}}$. Какова долгота места наблюдения от Пулкова?

17. Поперечный размер города $l = 40$ км. На сколько истинный полдень на восточной окраине города наступит раньше, чем на западной, если его широта $\varphi = 55^{\circ}45'$?

18. В котором часу сегодня зайдет Солнце?

ГЛАВА 2. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

2.1. Видимые и действительные движения планет

Солнечная система представляет собой совокупность небесных тел, движущихся вокруг Солнца, для большинства из которых оно является центральным притягивающим телом. В Солнечную систему входят девять планет со спутниками, около 2500 малых планет (астероидов), несколько десятков тысяч комет, метеоритные тела и потоки пыли. Наибольшая часть малых планет движется по своим орбитам в промежутке между орбитами Марса и Юпитера (в так называемом поясе астероидов). За последние несколько лет было открыто значительное количество малых планет, которые находятся гораздо дальше от Солнца: например, за орбитами Нептуна (транснептуновые, так называемый *пояс Койпера*) и Плутона (трансплутоновые). По отношению к поясу астероидов все малые и большие планеты делятся на две группы — *внутренние* (Меркурий, Венера, Земля, Марс и астероиды, находящиеся внутри орбиты Марса), которые движутся внутри пояса, и *внешние* (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон со «своими» астероидами), орбиты которых находятся за пределами этого пояса.

Однако более важным является разделение планет на две группы по отношению к орбите Земли, поскольку астрономические измерения и наблюдения пока в основном производятся с поверхности нашей планеты. Меркурий и Венера относятся к группе *нижних планет*, их орбиты ближе к Солнцу, чем орбита Земли. Остальные планеты (Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон), которые находятся дальше от Солнца, чем Земля, относятся к *верхним*.

Условия наблюдения небесных тел с поверхности Земли (прежде всего планет и Луны) зависят от их положения по отношению к Земле и Солнцу. Различные взаимные расположения планет (и Луны) относительно Земли (Т) и Солнца (С) называют *конфигурациями*. Характерные для нижних планет конфигурации представлены на рис. 2.1, а для верхних — на рис. 2.2.

Положение небесных тел на орбите задается их геоцентрическими (λ) и гелиоцентрическими (обозначаются l для планет и L — для Земли) долготами, которые отсчитываются от направления на точку весеннего равноденствия Υ (рис. 2.3; 2.4). В этом случае основные конфигурации можно легко описать соотношениями между этими координатами. Так, для разных конфигураций нижних планет разность $(l - L)$ равна: $V_1 \rightarrow 270^\circ + \theta$, $V_2 \rightarrow 0^\circ$, $V_3 \rightarrow 90^\circ - \theta$, $V_4 \rightarrow 180^\circ$ (θ — угол наибольшего видимого отклонения планеты от Солнца: для Венеры $\theta = 45 - 48^\circ$, для Меркурия $\theta = 18 - 28^\circ$). Для верхних планет разность $(l - L)$ равна: $M_2 \rightarrow 180^\circ$, $M_4 \rightarrow 0^\circ$.

Синодический период S определяет промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми конфигурациями. Для нижних планет он вычисляется по формуле

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\odot}}, \quad (2.1)$$

для верхних планет — по уравнению

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\odot}} - \frac{1}{T}, \quad (2.2)$$

где $T_{\odot}$ и T — звездные периоды обращения Земли и планеты вокруг Солнца.

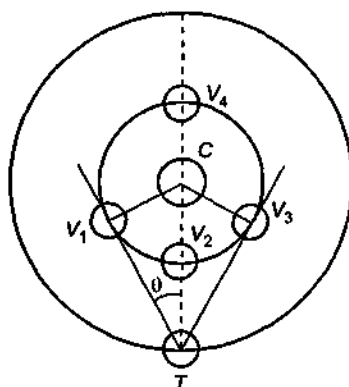


Рис. 2.1. Конфигурации нижних планет: V_1 — восточная элонгация; V_3 — западная элонгация; V_2 — нижнее соединение; V_4 — верхнее соединение

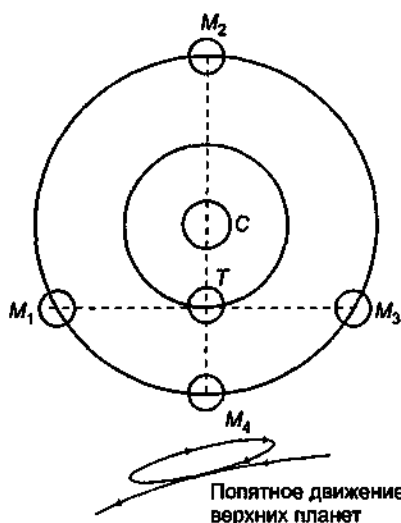


Рис. 2.2. Конфигурации верхних планет: M_1 — восточная квадратура; M_3 — западная квадратура; M_2 — соединение; M_4 — противостояние

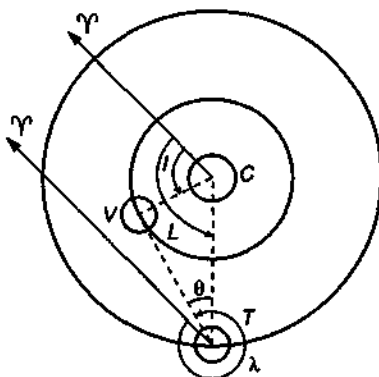


Рис. 2.3. Определение гелиоцентрических долгот Земли (L) и нижних планет (I):
 λ — геоцентрическая (эклиптическая) долгота

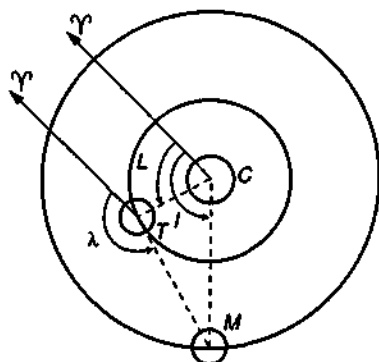


Рис. 2.4. Определение гелиоцентрических долгот Земли (L) и верхних планет (I):
 λ — геоцентрическая (эклиптическая) долгота

Характерным примером конфигураций является противостояние, когда верхние планеты (Марс, Юпитер и т.д.) и Земля находятся на одной прямой с Солнцем с одной стороны от него. При нахождении Земли в этот момент в афелии, а планеты (например, Марса) — в перигелии расстояние между ними будет минимальным. Так, для Марса по отношению к Земле противостояния, при которых расстояние между этими планетами не превышает 0,4 а.е., называются *великими*. Последнее из великих противостояний отмечалось в конце августа 2003 г.

Все планеты движутся по орбитам в *прямом* направлении вокруг Солнца (с запада на восток, или против часовой стрелки, если смотреть на Солнечную систему со стороны северного полюса эклиптики). Однако *видимое* движение планет является петлеобразным, поскольку для наблюдателя оно определяется наложением движений Земли и планеты. Если нижние планеты движутся по своим орбитам быстрее Земли, то верхние — медленнее. Вблизи противостояния для земного

наблюдателя, который движется быстрее, верхняя планета будет казаться движущейся в направлении, противоположном прямому, т.е. с востока на запад, как говорят, попятно (см. рис. 2.2). Нижние планеты, проходя по отношению к Земле перед Солнцем, нам тоже будут видны как совершающие попятное движение.

Длину дуги попятного движения планеты для круговой орбиты рассчитываем по формуле

$$\psi = (360^\circ - 2\theta_o) - 2n\tau, \quad (2.3)$$

где n — среднее суточное движение планеты; 2τ — продолжительность попятного движения в сутках; θ_o — элонгация (угол видимого с Земли отклонения планеты от Солнца) планеты, которая определяется по уравнению

$$\operatorname{tg} \theta_o = \frac{a \cdot \sin \varphi_o}{a \cdot \cos \varphi_o + 1}, \quad \theta_o < 180^\circ, \quad (2.4)$$

где a — радиус орбиты в астрономических единицах.

Угол φ_o можно определить по выражению

$$\cos \varphi_o = \frac{na^2 + n_1^2}{a(n + n_1)}, \quad (2.5)$$

где n_1 и n — среднее суточное движение Земли и планеты соответственно.

Среднее суточное движение планет определяют по соотношению $n = 360^\circ/T$. Его примерные значения для некоторых планет приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Среднее суточное движение планет

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
n	245',5	96',1	59',1	31',4	5'	2'

Объяснение видимых движений планет и других небесных тел осложняется тем, что они наблюдаются с Земли, о характере движения которой ничто не указывает в наблюдениях небесных и земных явлений.

Основы современной астрономии были заложены Николаем Коперником в XVI в. в созданной им гелиоцентрической картине мира:

- а) в центре мира находится Солнце, а не Земля;
- б) шарообразная Земля вращается вокруг своей оси, это вращение объясняет кажущееся суточное движение всех светил;
- в) Земля, как и все планеты, обращается вокруг Солнца, это объясняет видимое движение Солнца на фоне звезд;
- г) все видимые движения представлены в виде комбинаций равномерных движений по круговым орбитам;

д) кажущиеся прямые и попятные движения планет «принадлежат» не им, а Земле, т.е. таким образом их видит движущийся вместе с Землей наблюдатель.

Кеплер, обобщив результаты наблюдений датского астронома Тихо Браге, а также ряд своих наблюдений за движениями планет (в частности, Марса), пришел к выводу о некруговом движении планет и сформулировал три основных закона движения планет вокруг Солнца:

а) все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых (общем для всех планет) находится Солнце;

б) радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равновеликие площади;

в) квадраты сидерических (звездных) периодов обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит ($T^2 \sim a^3$).

На основе трех основных законов движения тел Ньютон показал, что «силы, в результате воздействия которых главные планеты постоянно отклоняются от прямолинейного движения и удерживаются на своих орбитах, направлены к Солнцу и обратно пропорциональны квадратам расстояний от его центра». Доказав, что сила, которая удерживает планеты, тождественна силе тяжести, действующей на поверхности Земли, Ньютон определил, что в основе интерпретации всех механических движений небесных тел лежит закон всемирного тяготения. Математически его можно выразить так:

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}. \quad (2.6)$$

Здесь $\vec{F}$ — гравитационная сила взаимодействия двух точечных тел; m_1 и m_2 — их массы; r — расстояние между ними; G — гравитационная постоянная, равная $6,6726 \cdot 10^{-11}$ (Н · м²)/кг².

Используя закон всемирного тяготения, законы Кеплера можно сформулировать следующим образом.

1. При невозмущенном движении (в задаче двух тел) орбита движущейся материальной точки (планеты) является кривой второго порядка, в одном из фокусов которой находится центр силы притяжения (Солнце). Таким образом, орбита материальной точки при невозмущенном движении — это одно из конических сечений: окружность, эллипс (для планет), парабола или гипербола.

2. При невозмущенном движении (в задаче двух тел) радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равновеликие площади. Математически этот закон можно записать так:

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const}. \quad (2.7)$$

Здесь r — радиус-вектор планет в любой точке орбиты; θ — его истинная аномалия, т.е. угол между направлениями из центра Солнца на планету и на перигелий ее орбиты.

3. При невозмущенном эллиптическом движении материальной точки вокруг центрального тела справедливо равенство

$$\frac{T^2}{a^3} (m_1 + m_2) = \frac{4\pi^2}{G} = \text{const}, \quad (2.8)$$

где T — период обращения тела массой m_2 вокруг тела массой m_1 по эллиптической (или круговой) орбите; a — ее большая полуось.

Если мы рассматриваем две системы, каждая из которых состоит из материальной точки (планеты или спутника), движущейся вокруг своего центрального тела (Солнца или планеты), то третий закон Кеплера можно сформулировать так: произведения квадратов периодов обращения на сумму масс центральной и движущейся точек относятся как кубы больших полуосей их орбит, т.е.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} \frac{M_1 + m_1}{M_2 + m_2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (2.9)$$

где T_1 и T_2 — периоды обращения масс m_1 и m_2 вокруг центральных тел с массами M_1 и M_2 соответственно; a_1 и a_2 — большие полуоси орбит.

К основным характеристикам эллиптической орбиты планеты (рис. 2.5) относятся:

- 1) $AO = a$ — большая полуось;
- 2) $e = \frac{Of_1}{OP}$ — эксцентриситет;
- 3) перигелий Π — ближайшая к Солнцу C точка орбиты планеты P , а $q = f_1\Pi = a(1 - e)$ — расстояние в перигелии;
- 4) афелий A — наиболее удаленная от Солнца C точка орбиты планеты P , а $Q = f_1A = a(1 + e)$ — расстояние в афелии;
- 5) f_1, f_2, O — фокусы и центр эллипса орбиты планеты P ;
- 6) r — радиус-вектор планеты P .

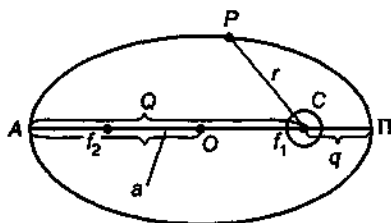


Рис. 2.5. Характеристики эллиптической орбиты

Из второго закона Кеплера, в частности, следует, что в перигелии орбиты скорость движения планеты v_q определяется по формуле

$$v_q = v_c \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} > v_c, \quad (2.10)$$

а скорость v_Q в афелии — по уравнению

$$v_Q = v_c \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} < v_c, \quad (2.11)$$

где v_c — круговая скорость планеты при $r = a$.

Круговая скорость планеты рассчитывается по соотношению, полученному из уравнения (2.6):

$$v_c = \sqrt{\frac{GM_\odot}{r}}, \quad (2.12)$$

где $M_\odot$ — масса центрального тела (Солнца).

Круговая скорость Земли равна 29,78 км/с. Поскольку скорость движения по параболе определяется по соотношению $v_p = \sqrt{2} \cdot v_c$, то соответствующая формула такова:

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM_\odot}{r}}. \quad (2.13)$$

В этом случае скорость движения по эллипсу определяется как $v_e < v_p$, а по гиперболе — $v_h > v_p$.

Орбита будет принимать форму эллипса, окружности, параболы или гиперболы в зависимости от начальной скорости v_0 (рис. 2.6).

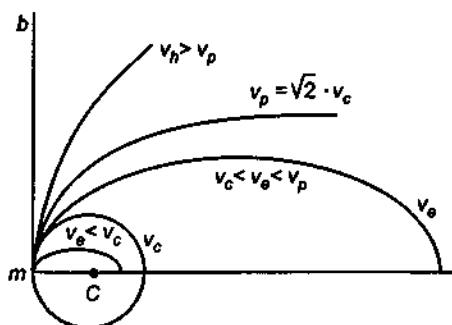


Рис. 2.6. Характер движения тела m в поле тяготения центральной массы M (точка C) в зависимости от начальной скорости: v_e — эллиптическая скорость; v_c — круговая скорость; v_p — параболическая скорость; v_h — гиперболическая скорость

Если $0 < v_0 < v_c$, где v_c — скорость кругового движения массы m (2.12), то движение будет происходить по эллипсу, а его начало соответствует максимальному расстоянию до C (точка афелия или апогея). Для $v_0 = v_c$ орбита m соответствует круговой радиусом $r = a$. Для $v_c < v_0 < \sqrt{2} v_c = v_p$ движение происходит по эллиптической орбите, а его начало соответствует перигелию или перигею. При $v_0 = \sqrt{2} \cdot v_c = v_p$ (2.13) точка будет двигаться по параболе и $a = \infty$. При $v_0 > \sqrt{2} \cdot v_c$ орбита точки m является гиперболой.

Закон всемирного тяготения сформулирован для материальных точек. Однако можно показать, что этот закон применим и для большинства небесных тел, поскольку они имеют почти правильную шаровую форму со сферически симметричной распределенной плотностью, а расстояние между ними значительно больше их размеров.

Для определения характера движения тела массой m относительно массы M нужно записать уравнение динамики материальной точки $\vec{F} = m \cdot \vec{w} = m \cdot \ddot{\vec{r}}$ с учетом ньютоновского тяготения. В рамках задачи двух тел это уравнение будет иметь вид

$$m \cdot \vec{w} = m \cdot \ddot{\vec{r}} = m \left(-GM \frac{\vec{r}}{r^3} - Gm \frac{\vec{r}}{r^3} \right) \quad (2.14)$$

или

$$\ddot{\vec{r}} = -G(M + m) \frac{\vec{r}}{r^3}.$$

Решив уравнение (2.14) с учетом закона сохранения энергии при движении тела массой m вокруг центрального тела массой M по орбите с большой полуосью a , получим формулу для скорости относительного движения v на расстоянии r (она называется *интегралом энергии*):

$$v^2 = G(M + m) \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right). \quad (2.14a)$$

На рис. 2.7 показаны основные элементы эллиптических орбит тел Солнечной системы. Две точки пересечения орбиты с плоскостью эклиптики называются узлами. Из них *восходящим узлом* называется тот, который при движении по орбите пересекает тело, приближаясь к северному полюсу эклиптики. Долгота восходящего узла Ω и наклонение i определяют положение плоскости орбиты в пространстве, ω определяет положение орбиты в ее плоскости, а большая полуось a и эксцентриситет e определяют размеры и форму орбиты. Зная момент времени прохождения через перигелий t_0 и другие элементы орбиты, можно определить положение планеты на орбите для любого другого момента времени t . При этом нужно знать две величины, характеризующие положение планеты на орбите, — радиус-вектор r и истинную аномалию θ (рис. 2.8).

Радиус-вектор r и истинная аномалия θ вычисляются по формулам

$$r = a(1 - e \cos E); \quad (2.15)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \operatorname{tg} \frac{E}{2}, \quad (2.16)$$

где $E = \angle PON$ называется эксцентрической аномалией, которая вычисляется по уравнению Кеплера:

$$M = E - e \cdot \sin E. \quad (2.17)$$

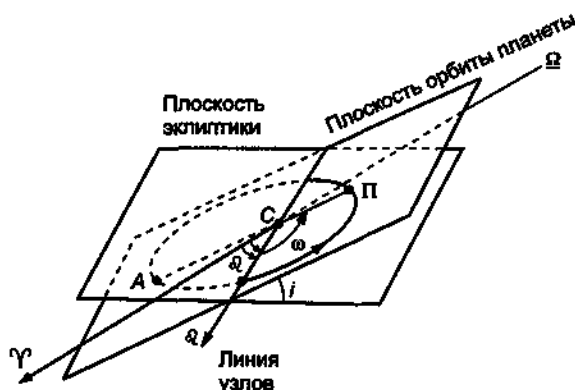


Рис. 2.7. Элементы орбиты тела Солнечной системы: i — угол наклона плоскости орбиты к плоскости эклиптики; ω — угловое расстояние перигелия от восходящего узла; Ω — гелиоцентрическая долгота восходящего узла; A — афелий; P — перигелий

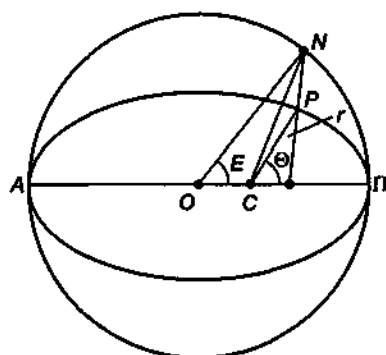


Рис. 2.8. Радиус-вектор r , истинная θ и эксцентрическая E аномалии орбиты

Здесь M — средняя аномалия, представляющая собой дугу окружности (в градусной или радиальной мере), которую описала бы планета за время $(t - t_0)$, если бы она равномерно двигалась по окружности радиусом a со средней угловой скоростью n , т.е.

$$M = n(t - t_0) = \frac{2\pi}{T}(t - t_0). \quad (2.18)$$

Таким образом, определив среднюю аномалию M и численными методами рассчитав эксцентрическую аномалию E , можно в любой момент времени найти радиус-вектор r и истинную аномалию θ планеты, т.е. определить ее положение в пространстве, если известны элементы ее орбиты.

Массу небесного тела можно определить по закону всемирного тяготения Ньютона. Для этого существует несколько способов:

а) в результате измерений силы тяжести на поверхности тела (гравиметрический способ):

$$m = \frac{gR^2}{G}, \quad (2.19)$$

где m — масса тела, на поверхности которого производятся измерения; R — радиус тела; g — ускорение силы тяжести (составляющей силы тяжести — силы притяжения) на поверхности, определяемое, например, по формуле для периода колебания T математического маятника длиной l :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}; \quad (2.20)$$

б) по третьему (уточненному) закону Кеплера (2.9);

в) на основе анализа возмущений, которые производит небесное тело при движении других небесных тел.

В природе невозможно указать два взаимодействующих тела, движение которых описывалось бы строго в рамках задачи двух тел. При точном анализе приходится учитывать возмущающее действие других тел. Если при оценке отмечен малый вклад возмущения в характер движения, им можно пренебречь. Однако если влияние третьих тел приходится учитывать, это приводит к существенному отклонению в описании движения двух тел от того, что дают законы Кеплера. Подобные отклонения от законов Кеплера обычно называются *возмущениями*.

Пусть имеется система трех тел, которая состоит из центрального тела (притягивающего) массой M (например, Солнце), тела массой m_1 , движущегося относительно этого тела (планета P_1) на расстоянии r_1 , и возмущающего тела массой m_2 (планета P_2) на расстоянии r_2 (рис. 2.9). Рассмотрим движение планеты P_1 относительно Солнца. Напомним, что система отсчета, связанная с Солнцем, будет неинерциальной, поскольку оно само движется с ускорением под воздействием двух других тел.

Солнце получает ускорение $w_1 = G \frac{m_1}{r_1^2}$ от планеты P_1 и ускорение $w_2 = G \frac{m_2}{r_2^2}$ от планеты P_2 . Соответственно планета P_1 получает ускорение $w'_1 = G \frac{M}{r_1^2}$ от Солнца и ускорение $w' = G \frac{m_2}{r^2}$ от планеты P_2 . Тогда в системе отсчета, связанной с Солнцем, планета P_1 будет двигаться с ускорениями: $w = w_1 + w'_1 = G \frac{(M + m_1)}{r_1^2}$; $w' = G \frac{m_2}{r^2}$; $w'' = -w_2 = -G \frac{m_2}{r_2^2}$. Если первое ускорение обуславливает движение P_1

по законам Кеплера, то два последних позволяют определить возмущающее ускорение и возмущающую силу.

Возмущающая сила и вызываемое ею возмущающее ускорение определяются разностью действия возмущающего тела P_2 на P_1 и C . Таким образом, возмущающее ускорение (рис. 2.9)

$$\vec{w}_{\text{возм}} = \vec{w}' + \vec{w}'' = \vec{w}' - \vec{w}_2.$$

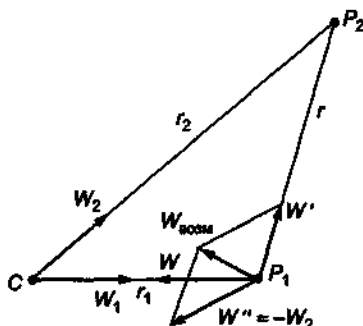


Рис. 2.9. Определение возмущающей силы и возмущающего ускорения

Как видно из рисунка, это ускорение изменяется по величине и направлению. Если $|\vec{w}_{\text{возм}}| \ll |\vec{w}|$, то действием возмущающего тела P_2 можно пренебречь.

Примером одного из проявлений возмущающей силы являются приливы и отливы на поверхности Земли. Поскольку размеры Земли конечны, то, независимо от ее формы, силы лунного (и солнечного) притяжения на разные точки Земли неодинаковы. В результате появляется возмущающая сила, которая зависит от расстояний и направлений от точек поверхности до притягивающего тела.

Вопросы и задания для самопроверки

1. При каких конфигурациях нижних и верхних планет условия их наблюдения наиболее благоприятны?
2. При каких конфигурациях нижних и верхних планет их наблюдают вечером после захода Солнца?
3. Почему синодические периоды соседних с Землей планет наибольшие?
4. Какое условие определяет равенство синодического и звездного периодов планеты?
5. Нарисуйте схему обращения верхней планеты относительно Земли и покажите возникновение петлеобразного движения.
6. Сравните формулировку законов движения планет, данную Кеплером, с их современной формулировкой. Чем они различаются?
7. Какие элементы орбиты определяют ее ориентацию в пространстве?
8. Какие элементы орбиты определяют ее размеры и степень эллиптичности?
9. Каков физический смысл интеграла энергии?
10. Что такое возмущающая сила и возмущающее ускорение?
11. Сформулируйте причину возникновения приливов и отливов на поверхности Земли.

Примеры решения задач

Задача 1. Определите день ближайшего следующего противостояния Юпитера, если 1 января гелиоцентрическая долгота Юпитера $306^{\circ}55'$, а Земли — $99^{\circ}55'$.

Решение. Зная, что в противостоянии разность гелиоцентрических долгот равна 0° , можно вывести уравнение, которое свяжет долготы этих планет через x дней в противостоянии: $(l + n_{\text{Ю}} \cdot x) - (L + n_{\text{З}} \cdot x) = 0^{\circ}$, где l, L — текущие долготы Юпитера и Земли на 1 января; $n_{\text{Ю}}$ и $n_{\text{З}}$ — средние суточные движения Юпитера и Земли (см. выше среднее суточное движение планет). На основании этого определяем количество прошедших дней:

$$x = \frac{l - L}{n_{\text{З}} - n_{\text{Ю}}} = \frac{306^{\circ}55' - 99^{\circ}55'}{59',1 - 5'} = 229,6 \text{ сут.}$$

Отсчитав это количество дней от 1 января (полагаем, что год не високосный), получим 19 августа.

Задача 2. Определите большую полуось a , время обращения T , эксцентриситет e и перигелийное расстояние q воображаемой кометы, которая на расстоянии 1 а.е. от Солнца имела скорость, по направлению совпадающую с круговой, но по величине в 10 раз меньшую.

Решение. Скорость кометы меньше, чем круговая. Из этого следует, что она движется по эллиптической орбите, находящейся в данном круге, а поскольку на расстоянии $r = 1$ а.е. ее скорость совпадает по направлению с круговой, то в данный момент она находится в афелии, т.е. $Q = r$. Формулу (2.14) для кометы можно записать так: $v^2 = GM_{\odot} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$, где $M_{\odot}$ — масса Солнца. Круговую скорость на расстоянии r можно определить по аналогичному соотношению: $v_c^2 = GM_{\odot} / r$. По условию $v = 0,1 \cdot v_c$, отсюда $\frac{2}{r} - \frac{1}{a} = 0,01 \cdot \frac{1}{r}$; $a = r / 1,99$; $a = 0,5025$ а.е. Время обращения определим на основании третьего закона Кеплера: $T = a^{3/2} = 0,3562$ года. Поскольку афелийное расстояние $Q = r = a(1 + e)$, то $e = 0,99$. Следовательно, перигелийное расстояние $q = a(1 - e) = 0,005025$ а.е.

Задачи для самостоятельного решения

1. Гелиоцентрическая долгота Юпитера 1 июля была $l = 291^{\circ}$, а Земли — $L = 279^{\circ}$. Когда наступит западная квадратура?

2. Наблюдатель заметил, что некоторая планета находится в противостоянии каждые 665,25 сут. Каково ее расстояние от Солнца в астрономических единицах?

3. Сатурн находится в противостоянии с Землей 10 мая. Когда произойдет соединение этих планет?

4. 18 июля гелиоцентрическая долгота Меркурия $l_M = 0^\circ$, а разность долгот Земли и Меркурия $L_3 - l_M = 60^\circ$. Когда Меркурий будет лучше всего виден вечером?

5. Гелиоцентрическая долгота Земли $L_3 = 90^\circ$, а разность долгот Земли и Венеры $\Delta l = 180^\circ$. Через сколько дней наступит западная элонгация?

6. Определите день ближайшей к 1 января наибольшей восточной элонгации Венеры и найдите видимое положение Венеры на небе в этот момент (гелиоцентрическая долгота на 1 января: Венеры — $l = 260^\circ 40'$, Земли — $L = 99^\circ 55'$).

7. Какова была бы большая полуось орбиты планеты, если бы ее синодический период составлял 1 год?

8. Нижнее соединение Земли и Меркурия отмечено 1 октября. Будет ли западная элонгация в этом же году? Когда это произойдет?

9. Астероид Веста совершает полное обращение вокруг Солнца за 3,63 года. Во сколько раз дальше, чем Земля, он отстоит в среднем от Солнца?

10. Разность гелиоцентрических долгот Земли и Юпитера в настоящий момент равна $\Delta l = 60^\circ$. Через сколько дней наступит восточная квадратура?

11. Принимая, что орбиты планет — круги, находящиеся в одной плоскости, а радиус орбиты предполагаемой планеты равен 40 а.е., определите ее суточное смещение на небесной сфере в противостоянии.

12. * Найдите перигелийное, афелийное расстояния и звездный период обращения малой планеты Белоруссия, если ее большая полуось и эксцентриситет орбиты соответственно равны 2,405 а.е. и 0,181. Через какой промежуток времени повторяются противостояния этой планеты? Какова средняя орбитальная скорость астероида? Каково среднее угловое перемещение астероида в сутки в противостоянии?

13. По снимкам с космического аппарата «Галилео» около астероида Ида был обнаружен спутник Дактил размером $1,6 \cdot 1,2$ км, обращающийся вокруг Иды на расстоянии 100 км. Каков период обращения Дактила вокруг Иды, если считать астероид шарообразным телом диаметром 38 км и средней плотностью $2,5 \cdot 10^3$ кг/м³?

14. Какова масса планеты Плутон, если ее спутник Харон обращается на расстоянии 19,5 тыс. км с периодом 6,39 суток вокруг планеты?

15. 19 августа 1996 г. Венера наблюдалась в западной элонгации. Угловое удаление от Солнца в тот момент было 47° . В какое время суток самые благоприятные условия для ее наблюдения? Определите координаты Венеры и то, в каком созвездии она находилась. Когда наступит следующая западная элонгация Венеры? Рассчитайте расстояние от Венеры до Земли в тот день. Какой будет лучевая скорость Венеры относительно Земли в тот момент?

16. * Определите время минимального смещения небесного тела на небесной сфере, движущегося по круговой орбите с $r = 4$ а.е., которое можно обнаружить с поверхности Земли с помощью зрительной трубы (диаметр ее объектива $D = 60$ мм,

разрешающая способность человеческого глаза $d\theta \sim 1'$, диаметр зрачка $d \approx 6$ мм): в противостоянии; в соединении.

17. * Комета движется вокруг Солнца со скоростью 567,2 км/с. Ее радиус-вектор равен 0,005543 а.с. Определите эксцентриситет орбиты кометы.

18. * Около звезды массой M по круговой орбите движется звезда-спутник массой m ($m \ll M$). В некоторый момент времени центральная звезда вспыхивает как сверхновая и выбрасывает массу qM ($q < 1$). Считая, что эта масса выходит за орбиту спутника мгновенно, не задевая его, опишите возможные траектории последующего движения спутника в зависимости от значения q .

19. Определите звездный период обращения Марса, зная, что его синодический период равен 780 сут.

20. Противостояние Юпитера произошло 15 июля. Когда это произойдет в следующий раз?

21. Наилучшая вечерняя видимость Венеры отмечена 5 февраля. Когда в следующий раз Венера будет лучше всего видна в тех же условиях, если звездный период ее обращения 225 сут?

22. Определите среднее суточное движение Меркурия по орбите, если его синодический период равен 115,88 сут.

23. Чему равен угол наибольшей элонгации Земли с точки зрения марсиан?

24. Определите день ближайшего следующего противостояния Юпитера, зная, что его гелиоцентрическая долгота 1 января $306^\circ 55'$, а Земли — $99^\circ 55'$.

25. * Гелиоцентрическая долгота Юпитера 1 июля была 291° , а Земли — 279° . Определите видимое положение Юпитера 1 сентября. Можно ли было наблюдать эту планету вечером в Санкт-Петербурге ($\varphi = 59^\circ 57'$)?

26. Определите расстояние Юпитера от Солнца в астрономических единицах, если противостояние Юпитера произошло 10 июля. Через 11 лет 315 дней (звездный период обращения Юпитера) геоцентрическая разность долгот Солнца и Юпитера составляла, по наблюдениям, $\Delta l = 120^\circ$ (при решении по возможности не используйте третий закон Кеплера).

27. За какой период времени обращалась бы вокруг Солнца планета, если бы она находилась на расстоянии 100 а.е. от него?

28. Среднее расстояние Венеры от Солнца 0,72 а.е. Определите наибольшую высоту h , на которой в местности с широтой φ можно видеть Венеру в момент захода Солнца, и укажите время года для этого явления. Орбиту Венеры считать круговой, имеющей наклонение 0° .

29. Принимая, что спутники Марса Фобос и Деймос обращаются по круговым орбитам с периодами $7^h 39^m 13^s,85$ и $30^h 17^m 54^s,86$, определите наибольшее угловое удаление Фобоса от Марса во время противостояния, если в этот момент наибольшее угловое удаление Деймоса от Марса составляет $1'23''$,1.

30. Определите сидерический период обращения Меркурия, если известно, что наибольшая его элонгация изменяется от $17^\circ,8$ до $27^\circ,8$.

31. Каков синодический период обращения Венеры, если известно, что наибольшая ее элонгация равна $46^\circ,4$?

32. * Каков промежуток времени (выраженный в марсианских солнечных сутках) между двумя последовательными верхними кульминациями Фобоса, наблюдаемыми на Марсе? Период обращения Марса вокруг оси относительно Солнца равен 24^h37^m среднего солнечного времени, звездный период обращения Фобоса — 7^h39^m среднего солнечного времени.

33. * На сколько звездные сутки на Юпитере короче солнечных, если период обращения этой планеты вокруг оси $9^h50^m30^s$, а продолжительность обращения около Солнца — 4332,6 средних солнечных суток?

34. 20 августа Венера находилась в верхнем соединении. Будет ли в этом году наилучшая утренняя видимость Венеры с Земли?

35. Планета Нептун была открыта 23 сентября 1846 г. Средний радиус его орбиты 30,07 а.е. Определите даты: 1) первого обращения Нептуна вокруг Солнца с момента открытия; 2) такого же взаимного положения Нептуна и Земли, как и в момент открытия. Продолжительность звездного года $T_\oplus = 365^d,25$.

36. На сколько градусов (примерно) сместился Плутон по своей орбите с момента его открытия?

37. Можно ли утверждать, что иногда Нептун является последней по счету от Солнца планетой Солнечной системы?

38. Период обращения Нептуна вокруг Солнца составляет 165 лет. Будет ли виден диск у Солнца, если смотреть на него с Нептуна невооруженным глазом, или оно будет точечным объектом?

39. Изобразите в проекции на плоскость эклиптики орбиту небесного тела, если $a = 1,5$ а.е., $e = 0$, $i = 90^\circ$, $\varOmega = 45^\circ$. Для сравнения на том же чертеже и в том же масштабе изобразите орбиту Земли.

40. Каково угловое расстояние Земли от Солнца в наибольшей элонгации при наблюдении с Юпитера?

41. На каком наибольшем угловом расстоянии от Солнца бывает виден Юпитер с α Cen?

42. Сидерический период осевого вращения Солнца (на экваторе) — 25 сут. Чему равен синодический период его вращения при наблюдении с Меркурия, Земли, Плутона?

43. * Определите характерное время прохождения Венеры по диску Солнца. Как она перемещается по диску, если ее наблюдать из средних широт северного полушария, — справа налево или слева направо?

44. * Диаметр Плутона равен 2356 км, расстояние от Солнца (до конца второго тысячелетия) ~ 30 а.е. Определите ширину полосы на поверхности Земли, из которой можно наблюдать, как Плутон покроет звезду. Сколько это будет длиться?

45. Представьте, что вы производите радиолокацию астероида, движущегося по круговой орбите радиусом $5/3$ а.е. Во сколько раз более мощный импульс вы должны

послать в соединении, чем в противостоянии, чтобы зарегистрировать отраженный сигнал одинаковой силы? На сколько звездных величин этот астероид ярче в противостоянии, чем в соединении?

46. Что стало бы с Солнечной системой, если бы масса Солнца мгновенно уменьшилась вдвое?

47. Как изменилась бы орбита Земли, если бы масса Солнца внезапно увеличилась в 2 раза?

48. Скорость движения кометы в перигелии в 3 раза выше, чем в афелии. Чему равен эксцентриситет ее орбиты?

49. Как зависит линейная скорость движения планеты по круговой орбите от радиуса орбиты r ?

50. Найдите большую полуось гелиостационарной орбиты, т.е. такой круговой орбиты, которая лежит в плоскости экватора Солнца и имеет период обращения, равный сидерическому периоду осевого вращения Солнца ($T_{\odot} = 25^d$).

51. * В Солнечной системе недавно был открыт новый класс объектов — двойные астероиды. Определите наибольшее расстояние от 100-километрового астероида до его спутника — астероида меньшего размера (для расчетов плотность астероидов $\rho = 2 \text{ г/см}^3$, расстояние от них до Солнца $r = 3 \text{ а.е.}$).

52. * Определите параметры (размер, положение центра) сферы притяжения Земли относительно Солнца. Действительно ли сфера притяжения является сферой? При какой массе Земли сфера притяжения была бы плоскостью?

53. Каковы пределы изменения уравниения времени на Марсе (больше или меньше, чем на Земле)? Ответ обоснуйте. Наклон оси Марса к плоскости его орбиты 65° , эксцентриситет орбиты 0,093.

54. Эксцентриситет орбиты Меркурия равен 0,2, большая полуось — 0,4 а.е. Каковы наибольшее и наименьшее расстояния планеты от Земли (в километрах)? Орбиту Земли считать круговой.

55. Яркий звездообразный объект был виден 1 апреля около 7 ч вечера как раз в точке востока. Была это звезда или планета? Ответ обоснуйте.

56. Как изменится период обращения планеты, если ее большая полуось увеличится на малую величину Δa ?

57. Вычислите массу Марса по сравнению с массой Земли по движению его спутника Фобоса, для которого $a_{\text{Ф}} = 9300 \text{ км}$, $T_{\text{Ф}} = 0^d,32$. Соответствующие величины для Луны принять равными 384 000 км и $27^d,3$.

58. Массы Земли и Луны относятся как 81:1. Расстояние между их центрами равно 382 420 км. Где находится их общий центр тяжести?

59. * Выведите формулу, которая выражает время падения t любого небесного тела на свое центральное светило с расстояния a .

60. Каково было бы время падения Земли на Солнце, если бы она перестала обращаться вокруг него?

61. В течение какого времени Плутон, падая на Солнце, достиг бы его поверхности?

62. Сравните отношение количества теплоты, приходящегося на единицу поверхности в Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$) в дни летнего и зимнего солнцестояния и во время прохождения Земли через перигелий (~ 3 января) и афелий (~ 4 июля). Эксцентриситет земной орбиты $e = 0,017$. Во сколько раз влияние наклона солнечных лучей больше влияния изменения расстояния от Солнца в этом городе?

63. Каково прямое восхождение точки на небесной сфере, по направлению к которой движется по орбите Земля 22 июня?

64. Некоторое тело, находясь от Солнца на расстоянии $r = 0,7184$ а.е., движется относительно Солнца со скоростью $v = 33,2$ км/с. Определите вид конического сечения, описываемого телом. Что это за тело?

65. * Планета A движется по эллиптической орбите вокруг Солнца. В момент, когда она находилась на расстоянии r_0 от Солнца, ее скорость равнялась v_0 , а угол между радиус-вектором $\vec{r}_0$ и вектором скорости $\vec{v}_0$ составлял α . Определите наибольшее и наименьшее расстояния, на которые эта планета удаляется от Солнца при своем движении.

66. Докажите, что полная механическая энергия планеты массой m , движущейся вокруг Солнца по эллипсу, зависит только от его большой полуоси a . Найдите формулу зависимости этой энергии от a .

2.2. Движение Земли и Луны

В первом приближении для решения многих задач орбиты планет и Луны можно считать круговыми, а их плоскости — лежащими в плоскости эклиптики. На самом деле, например, плоскость орбиты Луны наклонена к эклиптике под углом в среднем $5^\circ 09'$, а большая полуось ее равна 384 400 км. В перигее расстояние от Земли до Луны 363 400 км, а в апогее — 405 400 км. Период обращения Луны вокруг Земли (*сидерический*, или *звездный, месяц*) составляет 27,32 сут.

Период вращения Луны вокруг своей оси совпадает с сидерическим месяцем, поэтому с Земли всегда видна только одна половина ее поверхности. Однако благодаря некоторым особенностям движения и положения Луны в пространстве на самом деле можно видеть несколько больше чем 50 % ее поверхности.

Ось вращения Луны наклонена под углом $83^\circ 19'$ к плоскости лунной орбиты, поэтому лунный экватор составляет с плоскостью орбиты угол $6^\circ 41'$, а с плоскостью эклиптики — около $1^\circ 30'$. Благодаря этому наклону с Земли поочередно виден то южный, то северный полюс Луны. Создается впечатление, будто Луна «покачивается» на $6^\circ 41'$ (достигает $6^\circ 50'$) вдоль меридианов, т.е. происходит так называемая *либрация по широте*. Из-за неравномерности движения Луны по эллиптической орбите вокруг Земли и относительной равномерности вращения вокруг своей оси Луна «покачивается» вдоль параллелей, т.е. происходит *либрация по долготе* в пределах $7^\circ 54'$. Кроме того, из разных точек поверхности Земли од-

новременно видны разные участки поверхности Луны, что даст *суточную*, или *параллактическую, либрацию* около 1° . Все эти явления вместе называются *оптической либрацией*. Благодаря им с Земли можно наблюдать около 60 % поверхности Луны.

В зависимости от расположения Солнца, Земли и Луны друг относительно друга для землян будет освещена определенная часть лунного диска, которая характеризует *фазу Луны*. Численно фаза Луны Φ равна отношению освещенной части лунного диска b к величине диаметра d , т.е. $\Phi = b/d$ (рис. 2.10). Последовательность смены фаз Луны от новолуния ($\Phi = 0$) до полнолуния ($\Phi = 1$) и наоборот представлена на рис. 2.11.

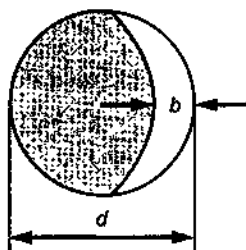


Рис. 2.10. Численное определение фазы Луны ($\Phi = b/d$)

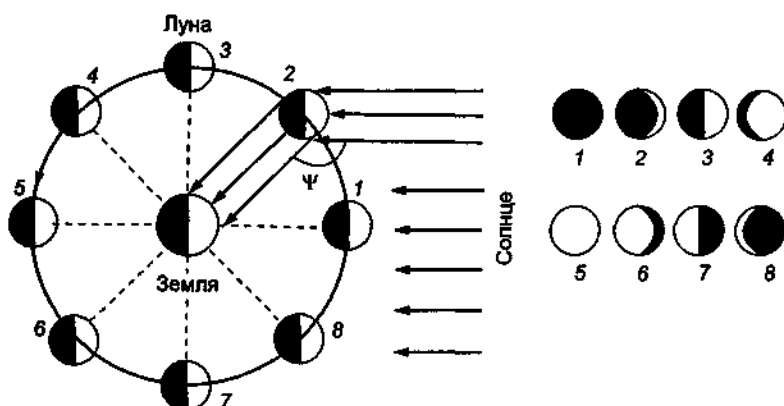


Рис. 2.11. Последовательность изменения фаз Луны в зависимости от фазы Φ и фазового угла ψ : 1 — новолуние ($\Phi = 0$, $\psi = 180^\circ$); 3 — первая четверть ($\Phi = 0,5$, $\psi = 90^\circ$); 5 — полнолуние ($\Phi = 1$, $\psi = 0^\circ$); 7 — последняя четверть ($\Phi = 0,5$, $\psi = 90^\circ$)

Период смены фаз Луны — это *синодический*, или *лунный, месяц*, который составляет 29,53 сут.

Солнечные и лунные затмения возможны, если Луна находится вблизи прямой Солнце — Земля, т.е. около узлов лунной орбиты. Солнечное затмение может быть

лишь в новолуние (рис. 2.12), а лунное затмение — лишь в полнолуние (рис. 2.13). Эти условия повторяются 2 раза в год, примерно через каждые 6 звездных месяцев.

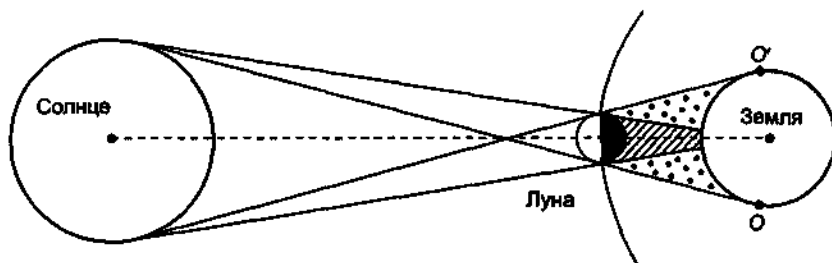


Рис. 2.12. Солнечное затмение

Фаза солнечного затмения $\Phi_{\odot}$ определяется по выражению

$$\Phi_{\odot} = \frac{\rho_{\odot} + \rho_{\zeta} - \tau}{2\rho_{\odot}}, \quad (2.21)$$

где $\rho_{\odot} \approx 16,3'$ и $\rho_{\zeta} \approx 15,5'$ — угловые видимые радиусы Солнца и Луны; τ — расстояние между центрами солнечного и лунного дисков (прицельное расстояние).

Фаза лунного затмения Φ_{ζ} рассчитывается по формуле

$$\Phi_{\zeta} = \frac{\rho_{\tau} + \rho_{\zeta} - \tau}{2\rho_{\zeta}}, \quad (2.22)$$

где $\rho_{\tau} \approx 41'$ и $\rho_{\zeta} \approx 15,5'$ — угловые радиусы земной тени и Луны; τ — расстояние между центрами дисков земной тени и Луны (прицельное расстояние).

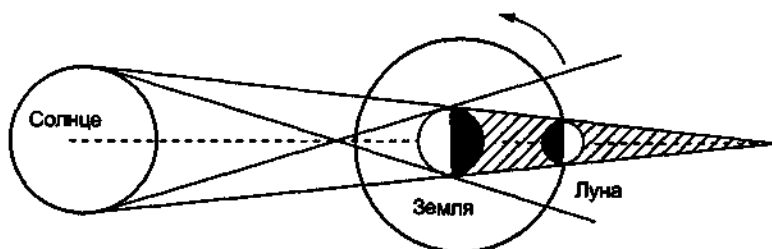


Рис. 2.13. Лунное затмение

Частота и периодичность солнечных и лунных затмений определяются несколькими временными параметрами, характеризующими движение Луны по орбите вокруг Земли и Земли вокруг Солнца:

а) драконическим годом Y_D , равным $346^d,62$ (период возвращения Солнца к тому же самому узлу лунной орбиты);

б) синодическим месяцем S , равным $29^d,53$ (период повторения одинаковых фаз Луны);

в) драконическим месяцем, S_D , равным $27^d,21$ (период возвращения Луны к тому же самому узлу своей орбиты).

Расчеты показывают, что в каждой зоне узлов обязательно произойдет одно (полное или частное) солнечное затмение и не более одного лунного (может и не быть). Минимальное количество затмений в году — два (причем оба солнечных), а наибольшее — семь (пять солнечных и два лунных или четыре солнечных и три лунных). Правда, при условии, что в этом случае первое затмение должно приходится на начало января. Чаше всего за год бывает два солнечных затмения и одно-два лунных. Реально лунные затмения наблюдаются чаще, так как они видны со всей ночной территории Земли одновременно по всемирному времени, а солнечные — лишь в области лунной тени (максимальный диаметр — 270 км).

Цикл затмений повторяется через 18 лет 11,3 дня. Этот промежуток времени называется *саросом*. Он определяется совпадением определенного числа драконических лет Y_D (19), синодических месяцев S (223) и драконических месяцев S_D (242). На протяжении сароса бывает 70 затмений, из которых 41 солнечное (около 10 полных) и 29 лунных.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Почему с поверхности Земли можно наблюдать лишь часть ($\approx 59\%$) поверхности Луны? Почему больше чем 50 %?
2. Считая орбиту Луны круговой радиусом $R = 384\,400$ км, определите среднюю скорость естественного спутника Земли.
3. Нарисуйте схему возникновения *кольцеобразного* солнечного затмения.
4. Возможно ли *кольцеобразное* лунное затмение?
5. Что такое *полутеневое* лунное затмение?
6. Можно ли в новолуние видеть поверхность Луны?
7. Каково будет прицельное расстояние τ , если Солнце и Луна соприкасаются внешними частями дисков?

Примеры решения задач

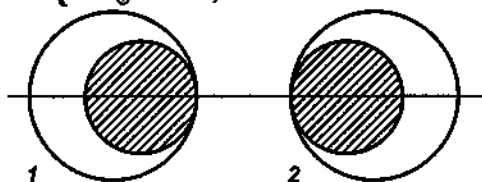
Задача 1. Определите максимальную фазу солнечного затмения и ее продолжительность, если прицельное расстояние $\tau = 0$, видимые угловые диаметры Солнца и Луны $32'20''$ и $29'50''$ соответственно. Считайте, что средняя угловая скорость Луны $0,53$ град/ч, а Солнца — $2,463$ угл.мин/ч.

Решение. Максимальную фазу солнечного затмения можно определить по формуле (2.21), когда диск Луны полностью находится в пределах диска Солнца:

$$\Phi_{\odot} = \frac{\rho_{\odot} + \rho_{\ominus}}{2\rho_{\odot}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_{\ominus}}{\rho_{\odot}} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{29'50''}{32'20''} \right) = 0,961,$$

а ее продолжительность вычислим по следующему уравнению (рисунок поясняет этот расчет):

$$\Delta T = \frac{\Delta d}{\Delta v} = \frac{d_{\odot} - d_{\zeta}}{v_{\zeta} - v_{\odot}} = \frac{150''}{29'' \cdot 337} = 5,113 \text{ мин} = 5 \text{ мин } 6,8 \text{ с.}$$



Продолжительность максимальной фазы солнечного затмения

Задача 2. Определите видимую звездную величину Земли для наблюдателя на Луне в момент «полноземья», если коэффициент рассеяния солнечного света атмосферой нашей планеты $\rho_{\oplus} = 0,3$, альbedo Луны $\rho_{\zeta} = 0,06$. Видимая звездная величина Луны $m_{\zeta} = -12^m,5$, средний радиус Земли $R_{\oplus} = 6371$ км, Луны — $R_{\zeta} = 1738$ км.

Решение. Если считать, что Земля и Луна находятся примерно на одинаковом расстоянии от Солнца, то освещенность поверхностей этих планет одинакова — E_0 . Потоки излучения, которые отражают и рассеивают Луна и Земля в пространство, выразим через площади их освещенных поверхностей S_{ζ} , $S_{\oplus}$ и альbedo ρ_{ζ} , $\rho_{\oplus}$: $\Phi_{\zeta} = E_0 S_{\zeta} \rho_{\zeta}$ и $\Phi_{\oplus} = E_0 S_{\oplus} \rho_{\oplus}$. Следовательно, освещенность Земли светом от Луны $E_{\oplus} \sim \frac{E_0 S_{\zeta} \rho_{\zeta}}{r^2}$, освещенность Луны светом от Земли $E_{\zeta} \sim \frac{E_0 S_{\oplus} \rho_{\oplus}}{r^2}$.

Используя формулу Погсона, получим:

$$\lg \frac{E_{\zeta}}{E_{\oplus}} = \lg \frac{S_{\oplus} \rho_{\oplus}}{S_{\zeta} \rho_{\zeta}} = 0,4(m_{\zeta} - m_{\oplus}),$$

где m_{ζ} — звездная величина Луны, видимая с Земли; $m_{\oplus}$ — звездная величина Земли, видимая с Луны.

Отсюда, подставив значения, получим

$$m_{\oplus} = m_{\zeta} - 2,5 \cdot \lg \frac{R_{\oplus}^2 \rho_{\oplus}}{R_{\zeta}^2 \rho_{\zeta}} \approx -17^m,1.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Видна ли Луна в июньское полнолуние на северном полюсе? Ответ обоснуйте.

2. Почему летом Луна в полнолуние всегда тусклая, желтая и находится невысоко над горизонтом (в наших широтах), а зимой, наоборот, яркая и «поднимается» высоко?

3. Какова наибольшая и наименьшая высота верхней кульминации Луны в вашем городе?

4. Можно ли в Беларуси увидеть Луну в зените?

5. Луна видна в последней четверти. Чему в среднем равны лучевые скорости звезд, находящихся неподалеку от нее?

6. 7 февраля Луна была в последней четверти. Чему равнялось ее прямое восхождение?

7. 22 июня на диске Солнца с правой стороны виден ущерб. Это начало или конец затмения?

8. Какова наибольшая продолжительность солнечного затмения? Наклоном лунной орбиты пренебречь.

9. На какой максимальной высоте может находиться Луна в полнолуние для широты Минска ($\varphi = 53^\circ 54'$)? Когда наступит такой момент? В каком созвездии будет Луна?

10. Какова минимальная скорость падения метеорита на Луну?

11. *Каково должно быть расстояние до Луны, чтобы на ее орбите в Солнечной системе находились точки перегиба? Считать, что Луна движется строго в плоскости эклиптики, а ее орбита относительно Земли круговая.

12. Радиус Луны равен 1740 км, масса ее составляет $1/81$ массы Земли. Определите: а) длину l секундного маятника на поверхности Луны; б) продолжительность колебания T , которую имел бы на Луне земной секундный маятник. Ускорение силы тяжести на поверхности Земли $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$; радиус Земли $R_0 = 6371 \text{ км}$.

13. Представьте, что звездный месяц составляет 60 сут. Каков был бы тогда промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми кульминациями Луны?

14. Какова была бы продолжительность синодического месяца, если бы звездный месяц составлял 60 сут?

15. Каков был бы синодический период обращения Луны, если бы она обращалась вокруг Земли с востока на запад с той же скоростью, что и сейчас?

16. Почему Луна, двигаясь по небесной сфере, непременно закроет любую звезду, имеющую астрономическую широту $\beta = +6^\circ 38'$? Наклон лунной орбиты принять равным $i = 5^\circ 20'$ (наибольшее возможное значение этой переменной величины).

17. Какова наименьшая широта, на которой с Земли можно видеть Луну (без учета рефракции и параллакса) над горизонтом в течение 48 часов подряд?

18. Известно, что большая полуось лунной орбиты постепенно увеличивается. Когда она возрастет на 3 % (5%, 10 %), будут ли происходить на Земле полные солнечные затмения?

19. Как часто Луна закрывает звезды, видимые невооруженным глазом?

20. В какое время года серп «молодого месяца» (первая четверть) особенно высоко стоит на небе?

21. 21 января 2000 г. произошло лунное затмение. В каком созвездии находилась Луна в это время? Определите ее экваториальные координаты.

22. Луна возшла 20 сентября в $23^h 52^m$ по местному времени. Когда и в какое время она взойдет следующий раз? В какой фазе Луна находится? Ответы обоснуйте.

23. Видимые с поверхности Земли диски Луны и Солнца вследствие эллиптичности орбит Земли и Луны изменяются по величине: для Луны — $29'20'' \leq d_L \leq 33'32''$, для Солнца — $31'31'' \leq d_\odot \leq 32'36''$. Во сколько раз ослабевает свет Солнца при самом ярком кольцеобразном затмении? Считать поверхность Солнца одинаково яркой.

2.3. Движение искусственных тел

Закон всемирного тяготения позволяет объяснить движение планет и искусственных тел — искусственных спутников Земли (ИСЗ), космических межпланетных аппаратов (КА). При описании движения искусственных тел часто приходится решать задачу движения материальной точки массой m под действием силы притяжения центрального тела массой M (задача двух тел). Характер движения тела m относительно M будет зависеть от начальной скорости v_0 . Решение задачи двух тел позволяет получить значение скорости v на любом расстоянии r (в том числе в момент запуска аппарата) в виде интеграла энергии, выражаемого формулой (2.14).

ИСЗ выводятся на орбиту с помощью ракет-носителей. Последняя ступень сообщает определенную скорость спутнику на некоторой высоте. Тело, запущенное горизонтально на высоте h от поверхности Земли ($(R_\oplus + h)$ — расстояние от центра Земли), станет ИСЗ при достаточной для этого скорости. Если $v_{\text{ИСЗ}} = v_c$ [см. уравнение (2.12)], ИСЗ станет двигаться по кругу. При $v_c < v_{\text{ИСЗ}} < v_p$ [см. (2.13)] ИСЗ будет двигаться по эллипсу, причем точкой старта спутника станет перигей (рис. 2.14). Используя формулу (2.14), можно рассчитать скорость ИСЗ для движения по орбитам с различным эксцентриситетом e .

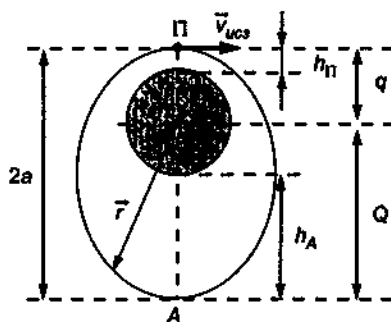


Рис. 2.14. Движение ИСЗ по эллиптической орбите

При запуске аппарата с высоты h его круговая скорость

$$v_c = \sqrt{\frac{gR_\oplus^2}{R_\oplus + h}} = \sqrt{\frac{Gm}{R_\oplus + h}}. \quad (2.23)$$

Здесь $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; $R_\oplus = 6378 \text{ км}$ — радиус Земли; $m = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ — масса Земли.

Рассчитав скорость движения воображаемого спутника по окружности у самой поверхности Земли ($h = 0$), получим *первую космическую скорость* $v_{1к} = 7,91 \text{ км/с}$.

Расстояние перигея и апогея от центра планеты

$$\begin{aligned} q &= a(1 - e) = R + h_{\Pi}, \\ Q &= a(1 + e) = R + h_A, \end{aligned} \quad (2.24)$$

где R — радиус планеты; a , e — большая полуось и эксцентриситет орбиты ИСЗ; h_{Π} , h_A — высота перигея и апогея орбиты ИСЗ от поверхности планеты.

Период обращения тел вычисляется по третьему закону Кеплера:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{Gm}} a^{3/2} = \frac{2\pi}{R\sqrt{g}} a^{3/2}. \quad (2.25)$$

Траектория движения КА состоит из активного и пассивного участков. На активном участке, когда двигатели КА включены, характер движения определяется притяжением Земли. Пассивный участок начинается после отключения двигателей. Если скорость КА на начальной стадии движения $v \geq v_p$, то КА будет двигаться по параболе (или гиперболе) до тех пор, пока не выйдет из сферы действия Земли и/или не войдет в сферу действия другого тела.

При рассмотрении вопроса о движении искусственного аппарата от одного небесного тела к другому следует учитывать радиус сферы действия ρ тела массой m относительно другого тела массой m' :

$$\rho = r \left(\frac{m}{m'} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (2.26)$$

где r — расстояние между m и m' .

Чтобы КА вышел из сферы действия тела m , с которого его запускают, и попал в сферу действия второго тела m' , необходимо придать ему начальную скорость:

$$v_0 \geq v_p = v_c \sqrt{2} = \sqrt{\frac{2Gm}{R + h}}. \quad (2.27)$$

У поверхности Земли ($h = 0$) параболическая скорость $v_{2к}$, которая в этом случае называется *второй космической скоростью*, равна $11,2 \text{ км/с}$.

Чтобы КА вышел из сферы действия тела, с поверхности которого он запущен, ему необходимо сообщить некоторую начальную скорость v_0 :

$$v_0 = \sqrt{v_p^2 + v_{\text{доп}}^2}. \quad (2.28)$$

Здесь v_p — параболическая скорость КА относительно тела, с поверхности которого он запускается; $v_{\text{доп}}$ — дополнительная скорость КА, которую он должен иметь, войдя в сферу притяжения Солнца, относительно тела, с поверхности которого запускается (эта дополнительная скорость определяется как векторная разность между гелиоцентрической скоростью КА и гелиоцентрической скоростью планеты).

Если мы рассматриваем возможность выхода тела из сферы действия Солнца (выход за пределы Солнечной системы) при старте с Земли, дополнительная скорость определяется как разность параболической скорости КА относительно Солнца на расстоянии Земли от Солнца $v_{p\odot} = 42,1$ км/с и гелиоцентрической скорости Земли $v_{\oplus} = 29,8$ км/с (при старте в направлении движения Земли вокруг Солнца):

$$v_{\text{доп}} = v_{p\odot} - v_{\oplus} = 12,3 \text{ км/с} \quad (2.29)$$

или как их сумма (при старте против направления движения Земли вокруг Солнца):

$$v_{\text{доп}} = v_{p\odot} + v_{\oplus} = 71,9 \text{ км/с}. \quad (2.30)$$

Таким образом, принимая во внимание, что $v_p = 11,2$ км/с, из формулы (2.28) получаем, что начальная скорость, необходимая для выхода за пределы Солнечной системы при старте с Земли, должна быть:

$$16,6 \leq v_0 \leq 72,8 \text{ км/с}. \quad (2.31)$$

Минимально возможная при этом скорость $v_{3к} = 16,6$ км/с называется *третьей космической скоростью*.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Как объяснить движение большинства планет по орбитам, близким к круговым?
2. Покажите, что скорость Земли на орбите 29,8 км/с соответствует круговому движению тела на расстоянии 1 а.е. относительно Солнца.
3. Перечислите условия, необходимые для запуска ИСЗ и КА.
4. Определите радиус r сферы действия Луны относительно Земли.
5. Что такое дополнительная скорость КА и каков ее физический смысл?
6. Что подразумевают под первой, второй и третьей космической скоростью?
7. Можно ли запустить ИСЗ со скоростью, которая меньше первой космической?
8. Где больше скорость ИСЗ — в апогее или перигее?
9. Определите отношение скоростей Земли на орбите в афелии и перигелии. Необходимые для расчета параметры приведены в справочнике.

Примеры решения задач

Задача 1. Найдите закон изменения массы ракеты в зависимости от времени, если ракета движется в отсутствие внешних сил с постоянным ускорением ω , скорость истечения газа относительно ракеты постоянна и равна u , а ее масса в начальный момент m_0 .

Решение. Запишем приращение импульса системы ракета — газ в инерциальной системе отсчета, связанной с ракетой в некоторый момент времени t_1 , за время Δt (для $t_1 + \Delta t$): $\Delta p = m\omega \cdot \Delta t + \Delta m \cdot u$ (заметим, что $\Delta m < 0$). Поскольку в отсутствие внешних сил $\Delta p = 0$, получим

$$\frac{\Delta m}{m} = -\frac{\omega \cdot \Delta t}{u} \Rightarrow \int_{m_0}^m \frac{\Delta m}{m} = -\frac{\omega \cdot t}{u} \Rightarrow m = m_0 \cdot e^{-\frac{\omega \cdot t}{u}}.$$

Задача 2. Два спутника Земли движутся в одной плоскости по круговым орбитам. Радиус орбиты одного спутника $r_1 = 7000$ км, другого — $r_2 = 7070$ км. Определите синодический период движения этих спутников относительно друг друга.

Решение. Рассмотрим два возможных случая: спутники движутся: 1) в одном направлении; 2) в разных направлениях.

1. При движении в одном направлении формула для их синодического периода

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T + \Delta T},$$

где $T_1 = T$ и $T_2 = T + \Delta T$ — периоды обращения спутников вокруг Земли.

$$\text{Отсюда } S = T \left(1 + \frac{T}{\Delta T} \right).$$

2. При движении спутников в противоположных направлениях формула для синодического периода

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T + \Delta T}.$$

$$\text{Отсюда } S = T \frac{1 + \frac{\Delta T}{T}}{2 + \frac{\Delta T}{T}}.$$

Значения T и ΔT определяем на основании третьего закона Кеплера, учитывая, что $M_{\oplus} \gg m_{\text{сп}}$, и выразим их через $r = r_1$ и $\Delta r = r_2 - r_1$:

$$\frac{r^3}{T^2 M_{\oplus}} = \frac{G}{4\pi^2}; \quad T = \frac{2\pi r^{3/2}}{(GM_{\oplus})^{1/2}}.$$

Продифференцировав последнее выражение, имеем

$$\Delta T = \frac{3\pi r^{1/2}}{(GM_{\oplus})^{1/2}} \Delta r; \quad \Delta T = \frac{3}{2} \frac{T}{r} \Delta r.$$

Подставив значения T и ΔT в формулы для синодического периода, в итоге получим: 1) $S = 4^d,57$; 2) $S = 49^m$.

Задачи для самостоятельного решения

1. За какое время можно долететь от Земли до Марса в космическом корабле, движущемся по орбите, перигелийное расстояние которой равно расстоянию Земли от Солнца (1 а.е.), афелийное расстояние равно расстоянию Марса от Солнца (1,5 а.е.)?

2. * Спутник движется по круговой орбите с $r = 7000$ км. В некоторый момент времени его скорость возросла на $\Delta v = 200$ м/с. Определите максимальное удаление спутника от поверхности Земли ($R_{\oplus} = 6371$ км; $M_{\oplus} = 5,973 \cdot 10^{24}$ кг; $G = 6,6742 \times 10^{-11}$ м³/(кг·с²)).

3. Каков предельный размер шарообразного астероида со средней плотностью $\bar{\rho} = 3$ г/см³, с которого можно, не разбегаясь, прыгнуть в открытый космос?

4. Спутник «Молния» в перигее удален от центра Земли на 7000 км, в апогее — на 46 000 км. Вычислите период обращения спутника вокруг Земли и эксцентриситет его орбиты.

5. При трении о воздух скорость спутника, летящего в разреженных слоях атмосферы, не снижается, а повышается. Докажите, что так оно и должно быть, а энергия, которую спутник расходует на преодоление сопротивления воздуха, равна приращению его кинетической энергии.

6. Как будут изменяться линейная и угловая скорости спутника, движущегося в условиях слабого трения? Считать орбиту спутника круговой.

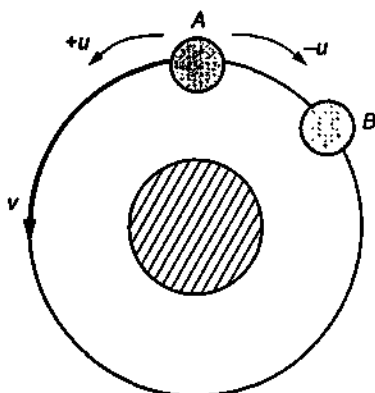
7. Звездолет исследует нейтронную звезду массой $M = 2M_{\odot}$. На каком расстоянии от нее приливные силы не создают опасности для здоровья космонавта? Безопасной считать перегрузку не более 2g.

8. Определите, когда по местному времени 21 марта и под каким углом к горизонту необходимо на широте $\varphi = 55^\circ$ запустить звездолет с минимальными затратами энергии.

9. Космический корабль стартует с борта искусственного спутника Земли, движущегося вокруг планеты по эллиптической орбите. В какой точке траектории спутника целесообразнее осуществить запуск космического корабля, если известно, что вторая космическая скорость в апогее ($h_a = 330$ км) равна 10,918 км/с, а в перигее ($h_p = 180$ км) — 11,040 км/с.

10. Определите массу и среднюю плотность планеты, если известно, что скорость спутника на круговой орбите вокруг планеты $v = 9$ км/с, время обращения $T = 2$ ч, а расстояние от поверхности $h = 100$ км.

11. * По круговой орбите на небольшом расстоянии друг от друга в одном направлении движутся два спутника A и B (см. рисунок). С первого спутника на второй нужно перебросить контейнер. В каком случае контейнер будет быстрее доставлен на второй спутник, если бросить его по движению или против движения первого спутника? Ответ обоснуйте. Скорость контейнера относительно спутника u значительно меньше скорости спутника v .



Движение спутников по круговой орбите

12. Спутник пролетает над поверхностью Земли на высоте 200 км. Каков наименьший размер деталей на Земле, которые можно с него сфотографировать? Размер диска дрожания звезды из-за влияния земной атмосферы составляет $1-2''$.

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ АСТРОФИЗИКИ

3.1. Астрофизика планет и звезд

3.1.1. Земля — планета Солнечной системы

В первом приближении Земля является шарообразной. Принцип определения ее размеров был предложен еще в III в. до н.э. древнегреческим философом и географом Эратосфеном Александрийским (276–194 гг. до н. э.).

На рис. 3.1 видно, что длина единичной дуги (дуга в 1°)

$$l^\circ = \frac{l}{\Delta\varphi^\circ} = \frac{l}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{\pi R_\varphi}{180^\circ},$$

где R_φ — радиус кривизны земного шара; φ — широта местности.

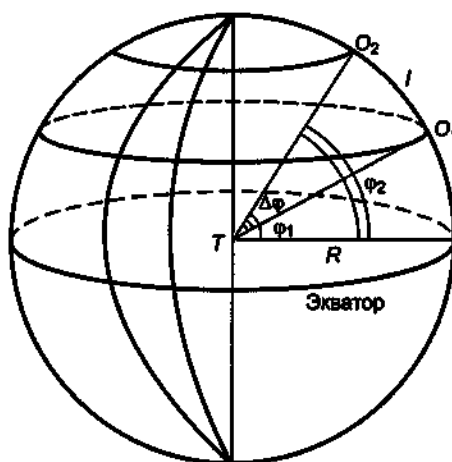


Рис. 3.1. Измерение радиуса земного шара

Отсюда радиус кривизны этой дуги

$$R_\varphi = \frac{180^\circ \cdot l}{\pi(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

Если радиусы кривизны R_φ разных участков земного меридиана одинаковы, то он является полуокружностью и Земля имеет форму шара. В противном случае Земля не является шарообразной.

Непосредственно измерить значительные линейные расстояния вдоль географического меридиана невозможно из-за естественных преград. Для этого исполь-

зуется метод триангуляции (от лат. «треугольник»). Вдоль дуги меридиана, длину которой нужно определить, по обеим сторонам устанавливают специальные вышки (геодезические сигналы), которые являются вершинами сети треугольников. Эта система называется триангуляционной сетью. Одну из сторон треугольника, связанную с конечным пунктом, принимают за базис, длину которого тщательно измеряют. Затем с помощью угловых измерений определяют углы всех треугольников и по формулам для сферических треугольников рассчитывают все стороны треугольников, а также длину их проекций на меридиан, т.е. длину дуги меридиана (рис. 3.2).

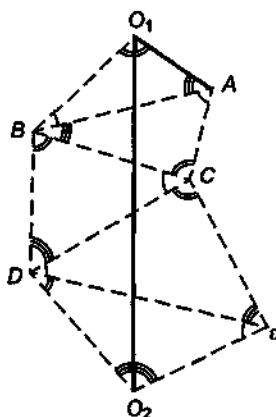


Рис. 3.2. Схема триангуляции для дуги меридиана O_1O_2

Базис измеряют с помощью свето- и радиолокации. Длина базиса в этом случае может достигать 40 км. Ее измеряют с точностью ± 2 мм на каждые 10 км. В современной триангуляционной сети используются довольно сложная наземная радиолокационная аппаратура и данные искусственных спутников Земли.

Измерения показали, что R^ϕ и радиус кривизны единичной дуги R_ϕ изменяются от экватора к географическому полюсу. При $\phi = 0$ получаем $R^\phi = 110,576$ км; $\phi = 45^\circ - R^\phi = 111,143$ км; $\phi = 90^\circ - R^\phi = 111,696$ км. Форма Земли близка к эллипсоиду вращения (сфероиду).

В 1979 г. на XVII съезде Международного геодезического и геофизического союза в Канберре были приняты следующие элементы сфероида: экваториальная полуось $a = R_0 = 6378,136$ км; полярная полуось $b = R_p = 6356,751$ км; $\Delta R = 21,385$ км; сжатие сфероида $\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{1}{298,257}$.

В геодезии и гравиметрии при проведении точных измерений принято считать, что форма Земли отличается от сфероида и близка к поверхности спокойного океана, которая продолжается под материками. Такая фигура (геоид) описывается поверхностью равновесия (уровенной поверхностью), в каждой точке которой

нормаль совпадает с отвесной линией (на материках это бывает не всегда из-за различной плотности пород).

В астрономии часто используют такие значения параметров Земли: $R_0 = 6378$ км; $R_p = 6357$ км; $I^\circ = 111,2$ км; $\varepsilon = 1/298$. Земной экватор подобен окружности длиной 40 075 км, а меридианы — эллипсам длиной 40 008 км.

Период вращения Земли $T = 23^h 56^m 04^s = 86164^s$ (среднего времени), поэтому линейная скорость вращения точек земного экватора

$$v_0 = \frac{2\pi R_0}{T} = \frac{2 \cdot 3,14159 \cdot 6378136}{86164} \approx 465 \text{ м/с},$$

на произвольной географической широте φ : $v = v_0 \cdot \cos \varphi = 465 \cdot \cos \varphi$ м/с.

Угловая скорость ω всех точек земной поверхности одинакова:

$$\omega = \frac{360^\circ \cdot 360''}{86164} = 15'',04 (\text{с}^{-1}) = 7,2921 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}.$$

Ускорение силы тяжести Земли не одинаково вдоль меридиана и зависит от широты местности. На произвольной широте φ ускорение силы тяжести на уровне океана можно выразить формулой $g_\varphi = g_0 + (g_{90} - g_0) \sin^2 \varphi$ ($g_0 = 978,0$ см/с² — ускорение на экваторе; $g_{90} = 983,3$ см/с² — на полюсе). Отклонение $\Delta g_\varphi = g'_\varphi - g_\varphi$ называется гравитационной аномалией (g_φ — среднее значение ускорения на широте φ ; g'_φ — местное его значение, связанное с наличием залежей полезных ископаемых, неоднородным строением земной коры и т.п.). Если $\Delta g_\varphi > 0$, то в этом месте, возможно, имеются залежи тяжелых элементов (руды), если $\Delta g_\varphi < 0$, то здесь есть нефть или газ.

На основании подобных гравиметрических измерений силы тяжести был сделан вывод, что масса Земли примерно равна $M_\oplus = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг, а ее средняя плотность $\rho_\oplus = 5,52$ г/см³. В то же время известно, что плотность земной коры $\rho = 2,70$ г/см³. Из этого следует прежде всего, что плотность Земли значительно увеличивается с глубиной.

О свойствах *литосферы* Земли (в широком смысле этого слова, т.е. о твердой составляющей Земли) судят в основном по данным сейсмологических исследований. Например, момент инерции шара, плотность которого возрастает к центру, меньше, чем у однородного шара. Чем больше масса концентрируется к центру, тем меньше момент инерции. Момент инерции Земли равен 0,83 момента инерции однородного шара такого же размера и массы.

Известно, что сейсмические волны бывают продольными и поперечными. Зная их тип и характер (например, скорость) распространения внутри Земли, можно судить о составе и свойствах литосферы. Поперечные волны существуют только в твердых телах. Их наличие свидетельствует о том, что литосфера является твердой вплоть до больших глубин. Однако было доказано, что начиная с глубины

~3000 км поперечные волны распространяться не могут. Следовательно, внутри литосферы есть жидкое ядро.

Верхний слой литосферы (см. рис. 3.5) — *кора* толщиной в среднем $h \approx 35$ км — в некоторых местах она достигает 70 км. Возраст земной коры примерно $4,5 \cdot 10^9$ лет. Верхний ее слой (5–7 км) состоит преимущественно из осадочных пород, оксидов Si, Al, Fe и щелочных металлов. Средний слой — гранитный (состоит на 70 % из кремнезема) толщиной до 35–40 км, но в некоторых местах он может выходить на поверхность. Нижний слой коры — базальтовый, его толщина достигает 30 км.

В земной коре температура повышается с глубиной: за первые 3 км — на 1° каждые 100 м, затем на 2° на 100 м. На глубине 10 км температура t примерно 180°C . Это обусловлено, прежде всего, потоком тепла из глубин.

Под корой залегает слой, называемый *мантией*. Граница между корой и мантией довольно резко обозначена и называется слоем (поверхностью) Мохоровичича (на глубине в среднем 40 км). Мантия состоит в основном из веществ в твердом состоянии (базальты, силикаты), за исключением отдельных лавовых «карманов», которые находятся в жидком состоянии при этих температуре и давлении. Плотность мантии возрастает от поверхности Мохоровичича до границы ядра от 3,3 до $5,2 \text{ г/см}^3$. Нижняя граница мантии находится на глубине около 2950 км.

В современных моделях Земли выделяют *литосферу* (в узком смысле этого слова) — наружный слой твердой составляющей Земли, который включает в себя кору и верхнюю часть мантии приблизительно до глубины 70 км, и *астеносферу* — нижнюю часть мантии. Литосфера расколота примерно на 10 больших тектонических плит, по границам которых расположена подавляющая часть очагов землетрясений. Под жесткой литосферой находится слой повышенной текучести — астеносфера Земли (здесь температуры вещества мантии наиболее близки к температурам плавления). Из-за малой вязкости астеносферы литосферные плиты «плавают» в астеносферном «океане». Этим объясняется такое явление, как дрейф материков.

Далее следует *ядро* Земли. Оно состоит из двух частей: *внутреннего* и *внешнего* ядер. Внешнее ядро (слой толщиной 2100–2200 км), которое составляет около 30 % массы Земли, обладает свойствами тягучей жидкости и электропроводностью, состоит на 12 % из S и на 88 % из Fe. На границе мантия — внешнее ядро плотность резко повышается до $9,4 \text{ г/см}^3$, а температура — от 2000 до 4000°C , давление возрастает от $1,5 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^6$ атм. Внутреннее ядро имеет радиус примерно 1250 км. Оно составляет около 1,7 % массы Земли и обладает свойствами твердого тела. В его центральной зоне $t \approx 5000^\circ\text{C}$, $p = 3,6 \cdot 10^6$ атм, $\rho = 12,5 \text{ г/см}^3$. Внутреннее ядро на 20 % состоит из Ni и на 80 % — из Fe.

Наиболее распространенные химические элементы в твердой оболочке Земли: Fe (34,6 %), O (29,5 %), Si (15,2 %), Mg (12,7 %). Содержание остальных элементов в сумме составляет менее 8 %. Из соединений можно выделить SiO_2 и Al_2O_3 .

Земля — единственная известная планета Солнечной системы, которая обладает *гидросферой*. Гидросфера сыграла решающую роль в процессе возникновения жизни на Земле. Благодаря циркуляции воды и ее высокой теплоемкости гидросфера уравнивает климатические условия на разных широтах и формирует климат на планете. Кроме того, вода создает парниковый эффект: ее пары в атмосфере поглощают инфракрасное излучение с максимумом $\lambda = 10$ мкм, которое переизлучается земной поверхностью, тем самым равновесная температура Земли повышается на $\sim 40^\circ\text{C}$.

Земная *атмосфера* в основном состоит из азота (78,1 %), кислорода (20,9 %), аргона (0,93 %) и углекислого газа (около 0,03 %). Остальные составляющие — примеси Ne, He, Kr, H₂, CH₄, N₂O. Важными переменными составляющими также являются водяной пар H₂O (от 0 до 3 %, причем в полярных зонах — 0,2 %, а на экваторе — 3 %) и озон O₃ ($3 \cdot 10^{-6}$ % — на уровне моря, на высоте 20–30 км — от $3 \cdot 10^{-4}$ до 1 %). Такой процентный состав сохраняется примерно до высоты 100–120 км, за исключением озона, который находится преимущественно на высоте около 30 км, и водяных паров, которых выше 10–15 км почти нет.

Атмосфера Земли состоит из пяти слоев: тропосферы, стратосферы, мезосферы (озоносферы), термосферы (ионосферы) и экзосферы. Такое разделение показано на рис. 3.3 (хорошо видна зависимость температуры атмосферы от высоты).

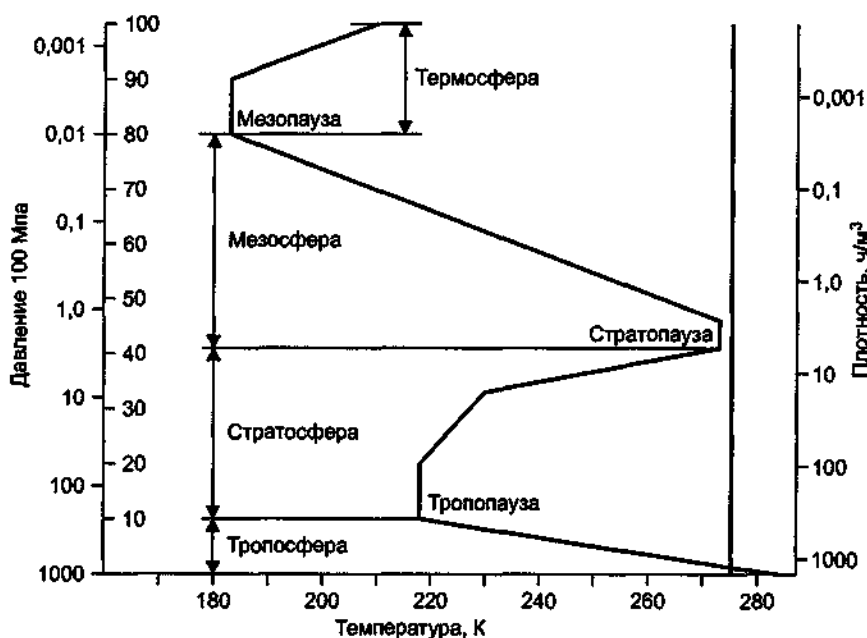


Рис. 3.3. Физические характеристики атмосферы Земли в зависимости от высоты

Внизу расположена *тропосфера* (до высоты 11–12 км в средних широтах, до 8–10 км в полярных широтах и до 16–18 км на экваторе). В тропосфере температура снижается быстро (~6 град/км) с увеличением высоты до -55°C , а давление — с 1 до 0,026 атм. Тропосфера содержит 80 % всей массы атмосферы и почти все водяные пары. Часть тепла передается в тропосфере конвекцией, поэтому она называется еще конвективной зоной.

После тропосферы идет *стратосфера* (граница между ними называется тропопаузой), в нижних (до 20 км) слоях которой температуру можно считать примерно постоянной (около -55°C). Выше 20 км в стратосфере температура начинает возрастать почти до 0°C на уровне стратопазузы (границы между стратосферой и мезосферой) на высоте ~55 км. Стратосфера содержит примерно 20 % всей массы атмосферы (на остальные части выше приходится всего около 0,5 % ее массы).

Одной из причин увеличения температуры на высоте более 20 км является экзотермическая реакция разложения озона: $\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$. Озон в стратосфере появляется в результате реакций $\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{O}$; $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$, где М — третья молекула (катализатор). Концентрация озона повышается с увеличением высоты и достигает максимума на высоте ~30 км. Здесь происходит наиболее активное образование O_3 . Общая масса озона составила бы при нормальном давлении слой толщиной 1,7–4,0 мм, но этого количества O_3 достаточно для поглощения всего ультрафиолетового излучения от 200 до 300 нм, губительного для всего живого. Поглощение также приводит к разогреву стратосферы.

Слой атмосферы на высоте 55–80 км, где вновь происходит снижение температуры с увеличением высоты, называется *мезосферой*. На границе мезосферы и термосферы (в мезопаузе) находится температурный минимум, где температура снижается до -90°C , а давление составляет всего 7 Па.

Выше мезопаузы — *термосфера*, где температура начинает возрастать до высоты ~400 км и достигает днем в период солнечной активности 1800 К (в обычном состоянии — менее 1000 К). Причиной повышения температуры является поглощение ультрафиолетового излучения Солнца на высоте 150–300 км, обусловленное ионизацией атомарного кислорода: $\text{O} + h\nu \rightarrow \text{O}^+ + e^-$.

На высоте более 400 км температура постоянная. Отсюда и название этого слоя — термосфера. В общем термосфера представляет собой слабоионизированную плазму за счет ионизации O , O_2 , N_2 под действием ультрафиолетового излучения. Термосферу называют также ионосферой.

Выше термосферы на высоте более 1000 км находится *экзосфера*, откуда атмосферные газы рассеиваются в пространство (происходит постепенный переход от атмосферы к межпланетному пространству).

До 100–120 км газовый (химический) состав атмосферы однороден за счет перемешивания из-за конвекции. Выше происходит дифференциация состава атмосферы (зона диффузного разделения). Там до 400 км азот находится еще в молекулярном виде, а кислород — уже в атомарном состоянии. В результате на высоте

400–500 км азота уже почти нет, атмосфера состоит главным образом из атомарного кислорода и более легких газов (концентрация газов атмосферы здесь в 10^{11} – 10^{12} раз меньше, чем на уровне моря). Выше 700 км преобладают только водород и гелий.

Экзосфера состоит из водорода и простирается на несколько земных радиусов (ее еще называют *водородной геокороной*). Концентрация атомов и молекул водорода в геокороне 10^2 – 10^3 см $^{-3}$.

Концентрация электрических зарядов (электронная концентрация равна ионной) в термосфере (ионосфере) на высоте 300 км составляет днем около 10^6 см $^{-3}$. Такая плазма отражает радиоволны $\lambda \geq 20$ м, а более короткие пропускает и поглощает. Критическая частота (граница пропускания) зависит от электронной концентрации и равна $\nu = 9 \cdot 10^3 \sqrt{n_e}$, которая в свою очередь зависит от интенсивности излучения Солнца (днем и ночью она разная). При рекомбинации ионов и электронов (образование молекул из атомов) часто получают атомы (молекулы) в возбужденном состоянии, которые дают слабое свечение ночью. Свечение обусловлено также некоторыми химическими реакциями в верхней атмосфере. Свечение ночного неба ограничивает минимальную яркость космических объектов, которые можно наблюдать с Земли. Например, звезды слабее 22^m будут «забываться» фоном свечения ночного неба (22^m — звездная величина квадратной угловой секунды ночного неба).

Важную роль в оптике атмосферы играют аэрозоли, присутствующие в атмосфере, которые обуславливают рассеяние излучения. Однако их концентрация значительно снижается с увеличением высоты.

Земля обладает довольно сильным (даже в масштабах Солнечной системы) *магнитным полем*. Магнитные полюсы Земли не совпадают с географическими. Угол между направлением стрелки компаса и истинным направлением на север называется магнитным склонением, а угол между стрелкой (силовой линией) и горизонтальной плоскостью — магнитным наклонением.

Положение магнитных полюсов изменяется со временем. Установлено, что магнитный полюс северного полушария дрейфует со скоростью 5–6 км в год. Магнитное поле Земли близко к полю магнитного диполя. Диполь, который в наибольшей степени описывает поле Земли, называется *эквивалентным магнитным диполем*, а его ось — *геомагнитной*. Она не совпадает с географической осью: угол между ней и географической осью составляет около 11,5°, а проходит она на расстоянии ~450 км от центра Земли. Геомагнитные полюсы, где ось эквивалентного диполя пересекает земную поверхность, также не совпадают с географическими, причем в северном полушарии находится южный магнитный полюс (вектор магнитной индукции направлен вниз). Геомагнитные полюсы не совпадают с реальными магнитными полюсами Земли, так как поле эквивалентного диполя не совпадает с полем Земли. Встречаются, например, мировые магнитные аномалии (Бразильская, Сибирская, Канадская и др.) и местные, связанные с намагниченностью горных пород земной коры (Курская и др.).

Положение геомагнитных полюсов изменяется довольно медленно. В настоящее время их положение таково: южный геомагнитный полюс (северное полушарие) — $\lambda = 289^\circ,9$; $\varphi = 78^\circ,6$; северный геомагнитный полюс (южное полушарие) — $\lambda = 110^\circ$; $\varphi = -78^\circ,6$. Магнитное поле Земли подвержено вековым вариациям с периодами 10–20, 60–100, 600–1200 и 8000 лет. В частности, геомагнитный полюс прецессирует относительно географического с периодом ~ 1200 лет. Напряженность геомагнитного поля снижается с 55,7 А/м на магнитных полюсах до 33,4 А/м на магнитном экваторе. Соответственно можно ввести геомагнитную систему координат (геомагнитную широту и долготу).

Возраст магнитного поля Земли составляет по меньшей мере 2,5 млрд лет (возраст Земли — примерно 4,6 млрд лет). По данным *палеомагнитологии*, которая изучает величину и направление древнего поля Земли по сохраняющейся намагниченности осадочных горных пород, которые содержат соединения железа, среднее за 10^4 – 10^5 лет положение геомагнитных полюсов совпадает с положением географических. Характеристики геомагнитного поля сохраняются неизменными в течение 10^5 – 10^7 лет, затем магнитное поле неожиданно уменьшается в 3–10 раз. В этот период времени (10^3 – 10^4 лет) может измениться знак магнитного поля (произойти инверсия), т.е. северный и южный магнитный полюсы поменяются местами. Иногда в этот период происходит несколько инверсий (до двух-трех). Затем магнитное поле вновь достигает нормального уровня и сохраняется в течение 10^5 – 10^7 лет.

Теория гидромагнитного динамо объясняет происхождение магнитного поля. Согласно ей генерация магнитного поля Земли происходит вследствие конвективного движения электропроводящего вещества во внешнем, жидком ядре планеты.

Магнитное поле Земли вместе с солнечным ветром формирует *магнитосферу*. Внешней ее границей является *магнитопауза*, отделяющая геомагнитное поле от обтекающего Землю солнечного ветра (электронов, протонов, ядер тяжелых элементов). Таким образом, магнитосфера — это система электрических и магнитных полей, а также потоков заряженных частиц (рис. 3.4).

Магнитосфера не симметрична относительно дневной и ночной сторон планеты: магнитное поле с дневной стороны «сжато» солнечным ветром до расстояния примерно $10R_\oplus$, но имеет вытянутый на миллионы километров «хвост» с ночной стороны (его диаметр примерно $40R_\oplus$, а протяженность — около $1000R_\oplus$). Линии магнитного поля в магнитосфере подразделяются на замкнутые (на расстоянии менее $3R_\oplus$), близкие к линиям магнитного диполя, и открытые, которые уходят в «хвост» магнитосферы. Замкнутые линии магнитного поля Земли являются геомагнитной ловушкой для заряженных частиц, образующих радиационные пояса Земли. Известно, что заряженные частицы движутся в магнитном поле по спирали. Если частицы высокоэнергетические, то радиус этой спирали $\gg R_\oplus$, и они движутся, проходя сквозь магнитосферу, практически не отклоняясь (чтобы частица проникла сквозь магнитное поле Земли в экваториальной области, ей необходима энергия > 1 ГэВ). Такие частицы вторгаются в атмосферу и, взаимодействуя с ее атомами, порождают вторичные космические лучи, которые регистрируются

на Земле (99 % этих частиц имеют галактическое происхождение и только 1 % — солнечное). Если частицы имеют меньшую энергию, то радиус их спирали сравним с $R_{\oplus}$. Они не долетают до поверхности Земли, захватываются ее магнитным полем и образуют так называемые *радиационные пояса*. Электрические токи, протекающие в ионосфере и магнитосфере, создают переменный компонент магнитного поля Земли, который составляет около 1 % всего поля.

На рис. 3.4 хорошо видны так называемые *каспы* — воронки, которые расширяются от поверхности Земли вплоть до магнитопаузы. Они образованы силовыми линиями магнитного поля. Каспы разделяют дневную часть магнитосферы и геомагнитный «хвост». Из множества радиационных поясов, как правило, выделяют три, которые имеют наибольшую концентрацию частиц (рис. 3.4). *Внутренний пояс* состоит из протонов с энергией около 100 МэВ и электронов с энергией 20–500 кэВ (он начинается на высоте 2400 км, заканчивается на высоте 5600 км и расположен между широтами $\pm 30^\circ$). Далее идет *внешний пояс*, расположенный на высоте 12 000–20 000 км. Затем выделяется *кольцевой ток* (на высоте 50 000–60 000 км), сила которого достигает 10^7 А. Состоит он из электронов с энергией около 200 эВ. Следует отметить, что понятие «пояс» условное и зависит от того, какие частицы и с какими энергиями взяты в расчет.

Во время *вспышек на Солнце* усиливается компонент рентгеновских лучей, которые повышают ионизацию в ионосфере. В результате она начинает поглощать и пропускать все более короткие радиоволны ($\lambda < 100$ м), отражать волны средней длины и хорошо отражать более длинные. Это приводит к исчезновению радиослышимости на коротких волнах и к усилению ее на длинных.

Корпускулярное излучение Солнца (солнечный ветер) в это время также усиливается и вызывает *магнитные бури* и *полярные сияния*. Корпускулярный поток (скорость его порядка 1000 км/с) деформирует магнитные силовые линии, вызывая возмущение магнитного поля Земли, т.е. магнитные бури, которые наблюдаются примерно через сутки после вспышки на Солнце.

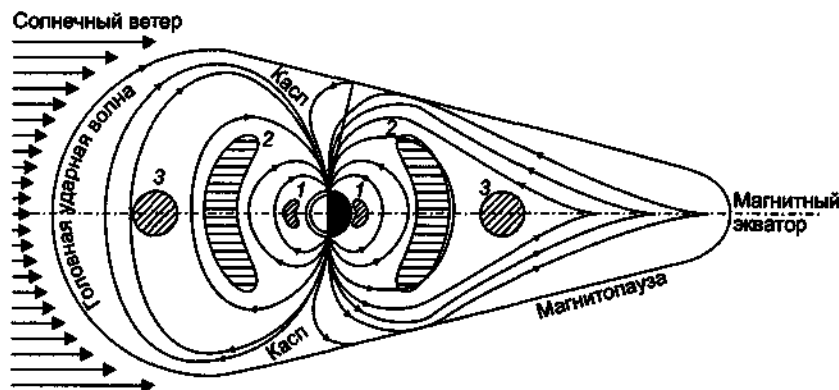


Рис. 3.4. Схема магнитосферы Земли (радиационные пояса: 1 — внутренний пояс; 2 — внешний пояс; 3 — кольцевой ток)

В полярных районах, где условия захвата космических частиц в радиационные пояса хуже, частицы, двигаясь по спирали вокруг силовых линий, направленных здесь перпендикулярно поверхности Земли, могут даже при малых энергиях проникнуть в атмосферу через каспы и вызвать локальную ионизацию и, следовательно, свечение (полярное сияние). В полярном сиянии выделяются линии кислорода: $\lambda = 557,7$ нм (зеленая) и $\lambda = 630$ нм (красная). Высота полярных сияний — примерно 400–1000 км.

3.1.2. Другие планеты Солнечной системы

По своим физическим характеристикам планеты Солнечной системы подразделяются на две группы: *планеты земного типа* (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и *планеты-гиганты* (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Плутон «стоит» особняком (по своему строению он ближе всего к крупным спутникам планет-гигантов). В приложении приведены некоторые физические характеристики планет и их спутников. Внутреннее строение планет схематически представлено на рис. 3.5, 3.6.

Особенностью строения планет земной группы является четкая граница между газовой (атмосферой) и твердой (литосферой) составляющими. У этих планет также наблюдается дифференциация вещества с глубиной: более тяжелые химические элементы располагаются ближе к центру планет (ядро Земли, по-видимому, состоит в основном из железа). Планеты земной группы имеют химическое строение литосфер, сходное с земным. В то же время у планет-гигантов такого четкого разделения на атмосферу и литосферу нет, т.е. нет так называемой поверхности планеты, по которой можно, условно говоря, «походить».

Атмосферы планет указанных групп также принципиально различаются по химическому составу. У планет земной группы атмосферы имеют так называемое вторичное происхождение (тектоническое, вулканическое, биологическое (у Земли) и т.п.). Они состоят в основном из «тяжелых» газов: у Земли это в основном азот N_2 (78 %), кислород O_2 (21 %) и аргон Ar (0,9 %); у Венеры — углекислый газ CO_2 (96,5 %) и азот N_2 (3,5 %); у Марса — углекислый газ CO_2 (95 %), азот N_2 (2,7 %), аргон Ar (1,6 %) и кислород O_2 (0,13 %). Совсем иной состав атмосфер у Юпитера и других планет-гигантов, где основными составляющими являются водород H_2 (84–90 %) и гелий He (10–16 %), т.е. элементы, наиболее распространенные в космосе.

Вертикальная структура атмосферы планет определяется температурой, составом и силой тяжести. Давление снижается в e раз при изменении высоты на величину H :

$$H = \frac{RT}{\mu g}. \quad (3.1)$$

Здесь T — температура; R — газовая постоянная; μ — молекулярная масса; g — ускорение силы тяжести.

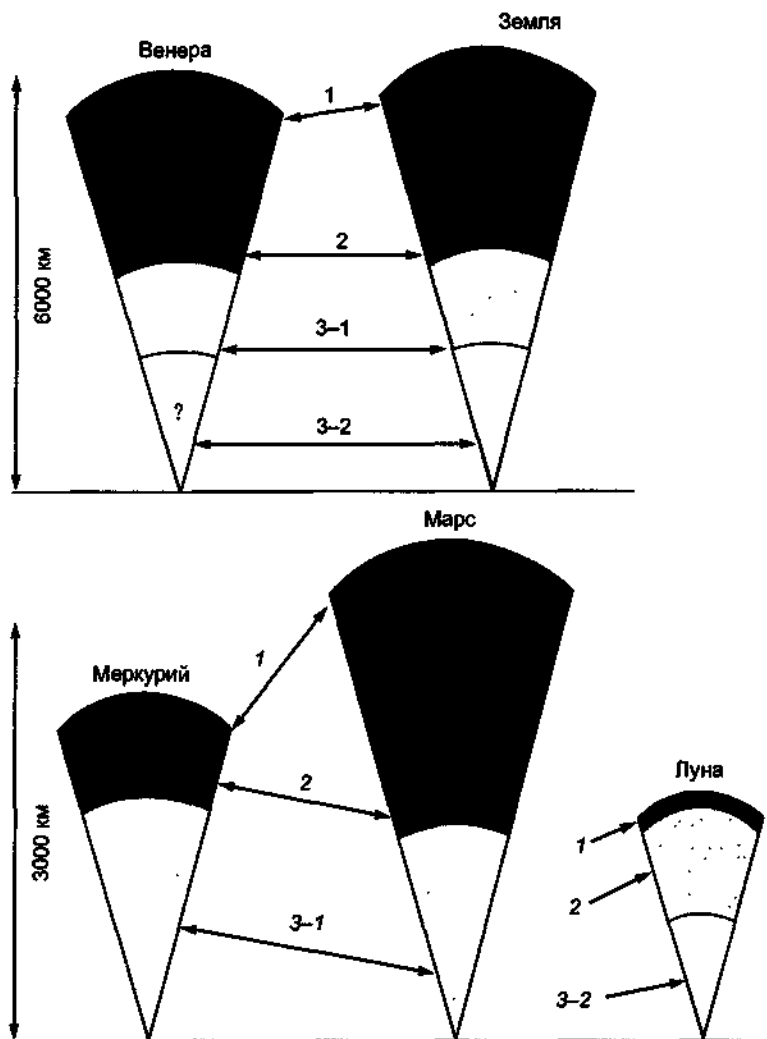


Рис. 3.5. Внутреннее строение планет земной группы и Луны:

1 — кора; 2 — мантия; 3-1 — жидкое (внешнее) ядро; 3-2 — твердое (внутреннее) ядро

Эта формула, которая называется барометрической, выводится из условия гидростатического равновесия атмосферы. Величина H называется *шкалой высоты* или *высотой однородной атмосферы*. Если параметры, от которых зависит H , изменяются с изменением высоты, то формулу (3.1) нужно использовать для бесконечно узких слоев атмосферы.

Солнечное излучение, направленное на планету, частично отражается в космическое пространство, а частично поглощается. Поглощенная энергия нагревает поверхность и атмосферу и переизлучается в длинноволновой области спектра.

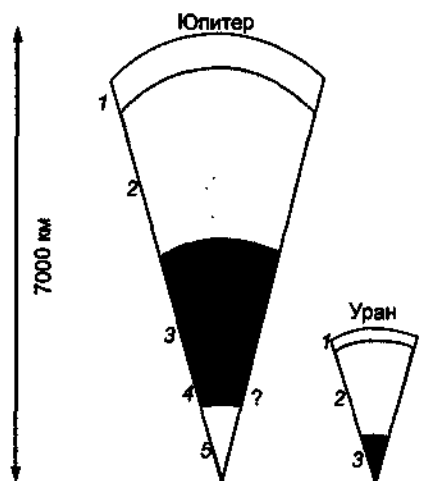


Рис. 3.6. Внутреннее строение планет-гигантов (Юпитер: 1 — газ (H_2 и He); 2 — H_2 в газожидком (сверхкритическом) состоянии и He ; 3 — металлизированный водород; 4 — гидриды (H_2O , NH_3 , CH_4) в газожидком состоянии; 5 — твердое ядро; Уран: 1 — газ (H_2 и He); 2 — гидриды в газожидком состоянии; 3 — твердое ядро; Сатурн похож по строению на Юпитер, Нептун — на Уран)

Спектр излучения планеты содержит два максимума: один из них (более коротковолновой) соответствует отраженному солнечному излучению, второй — тепловому излучению самой планеты. Положение второго максимума определяется эффективной температурой планеты T_{eff} в приблизительном соответствии с законом Вина:

$$\lambda_{max} = \frac{2886}{T_{eff}} \text{ мкм.} \quad (3.2)$$

Уровень, на котором формируется отраженное или тепловое излучение на некоторой длине волны, соответствует оптической глубине $\tau = 1$ на этой длине волны (как в атмосферах звезд и Солнца). Он может располагаться в атмосфере на той или иной высоте, на некоторой глубине под поверхностью или с ней совпадать.

Доля солнечной энергии, отраженная от планеты, определяется величиной сферического альбедо:

$$A_{sph} = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (3.3)$$

где Φ_0 — падающий поток солнечного излучения; Φ — поток, рассеянный планетой во все стороны.

Потоки могут быть определены в узком участке длин волн или проинтегрированы по всем длинам волн. В последнем случае A_{sph} — интегральное сферическое альбедо. Часть солнечного потока, равная $(1 - A_{sph})\Phi_0$, поглощается планетой.

нагревает ее и переизлучается в инфракрасном диапазоне. Это уходящее тепловое излучение характеризуется эффективной температурой T_{eff} . Величины T_{eff} и A_{sph} взаимосвязаны уравнением теплового баланса:

$$4\sigma T_{\text{eff}}^4 = (1 - A_{\text{sph}})E_0 + 4\epsilon, \quad (3.4)$$

где E_0 — освещенность от Солнца; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана — Больцмана; ϵ — поток внутреннего тепла, приходящийся на единицу поверхности планеты.

У Земли, как и у других планет земной группы, поток внутреннего тепла пренебрежимо мал по сравнению с притоком энергии от Солнца, в уравнении теплового баланса его можно не учитывать. У планет-гигантов поток внутреннего тепла на единицу площади примерно равен потоку, получаемому от Солнца. Он играет существенную роль в уравнении теплового баланса при определении эффективных температур этих планет. В этом отношении (большой поток внутреннего тепла) планеты-гиганты (особенно Юпитер) ближе к звездам, чем к планетам земной группы. Однако источником их внутренней энергии являются не ядерные реакции. По-видимому, излучается запас энергии, накопленной при гравитационном сжатии планеты.

На поверхности планеты (или спутника), лишенной атмосферы, температура T в данной точке определяется согласно уравнению локального теплового баланса (для дневного времени):

$$\alpha\sigma T^4 = (1 - A)E \cos z + F, \quad (3.5)$$

где A — локальное альбедо; z — зенитное расстояние Солнца; α — коэффициент излучения; F — поток тепла, обусловленный теплопроводностью.

Для ночного времени в правой части уравнения (3.5) остается только величина F : поверхность излучает тепло, «запасенное» в грунте в течение дня. Это уравнение отличается от формулы (3.4) тем, что оно описывает тепловой баланс в определенной точке, а не в среднем по планете. Оно приемлемо для Меркурия, Луны, большинства спутников планет-гигантов и с большой долей приближения для Марса. Теплопроводность грунта планет достаточно низкая, поэтому на Меркурии, Луне и Марсе бывают значительные суточные изменения температуры. Температура в полдень и в полночь — примерно 700 и 100 К на Меркурии, 400 и 120 К на Луне, 280 и 170 К на Марсе. На планетах с плотной атмосферой (таких, как Венера и Земля) значительный вклад в температурный баланс вносит так называемый *парниковый эффект*. Он обусловлен сильным поглощением инфракрасного излучения поверхности планеты некоторыми сложными молекулами (CO_2 , H_2O , SO_2 и др.) атмосферных газов, что приводит к разогреву приповерхностного слоя атмосферы. Для Венеры такое увеличение средней температуры поверхности по сравнению с эффективной температурой составляет ~500 К, для Земли — ~40 К, для Марса и Титана — ~5 К.

3.1.3. Астрофизика Солнца и других звезд

Звезды — наиболее распространенные из наблюдаемых объектов Вселенной. Это гигантские светящиеся шары, в которых равновесие поддерживается за счет баланса сил гравитационного сжатия и внутреннего давления вещества и излучения. В этих газовых шарах сосредоточена большая часть массы видимого космического вещества.

Спектральные характеристики большинства звезд невозможно изучить так точно и подробно, как это сделано для Солнца (рис. 3.7), вследствие чрезвычайно слабой интенсивности излучения, доходящего до нас. Однако более или менее точное представление о спектрах звезд (и о происходящих там процессах) можно получить, изучая их с помощью наборов широкополосных светофильтров.

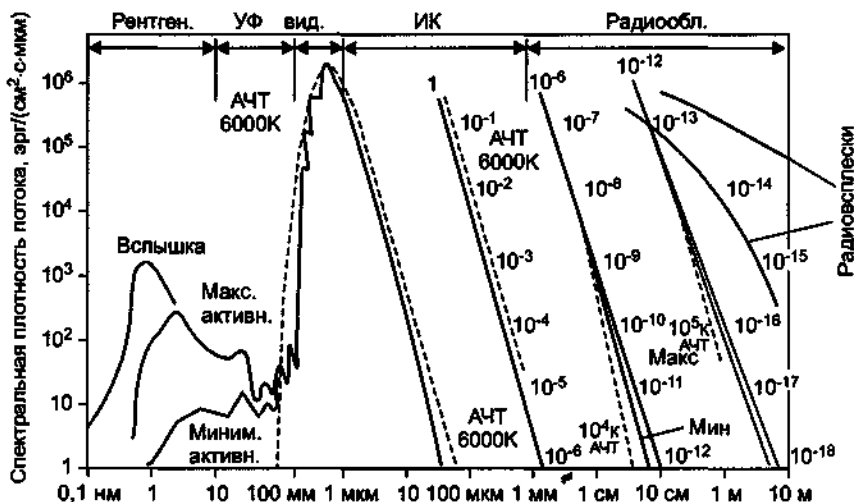


Рис. 3.7. Спектр электромагнитного излучения Солнца (шкала значений спектральной плотности энергии справа проставлена вдоль линий спектра; пунктиром обозначен спектр абсолютно черного тела (АЧТ), соответствующие температуры АЧТ отмечены вдоль пунктирных линий)

По своим спектральным свойствам звезды подразделяются на несколько *спектральных классов*, которые обозначаются, согласно гарвардской классификации, латинскими буквами и располагаются по мере уменьшения эффективной температуры.

- *Класс О.* Голубоватые звезды. Наиболее интенсивны спектральные линии He^+ и некоторых многократно ионизованных элементов (C, Si, N, O); наблюдаются слабые линии нейтральных He и H.

- *Класс В.* Голубовато-белые. Линии нейтрального He достигают наибольшей интенсивности; хорошо видны линии H и некоторых ионизованных элементов; типичный представитель — α Девы (Спика).

- *Класс А.* Белые звезды. Линии H достигают наибольшей интенсивности; хорошо видны линии ионизованного Ca; наблюдаются слабые линии других металлов; типичные представители — α Лиры (Вега) и α Б. Пса (Сириус).

- *Класс F.* Цвет бело-желтый. Линии H становятся слабее; усиливаются линии ионизованных металлов (Ca, Fe, Ti); типичная звезда — α М. Пса (Процион).

- *Класс G.* Желтые звезды. Водородные линии и многочисленные линии металлов одинаково интенсивны; очень интенсивны линии Ca^+ ; типичный пример — Солнце.

- *Класс K.* Красноватые (оранжевые). Линии H не заметны среди очень интенсивных линий металлов; типичные звезды — α Волосаса (Арктур) и α Тельца (Альдебаран).

- *Класс M.* Красные звезды. Линии металлов заметно ослабевают; в спектре наблюдаются полосы поглощения молекул TiO и других молекулярных соединений; типичный представитель — α Ориона (Бетельгейзе).

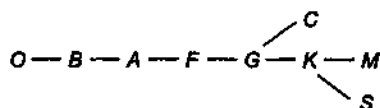
Кроме этих основных классов существуют дополнительные, которые являются ответвлениями классов *G* и *K*. К ним относятся звезды, имеющие аномальный химический состав, который отличается от состава большинства других звезд. Первое ответвление — у класса *G* («углеродные» звезды).

- *Класс C.* Отличается от классов *K* и *M* наличием линий поглощения атомов углерода C и полос поглощения углеродных молекул.

Второе ответвление происходит от класса *K* («циркониевые» звезды).

- *Класс S.* Отличается от класса *M* наличием полос окиси циркония ZrO вместо полос окиси титана TiO.

В итоге по мере снижения эффективной температуры все перечисленные спектральные классы схематично можно расположить следующим образом:



Внутри каждого спектрального класса установлена последовательность подклассов, плавно переходящих из одного в другой. Их обозначают цифрами от 0 до 9, которые ставят после обозначения спектрального класса, например, B8, A0, F5. Только спектральный класс O подразделяется на подклассы от O5 до O9 или Oa, Ob, ..., Of. После таких обозначений ставят дополнительные значки, если спектр звезды обладает какими-то особенностями. Если в нем присутствуют эмиссионные линии, то их обозначают, добавляя букву «e» (от англ. «emissive»), например B5e. Звезды с большим радиусом и протяженной атмосферой часто отличаются глубокими узкими линиями. Это отмечают буквой «c» (от англ. «characteristic») перед названием класса: cF0. Другие особенности в спектре звезды, не типичные для данного спектрального класса, отмечают буквой «p» (от англ. «peculiar») после названия класса: A5p.

Интенсивность достигающего Земли излучения звезд, других самосвещающихся или освещаемых (планеты, астероиды) астрономических объектов принято выражать в звездных величинах. Звездной величиной m называется взятый со знаком минус логарифм по основанию 2,512 от освещенности E , которую создает данный объект на площадке, перпендикулярной лучам. Взаимосвязь между звездными величинами и освещенностью задается формулой Погсона:

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = -0,4(m_1 - m_2) \text{ или } m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \lg \frac{E_1}{E_2}, \quad (3.6)$$

где m_1 и m_2 ; E_1 и E_2 — звездные величины двух светящихся объектов и освещенности, создаваемые ими на поверхности Земли.

В табл. 3.1, 3.2 представлены звездные величины некоторых ярких объектов на земном небе. Заметим, что для удаленных объектов, которыми являются все объекты в астрономии, справедлива формула, позволяющая вычислить освещенность, создаваемую объектом:

$$E = B \cdot \omega, \quad (3.7)$$

где B — яркость объекта; ω — телесный угол, под которым объект виден на небесной сфере.

Звездная величина M называется *абсолютной*, если объект находится на расстоянии 10 пк. Ее значение взаимосвязано с видимой звездной величиной m :

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi \text{ или } M = m + 5 - 5 \cdot \lg r, \quad (3.8)$$

где π — параллакс объекта, выраженный в секундах дуги; r — расстояние до него, пк.

Эти величины связаны между собой соотношением

$$r = \frac{1}{\pi''} \text{ пк.} \quad (3.9)$$

Таблица 3.1

Видимые звездные величины тел Солнечной системы

Солнце	-26,8	Юпитер	-2,4
Луна	-12,7	Сатурн	+0,8
Меркурий	-0,2	Уран	+5,8
Венера	-4,1	Нептун	+7,6
Марс	-1,9	Плутон	+14,7

Таблица 3.2

Видимые звездные величины самых ярких звезд

Название	m	Положение	Название	m	Положение
Сириус	-1,46	α Б. Пса	Акрукс*	+0,79	α Южного Креста
Канопус*	-0,75	α Киля	Альдэбаран	+0,86	α Тельца
Арктур	-0,05	α Волопаса	Антарес	+0,91	α Скорпиона
Вега	+0,03	α Лиры	Спика	+0,97	α Девы
Толиман (Проксима)*	+0,06	α Центавра	Поллукс	+1,14	β Близнецов
Капелла	+0,08	α Возничего	Фомальгаут	+1,16	α Южной Рыбы
Ригель	+0,13	β Ориона	Денеб	+1,25	α Лебедя
Процион	+0,37	α М. Пса	Регул	+1,35	α Льва
Бетельгейзе	+0,42	α Ориона	Адара	+1,50	ϵ Б. Пса
Ахернар*	+0,47	α Эридана	Кастор	+1,58	α Близнецов
Хадар	+0,59	β Центавра	Беллатрикс	+1,64	γ Ориона
Альтаир	+0,76	α Орла			

* Звезда видна в южном полушарии Земли.

Например, видимая звездная величина Солнца вне атмосферы $m_{\odot} = -26^m,8$, абсолютная визуальная — $M_{\odot} = +4^m,8$. Формулу (3.8) можно преобразовать таким образом:

$$\lg r = 1 + 0,2(m - M). \quad (3.10)$$

Разность $(m - M)$ называется *модулем расстояния* и служит для определения расстояния спектральными методами.

Светимостью звезды L называется поток энергии, излучаемой звездой во всех направлениях. Светимость L и абсолютная звездная величина M звезд связаны между собой соотношением, подобным (3.6):

$$\lg \frac{L_1}{L_2} = -0,4(M_1 - M_2) \quad \text{или} \quad M_1 - M_2 = -2,5 \cdot \lg \frac{L_1}{L_2}. \quad (3.11)$$

Если измерять светимость звезды в единицах светимости Солнца ($L_{\odot} = 1$), то формула (3.11) примет вид

$$\lg L_* = 0,4(M_{\odot} - M_*). \quad (3.12)$$

Все светящиеся небесные тела характеризуются своими спектральными свойствами. По виду спектра можно определить ряд свойств объектов, в частности температуру. В зависимости от спектрального состава излучения и типа фотоприемника различные звездные величины, измеренные в разных спектральных интервалах, даже для одного и того же объекта могут не совпадать. Взаимосвязь между ними можно выразить с помощью специальных соотношений и таблиц. В астрономии существует несколько вариантов *фотометрических систем* — наборов участков спектра, описываемых кривыми спектральной чувствительности аппаратуры. В этих спектральных интервалах проводятся измерения звездных величин (как видимых, так и абсолютных). Наиболее известна 12-цветная фотометрическая система Джонсона (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Фотометрическая система Джонсона

Название полосы	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>Q</i>
Центральная длина волны, мкм	0,36	0,44	0,55	0,70	0,88	1,25	1,62	2,20	3,50	5,00	10,4	20,0
Полуширина полосы, мкм	0,04	0,10	0,08	0,21	0,22	0,30	0,20	0,60	0,90	1,10	6,0	5,5

На основании измерений звездных величин в разных спектральных интервалах можно рассчитать *показатели цвета* (*color indexes*) CI — разности между звездными величинами одного объекта, измеренными в двух разных областях спектра:

$$CI = m_1 - m_2. \quad (3.13)$$

Если учесть при этом поглощение излучения межзвездной средой (звезда в результате такого поглощения становится более «красной», чем без него), то мы получим так называемый показатель цвета «непокрасившего» объекта CI_0 . Разность между измеренным и «непокрасившим» показателями цвета называется *избытком цвета* (*color excess*):

$$CE = (m_1 - m_2) - (m_1 - m_2)_0. \quad (3.14)$$

С помощью показателей цвета и шкалы температур звезд можно рассчитать их температуры.

При определении звездной величины с помощью наблюдений регистрируется только та часть излучения, которая прошла сквозь земную атмосферу, данную оптическую систему и зарегистрирована приемником излучения, т.е. до наблюдателя доходит только сравнительно небольшая часть излучения объекта. При этом ослабление излучения происходит по-разному в различных участках спектра. Чтобы определить излучение во всем спектре, необходимо к результатам измерений прибавить поправку, учитывающую излучение, которое не было воспринято приемником. Звездная величина, определенная с учетом излучения во всех участках спектра, которое не было ослаблено поглощением в атмосфере и приборе, называется *болометрической*. Разность между болометрической звездной величиной и звездной величиной в спектральной полосе V (табл. 3.3) называется *болометрической поправкой* BC (*bolometric correction*):

$$BC = m_{bol} - m_V = M_{bol} - M_V. \quad (3.15)$$

Для определения болометрических поправок используются результаты внеатмосферных измерений излучения звезд в УФ и ИК областях спектра. Болометрическую поправку условно принимают равной нулю для звезд, которые излучают наибольшую часть своей энергии в видимой области спектра. Она зависит от эффективной температуры звезды T_{eff} и всегда отрицательна (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Болометрические поправки для звезд главной последовательности

T_{eff}	BC	T_{eff}	BC
2800	-2,30	6580	-0,00
3480	-1,19	7400	-0,06
4130	-0,60	8500	-0,12
4900	-0,19	9900	-0,40
5520	-0,07	15 500	-1,5
5770	-0,07	28 000	-2,8
6030	-0,03	40 000	-4,0

С учетом поправки болометрическая абсолютная звездная величина Солнца $M_{bol}^{\odot} \approx 4^m,8 - 0^m,1 = 4^m,7$.

Болометрические поправки позволяют рассчитать болометрическую светимость звезд, для которых известны абсолютные звездные величины:

$$\lg L_{bol}^* = -0,4(M_V + BC - 4^m,7). \quad (3.16)$$

В начале XX в. датский астроном Герцшпрунг и американский астрофизик Рассел установили взаимосвязь между спектром (температурой) и светимостью (абсолютной звездной величиной) звезд, которая иллюстрируется диаграммой на рис. 3.8. На рис. 3.9 показаны тренды основных классов светимости. По одной оси диаграммы откладывается спектральный класс (температура), а по другой — абсолютная звездная величина (светимость). Такая диаграмма называется диаграммой Герцшпрунга — Рассела (диаграммой спектр — светимость), изучение ее позволяет выделить на ней ряд последовательностей. Наиболее «населенная» и четко обозначена *главная последовательность*. Эти последовательности изображают индивидуальные зависимости светимости от температуры для звезд некоторых выделенных групп. Они называются *классами светимости* и обозначаются римскими цифрами от I до VII (некоторые исследователи выделяют еще одну группу звезд с номером 0), которые ставятся после наименования спектрального класса (например, для Солнца — $G2V$). Таким образом, классификация звезд включает в себя два параметра — спектральный класс (температуру) и светимость и называется йеркской, или системой МК (по имени разработавших ее сотрудников Йеркской обсерватории У. Моргана и Ф. Кинана).

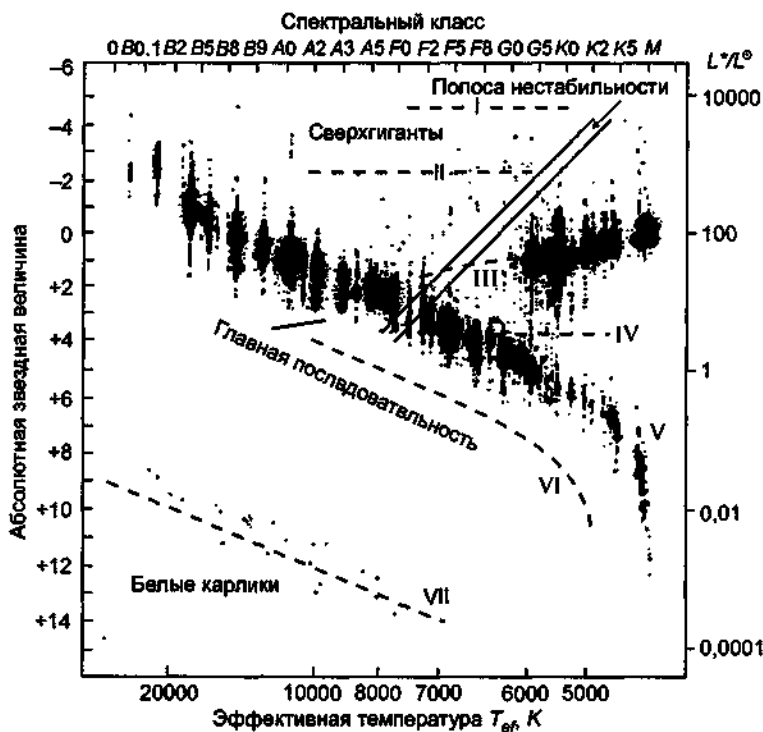


Рис. 3.8. Диаграмма спектр — светимость

Выделяют следующие классы светимости (рис. 3.9): 0 (или Ia-0, Ia+) — *сверхсверхгиганты* или *гипергиганты*; I — *сверхгиганты* (подразделяется на Ia, Iab, Ib); II — *яркие гиганты*; III — *гиганты* (подразделяется на II-III, IIIa, IIIab, IIIb, III-IV); IV — *субгиганты*; V — *звезды главной последовательности* (*карлики*); VI — *субкарлики* (последовательность ниже главной примерно на $1^m-1^m,5$, начиная от класса A0 до M); VII — *белые карлики*

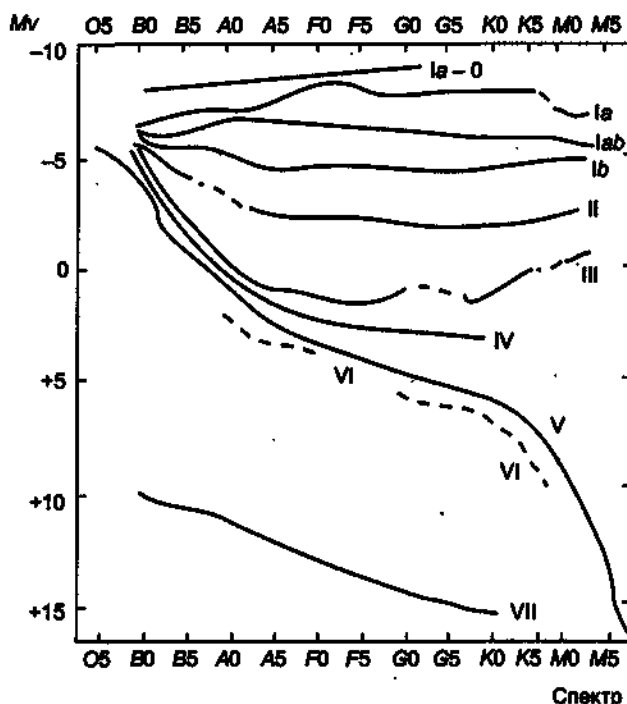


Рис. 3.9. Средние положения звезд различных классов светимости на диаграмме спектр — светимость

Принадлежность звезд к определенному классу светимости устанавливается на основании специальных дополнительных признаков спектральной классификации. Они могут служить основой для спектроскопического определения абсолютных звездных величин и расстояний по формуле (3.10), в которой следует учитывать межзвездное поглощение света. Если последнее для расстояния r составляет $A(r)$ звездных величин, то формула для определения параллакса π , который в этом случае называется *фотометрическим*, будет

$$\lg \pi = -1 - 0,2[m - M - A(r)]. \quad (3.17)$$

Диаграмма Герцшпрунга — Рассела отражает не только современное состояние звезд, но и их эволюцию. «Населенность» каждой последовательности про-

порциональна времени «жизни», которое проводит звезда в этой стадии. Например, на самой населенной главной последовательности звезда находится около 90 % своего времени. В этот период основным источником энергии звезды является термоядерное горение водорода в ее центре. Искерпав этот источник, звезда смещается в область гигантов, где проводит около 10 % своей «жизни». Ее энергия выделяется теперь в основном за счет горения водорода в слое, окружающем плотное изотермическое гелиевое ядро. Это стадия так называемого *красного гиганта*. После возгорания гелия в ядре звезда опять перемещается в направлении главной последовательности. Наконец, истерпав свои источники энергии, она попадает в область *белых карликов*. На этой стадии уже не происходит каких-либо термоядерных реакций, и звезда излучает запасенную тепловую энергию. Этот примерно описанный эволюционный трек индивидуален для каждой звезды и зависит от ее массы и химического состава, но все треки можно отобразить на диаграмме спектр — светимость.

Обычно под температурой звезды понимают ее эффективную температуру, для определения которой необходимо знать болометрическую светимость и радиус звезды. Достаточно точно обе эти величины, а следовательно, и эффективные температуры измерены лишь для немногих звезд. Для остальных звезд эффективные температуры определяют косвенными методами на основании изучения их спектров или показателей цвета с помощью *шкалы эффективных звездных температур*.

Шкалой эффективных звездных температур называется зависимость цветовых характеристик излучения звезд, например спектрального класса или показателя цвета, от эффективной температуры. Такая шкала определяется эмпирически по звездам с известными эффективными температурами, а также на основании теоретических расчетов моделей звезд. В табл. 3.5 приведена шкала эффективных температур звезд различных классов светимости.

Во многих случаях излучение звезд приближенно может быть описано в рамках теории излучения абсолютно черного тела. Ниже приведены некоторые следствия из этой теории.

Излучательная способность *абсолютно черного тела* ϵ_v (или ϵ_λ) вычисляется по *формуле Планка*:

$$\epsilon_{v,T} = \frac{2\pi h v^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{или} \quad \epsilon_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (3.18)$$

где T — абсолютная температура; h — постоянная Планка; ν — частота излучения; λ — длина волны; c — скорость света; k — постоянная Больцмана ($k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Сопоставляя излучательную способность абсолютно черного тела и реального объекта, можно определить *яркостную температуру*. Это температура такого

абсолютно черного тела, единица площади которого в некотором узком спектральном интервале излучает такой же поток энергии, как и единица площади данного тела в этом же спектральном интервале.

Таблица 3.5

Шкала эффективных температур звезд

Спектральный класс	Класс светимости					
	Главная последовательность, V		Гиганты, III		Сверхгиганты, I	
	показатель цвета $B-V$	$T_{\text{эф}}$ К	показатель цвета $B-V$	$T_{\text{эф}}$ К	показатель цвета $B-V$	$T_{\text{эф}}$ К
O5	-0,35	40 000	—	—	—	—
B0	-0,31	28 000	—	—	-0,21	—
B5	-0,17	15 500	—	—	—	—
A0	0,0	10 000	—	—	0,00	—
A5	+0,16	8500	—	—	—	—
F0	0,30	7400	—	—	+0,30	6400
F5	0,45	6600	—	—	—	—
G0	0,57	6600	+0,65	5700	0,76	5400
G5	0,70	5400	0,84	5000	1,06	4700
K0	0,84	4700	1,06	4300	1,42	4000
K5	1,11	4000	1,40	3600	1,71	3400
M0	1,39	3600	1,65	3400	1,94	2800
M5	1,61	3000	+1,85	2800	+2,15	—
M8	+2,00	2660	—	—	—	—

Закон смещения Вина определяет значение длины волны максимума излучательной способности:

$$\lambda_{\text{max}} T = b, \quad (3.19)$$

где λ_{max} — длина волны, соответствующая максимуму; T — абсолютная температура тела; $b = 29 \cdot 10^{-4}$ (м · К) — постоянная Вина.

С помощью этого закона можно определить *цветовую температуру*. Это температура такого абсолютно черного тела, у которого относительное распределение энергии в некотором участке спектра такое же, как и у данного тела.

Закон Стефана — Больцмана, который выражают формулой

$$\epsilon_r = \sigma T_{ef}^4, \quad (3.20)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана — Больцмана, задаст полное количество энергии, излучаемой в единицу времени с 1 м^2 , и позволяет определить *эффективную (радиационную) температуру* T_{ef} . Это температура такого абсолютно черного тела, единица площади которого во всем спектре излучает такой же поток энергии, как и единица площади данного тела.

В той или иной степени все три типа температур близки к истинной (*кинетической*) температуре.

С помощью законов абсолютно черного тела можно связать радиус R , эффективную температуру T_{ef} и светимость звезды L (поскольку $L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T_{ef}^4$):

$$R = R_{\odot} \cdot \left(\frac{T_{\odot}}{T_{ef}} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{L}{L_{\odot}}}. \quad (3.21)$$

Здесь $R_{\odot} = 696\,000 \text{ км}$; $T_{\odot} = 5779 \text{ К}$; $L_{\odot} = 3,826 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ — радиус, эффективная температура и светимость Солнца соответственно.

Для оценки истинных параметров звезды эта формула является весьма приближенной. Более точно эти параметры можно рассчитать по уравнению

$$\lg \frac{R}{R_{\odot}} = \frac{5900}{T_{ef}} - 0,20 \cdot M - 0,02, \quad (3.22)$$

где M — абсолютная звездная величина звезды.

Радиус звезды R также можно определить по формулам

$$2R = \frac{d'' \cdot r}{206\,265''}; \quad (3.23)$$

$$\lg d'' = \lg \pi'' + \lg \frac{R}{R_{\odot}} - 2,031, \quad (3.24)$$

где d'' — угловой видимый диаметр звезды в секундах дуги; π'' — ее годичный параллакс; r — расстояние до нее; $R_{\odot}$ — радиус Солнца.

Из приведенных выше соотношений видно, что существует зависимость между важнейшими характеристиками звезд (светимостью, массой и радиусом), хотя она намного сложнее и не столь очевидна, как это показывают формулы (3.20)–(3.22).

Например, для большинства звезд главной последовательности выполняются эмпирические соотношения

$$L_{bol} \approx R^{5.2}, \quad (3.25)$$

$$L_{bol} \approx m^{3.9}, \quad (3.26)$$

где L_{bol} — болометрическая светимость звезды, выраженная в светимостях Солнца; m и R — масса и радиус звезды соответственно в массах и радиусах Солнца.

Из соотношения масса — светимость для звезд следует, что диапазон их светимости значительно превышает пределы возможных значений масс:

$$0,1 \cdot m_{\odot} \leq m \leq 10^2 \cdot m_{\odot},$$

$$10^{-6} \cdot L_{\odot} \leq L \leq 10^6 \cdot L_{\odot}.$$

При $m < 0,02m_{\odot}$ вещество, по-видимому, не способно образовать звезду, а может сформировать только планету. В среднем массы звезд близки к массе Солнца, т.е. на фоне сильной вариации других параметров при многих оценках можно считать, что массы звезд примерно одинаковы и составляют около 10^{30} кг. Поскольку радиусы звезд могут быть в сотни и тысячи раз больше или меньше, чем Солнца, то их средние плотности могут изменяться в огромных пределах: $10^{-9} \text{ г/см}^3 \leq \rho \leq 10^{14} \text{ г/см}^3$ (первый предел — для сверхгигантов, второй — для нейтронных звезд), т.е. в 10^{22} – 10^{23} раз.

В табл. 3.6 приведены основные характеристики типичных представителей некоторых групп звезд: звезд главной последовательности (B0, G2 — Солнце, M0); красного гиганта, масса которого несколько превышает массу Солнца; представителя белых карликов (последняя строка).

Таблица 3.6

Физические параметры типичных звезд

Основные характеристики				Условия в центре звезды		Основной источник энергии	Условия в фотосфере		
Класс звезды	Масса ($m_{\odot}=1$)	Светимость ($L_{\odot}=1$)	Радиус ($R_{\odot}=1$)	T_0 , К	ρ_0 , г/см ³		H , км	T , К	ρ , г/см ³
B0 V	10	$5 \cdot 10^3$	4	$3 \cdot 10^7$	8	CNO	1000	20 000	10^{-9}
G2 V	1	1	1	$1,4 \cdot 10^7$	100	H + H	180	6000	10^{-7}
M0 V	0,5	0,4	0,4	10^7	80	H + H	160	3300	$3 \cdot 10^{-7}$
K0 III	1,3	$2 \cdot 10^2$	20	$4 \cdot 10^7$	$3,5 \cdot 10^5$	Слоевой	20 000	4100	10^{-8}
A0 VII	0,9	10^{-3}	10^{-2}	10^7	$1,5 \cdot 10^7$	Тепловой	0,01	10 000	10^{-6}

«Жизнь» любой звезды зависит прежде всего от ее массы и химического состава. Вопросы эволюции звезд достаточно сложны, далеко не всегда на них есть достоверные ответы. Подробно осветить все аспекты звездной эволюции в этом издании не представляется возможным, однако попытаемся рассмотреть основные ее моменты.

Согласно современным представлениям, звезды рождаются из газопылевой диффузной среды в результате *гравитационного сжатия* отдельных газовых облаков под действием сил собственного тяготения. Гравитационное сжатие начинается в тех областях межзвездного газа, где хотя бы небольшая часть вещества находится в виде твердых частиц (межзвездная пыль), как результат *гравитационной неустойчивости*. Согласно теории английского астронома Д. Джинса, любая однородная крупномасштабная среда является неустойчивой: случайное сжатие в какой-либо ее области будет продолжаться за счет гравитации. Гравитационное сжатие, начавшись в крупных масштабах, затем фрагментируется: возникают множественные гравитационные неустойчивости в более мелких масштабах. Такое дробление областей гравитационного сжатия может произойти еще несколько раз (*каскадная фрагментация*). Отсюда ясно, почему звезды возникают преимущественно группами, в виде звездных скоплений. Массы звезд также не могут иметь любые значения и находятся в довольно узких пределах, в общем-то они близки к массе Солнца.

Гравитационное сжатие газа прекращается, когда плотность вещества настолько повышается, что оно становится непрозрачным к собственному излучению. Излучение, многократно перепоглощаясь в веществе, разогревает его. В результате в центральной области сжимающегося газа образуется *протозвезда* — устойчивое дозвездное тело. В центре протозвезды находится достаточно плотное ядро, окруженное газовой непрозрачной оболочкой, где силы гравитационного сжатия уравновешиваются газовым давлением (сжатие ядра прекращается). Основным процессом теперь становится *аккреция* (падение) вещества из газовой оболочки на сформировавшееся ядро. Масса ядра возрастает, следовательно, быстро повышается и его светимость. С дальнейшим увеличением массы и светимости быстро растущее давление излучения останавливает аккрецию, а затем отталкивает вещество, не успевшее упасть на ядро. Иногда этот процесс может породить ударную волну, что приводит к появлению новых центров звездообразования.

Оставшееся ядро протозвезды, пройдя этап медленного кельвиновского сжатия, переходит в состояние гидростатического равновесия вследствие того, что при достаточно большой массе в недрах ядра «включается» новый, собственный источник энергии — *термоядерные реакции* образования гелия из водорода. Рождается звезда, которая занимает свое место на главной последовательности диаграммы спектр — светимость.

Время, которое расходуется на сжатие звезды, а также время, которое звезда «проводит» на главной последовательности, зависят от ее массы: чем больше масса, тем быстрее звезда сжимается и быстрее «сгорает» (табл. 3.7). Спектральный

класс, с которого начинается эволюция звезды на главной последовательности, также во многом определяется ее массой.

Представление о физических условиях, которые создаются в недрах звезд, можно получить, проведя некоторую аналогию с тем, что известно о Солнце. Применяя к веществу звезды уравнения, описывающие состояние идеального газа, получим, что температура T_0 в центре звезды прямо пропорциональна массе звезды m и обратно пропорциональна ее радиусу R :

$$T_0 = K \cdot m/R. \quad (3.27)$$

Здесь K — некоторый коэффициент пропорциональности, который можно определить на основе предположения, что при $R = R_\odot$ и $m = m_\odot$ T_0 должна быть близка к температуре в центре Солнца — $1,5 \cdot 10^7$ К.

Таблица 3.7

Характерные параметры звезд главной последовательности

Спектральный класс	Масса ($m_\odot = 1$)	Радиус ($R_\odot = 1$)	Светимость ($L_\odot = 1$)	Время сжатия, млн лет	Время на главной последовательности, млн лет
B0	17	9,0	30 000	0,12	8
B5	6,3	4,2	1000	1,1	80
A0	3,2	2,8	100	4,1	400
A5	1,9	1,5	12	22	2000
F0	1,5	1,25	4,8	42	4000
F5	1,3	1,24	2,7	56	6000
G0	1,02	1,02	1,2	94	11 000
G2 (Солнце)	1,00	1,00	1,00	110	13 000
G5	0,91	0,92	0,72	150	17 000
K0	0,74	0,74	0,35	230	28 000
K5	0,54	0,54	0,10	600	70 000

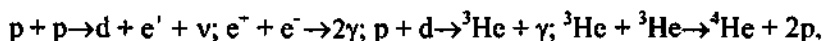
Используя выражения (3.25) и (3.26), получаем

$$T_0 = 1,5 \cdot 10^7 \cdot R^{1/3}. \quad (3.28)$$

Более точные расчеты показывают, что эта формула дает удовлетворительные результаты для всех звезд главной последовательности.

По мере продвижения вверх по главной последовательности к более голубым звездам их радиусы и массы увеличиваются, поэтому температура в центре звезд также возрастает (для класса $B0$ $T_0 \approx 3 \cdot 10^7$ К, а для $K0$ $T_0 \approx 1 \cdot 10^7$ К).

От значения температуры зависят характер ядерных реакций в недрах звезды и темп энерговыделения. Условия в недрах звезд классов G, K, M (в том числе Солнца) таковы, что ядерная энергия у них выделяется в основном в результате *протон-протонной реакции* (так называемый водородный цикл, или $H + H$). Суть этого механизма заключается в том, что синтез гелия из водорода осуществляется по следующей схеме (рис. 3.10):



что в итоге дает $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu + 2\gamma$. Дефект массы составляет 0,73 % от $4m_p$, а выход энергии в одном акте реакции $\epsilon = 26,7$ МэВ (из этого $\sim 26,2$ МэВ энергии уносится гамма-квантами γ , а $\sim 0,5$ МэВ — нейтрино ν). Мощность энерговыделения при этом типе реакции $E \sim T^4$.

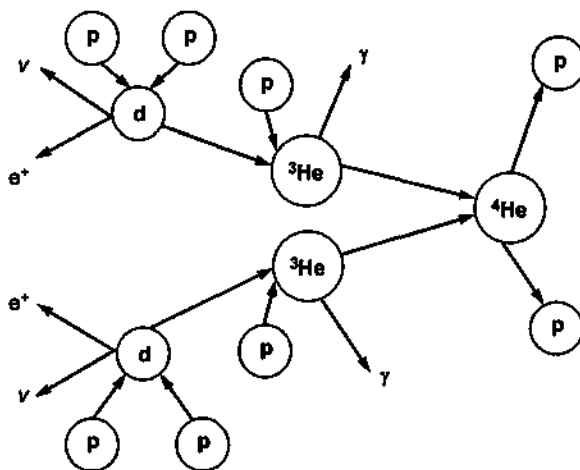


Рис. 3.10. Протон-протонная реакция синтеза гелия

Внутреннее строение звезд поздних спектральных классов (в том числе Солнца), где основную роль играет протон-протонный цикл, показано на рис. 3.11. Следует отметить, что толщина *наружной конвективной зоны* зависит от эффективной температуры внешних слоев (фотосферы) звезды и от химического состава ее вещества. При $T_{\text{eff}} \leq 8000$ К наружная конвективная зона развита тем сильнее, чем меньше эффективная температура звезды, так как ее «холодная» поверхность не может передать всю поступающую изнутри энергию, для этого необходим механический процесс (конвекция). Звезда класса M , например, в основном состоит из конвективной зоны. С другой стороны, расчеты показывают,

что при $T_{\text{eff}} > 8000$ К поверхностная конвективная зона у звезды не должна появляться, поскольку выход энергии обеспечивается только за счет ее излучения.

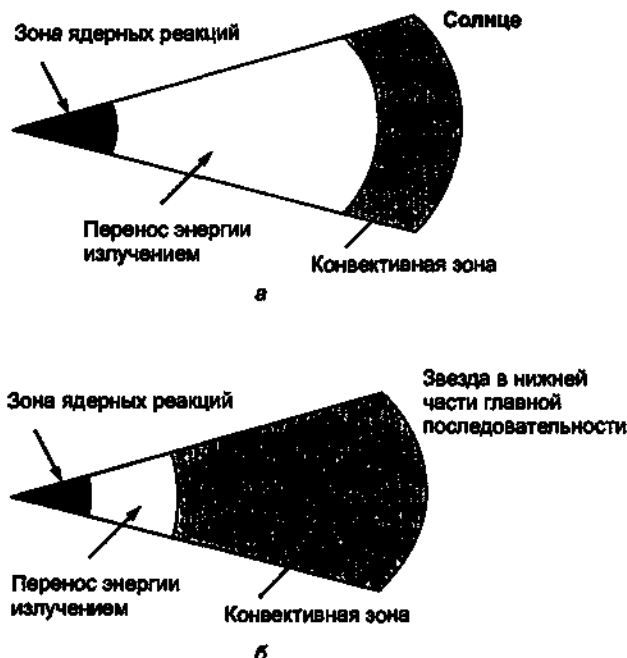


Рис. 3.11. Внутреннее строение звезд поздних спектральных классов (G, K, M):
а — Солнце; б — звезда в нижней части главной последовательности

В отличие от только что рассмотренных звезд поздних спектральных классов масса звезд в верхней части главной последовательности превышает массу Солнца. Следовательно, температура в их недрах выше, а термоядерная энергия выделяется через так называемый *углеродный* (углеродно-азотный, или CNO) цикл. В ходе этой реакции также происходит синтез ядер гелия из водорода, но своеобразным катализатором являются ядра углерода. Такая реакция может быть доминирующей при температуре в центре $T_0 \geq 1,6 \cdot 10^7$ К. Вследствие высокой температуры недр светимость таких звезд также больше, чем Солнца, поэтому эволюционировать они должны быстрее (см. табл. 3.7).

При углеродном цикле выделяется энергия $E \sim T^{20}$, т.е. это происходит очень быстро, излучение (путем так называемого лучистого переноса) не может вынести всю выделенную энергию из недр звезды. Для выноса энергии подключается механический процесс (конвекция), и в недрах звезды возникает *центральная конвективная зона*. Строение звезды одного из ранних спектральных классов показано на рис. 3.12. Например, звезда массой $10m_{\odot}$ должна иметь внутреннюю конвективную зону радиусом около $1/4$ радиуса всей звезды, в то время как плотность в ее центре примерно в 40 раз выше, чем плотность Солнца.

Отличительной особенностью *субкарликов* является низкое содержание тяжелых элементов (в астрономии под термином «тяжелый элемент» часто понимают химические элементы, которые тяжелее гелия). Из этого следует, что субкарлики — преимущественно старые звезды, состоящие из вещества, которое еще не находилось в недрах других звезд. Возникли они, по-видимому, на ранних стадиях эволюции Галактики. Прозрачность вещества звезды тем больше, чем меньше таких тяжелых элементов, поэтому субкарлики отличаются высокой прозрачностью по сравнению с другими звездами, что не требует возникновения поверхностной конвективной зоны.

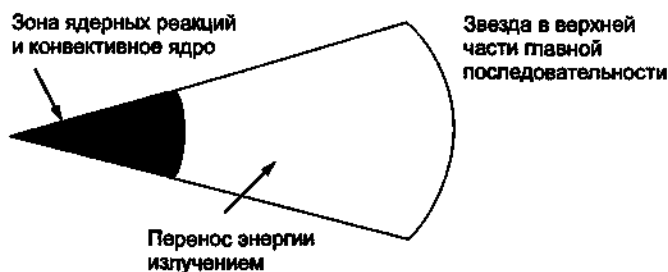


Рис. 3.12. Внутреннее строение звезды раннего спектрального класса

Звезда находится на главной последовательности до тех пор, пока происходит выгорание водорода в ее центральном ядре. Длительность этой стадии составляет более 90 % времени «жизни» звезды, в то время как длительность остальных — менее 10 %. Постепенное преобразование водорода в гелий в ядре звезды способствует увеличению молекулярного веса его вещества, а значит, уменьшению давления, а затем приводит к сжатию ядра, повышению его температуры и, следовательно, светимости всей звезды. Общий радиус звезды при этом увеличивается, а эффективная температура снижается.

Когда в центральной части звезды заканчивается водород, она испытывает гравитационное сжатие в течение непродолжительного времени. Температура, давление в ядре звезды и ее светимость возрастают. В этих условиях гелий еще не может вступить в термоядерный синтез, однако в такую реакцию вступает водород, который находится в тонком слое, окружающем гелиевое ядро звезды. После того как это происходит, значительно возрастает размер звезды, а эффективная температура уменьшается. В результате у звезды возникает гигантская конвективная зона (занимает примерно 90 % радиуса). Звезда вступает в стадию так называемого *красного гиганта*. Описанные эволюционные треки звезд от стадии главной последовательности до красного гиганта показаны на рис. 3.13, примерное строение красного гиганта — на рис. 3.14.

Солнце также ожидает переход в стадию красного гиганта. Произойдет это, когда светилу будет, по разным оценкам, от $9 \cdot 10^9$ до $13 \cdot 10^9$ лет. Сейчас Солнцу

около $4,7 \cdot 10^9$ лет; в центре его содержится 35 % водорода (в начале эволюции было ~73 %). Стадия красного гиганта, когда водород горит в слое, окружающем ядро, продлится для Солнца примерно $5 \cdot 10^8$ лет. Затем последует быстрая ($\sim 5 \cdot 10^7$ лет) стадия горения гелия и более тяжелых элементов в ядре и окружающем слое, что будет сопровождаться сбросом оболочки, после чего Солнце превратится в медленно остывающий *белый карлик*.

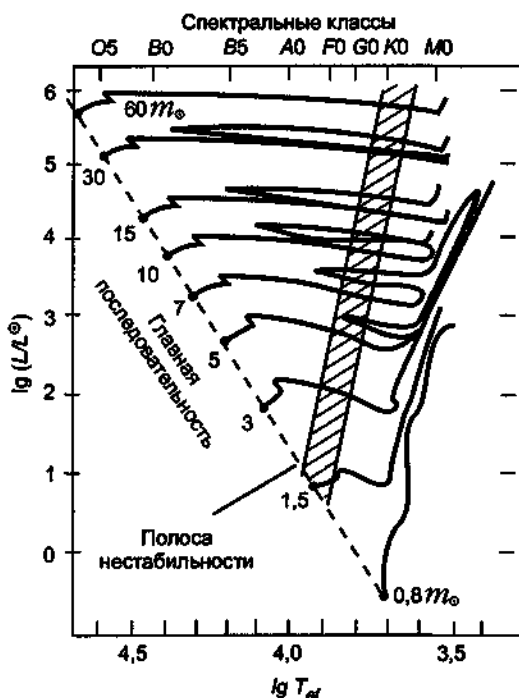


Рис. 3.13. Эволюционные треки звезд с различной массой ($0,8\text{--}60 m_{\odot}$) от главной последовательности до красного гиганта на диаграмме спектр — светимость

Гелиевое ядро красного гиганта изотермично, поскольку лишено источников энергии. При $m > 2,5 m_{\odot}$ оно оказывается достаточно горячим, чтобы газ оставался идеальным. Впоследствии этот факт будет способствовать более быстрому вступлению гелия в термоядерный синтез. Наоборот, при $m < 2,5 m_{\odot}$ температура меньше, и электронный газ оказывается вырожденным. Поскольку он может противостоять гравитационному сжатию, то это в значительной степени замедлит начало процесса горения гелия.

По мере выгорания водорода в слое масса ядра возрастает, а зона ядерных реакций все больше смещается во внешние слои, но до определенного предела, пока есть условия для термоядерного синтеза. При $m = 1,3 m_{\odot}$ гелиевое ядро составляет 1/4 массы звезды размером 1/1000 от ее радиуса и плотностью в центре $\rho \approx 350 \text{ кг/см}^3$.

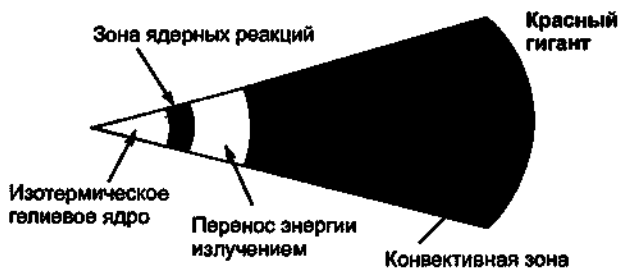
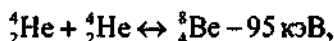
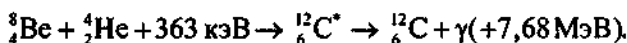


Рис. 3.14. Внутреннее строение красного гиганта

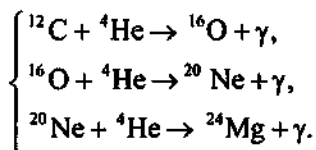
После выгорания водорода гелиевое ядро сжимается, появляются условия для того, чтобы гелий вступил в термоядерную реакцию, которая называется *тройным α -процессом*. Вначале две α -частицы образуют крайне неустойчивое ядро бериллия:



которое может распасться на две α -частицы или захватить еще одну α -частицу и образовать ядро углерода в возбужденном состоянии. Это ядро, которое, в свою очередь, перейдет в невозбужденное состояние с выделением большой энергии:



Для эффективности этого процесса необходимо, чтобы температура была $T \geq 10^8 \text{ K}$, а плотность $\rho > 1\text{--}10 \text{ кг/см}^3$. Реакция сгорания гелия порождает выход энергии 7,3 МэВ. Энерговыведение при этом происходит очень бурно ($E \sim T^{30}$), поэтому иногда оно носит характер взрыва с резким расширением оболочек звезды и возможной потерей массы, после чего светимость резко снижается, гелиевое ядро опять сжимается и т.д. Это явление получило название *гелиевая вспышка*. Помимо образования углерода из гелия возможны и другие реакции, которые требуют все более высокой температуры ($T > 1,5 \cdot 10^8 \text{ K}$):



После возгорания гелия в ядре звезды у нее исчезает наружная конвективная оболочка и возникает конвекция в самом ядре. В этот период на диаграмме Герцшпрунга — Рассела звезда вновь перемещается в сторону главной последовательности. Это продолжается до тех пор, пока запасы гелия в ядре не истощатся. Далее у звезды опять возникает протяженная наружная конвективная зона.

Гелий, как и водород, начинает гореть в тонком слое, окружающем теперь уже углеродное (если $m < m_{\odot}$), или углеродно-кислородное (если $10m_{\odot} < m < 30m_{\odot}$), или даже углеродно-кислородно-магниевое (если $m > 40m_{\odot}$) ядро. Звезда в этот период возвращается в область гигантов и сверхгигантов.

Затем у наиболее массивных звезд в результате гравитационного сжатия и достижения необходимых условий ($T > 10^9$ K) происходит термоядерное горение углерода в ядре ($^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$) с образованием Ne, Na, Mg. После этого аналогично начинаются реакции с участием более тяжелых ядер: Ne, O, Si. Образуются ядра химических элементов вплоть до Fe, Co, Ni, Mn, Cr. Для этого необходимы все более высокие температура и плотность в центре: $T > 3 \cdot 10^9$ K и $\rho \approx 10^5 - 10^9$ г/см³. В результате звезда приобретает весьма сложную структуру (рис. 3.15), а у самых массивных звезд образуется железное ядро. Следует отметить, что в результате отщепления с помощью высокоэнергетичных γ -квантов α -частиц с последующим их поглощением ядрами химических элементов могут образоваться и более тяжелые, чем Fe и Ni, ядра.

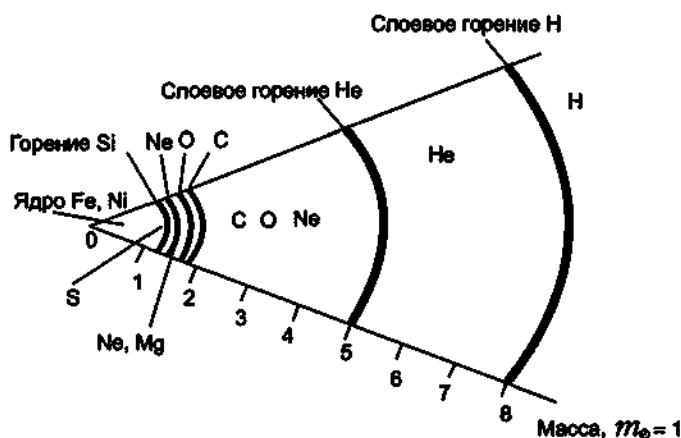


Рис. 3.15. Центральная часть массивной звезды в конечной стадии эволюции

Важной особенностью описанных эволюционных процессов является то, что звезда на диаграмме спектр — светимость хотя бы один раз пересекает зону, отмеченную как *полоса неустойчивости* (см. рис. 3.8, 3.13). В нее попадает множество типов звезд, которые в этом случае называются *переменными*. Общим свойством их являются пульсации, т.е. периодическое изменение радиуса, эффективной температуры и светимости. Наиболее наглядное объяснение этому эффекту было дано для *цефеид* — физических переменных звезд, характерным представителем которых является δ Цефея.

Основную роль в этом процессе играет частично дважды ионизованный гелий, выполняющий функцию клапана в наружных слоях звезды. Однократно ионизо-

ванный гелий обладает повышенной непрозрачностью для излучения, тогда как дважды ионизованный значительно более прозрачен. Случайное сжатие внешнего слоя ионизованного гелия способствует повышению непрозрачности, поглощению излучения, разогреву внешней оболочки и всей звезды в целом, ионизации гелия, повышению давления, следовательно, расширению слоя и увеличению радиуса звезды. В результате снижается непрозрачность слоя, звезда начинает терять энергию за счет излучения (повышается ее светимость) и охлаждаться. Слой гелия опять сжимается, и все повторяется сначала.

При определении расстояний до удаленных объектов весьма важна обнаруженная взаимосвязь между светимостью (средней абсолютной звездной величиной) и периодом пульсации цефеид, которая с точностью до $\pm 0^m,3$ на данном этапе исследований такова:

$$M_v = -(1,01 + 2,87 \cdot \lg P) = -2,5 \cdot \lg \frac{L}{L_{\odot}} + 4^m,8 \quad (3.29)$$

Здесь P — период пульсации цефеиды, сут.

Ход дальнейшей эволюции звезды зависит прежде всего от ее массы. Горение гелия в ядре и околоядерном слое сопровождается различными процессами, которое обуславливают нестабильность состояния звезды (например, гелиевые вспышки). Это может привести к постепенному истечению вещества (особенно тяжелых элементов) под действием давления излучения (в основном в виде звездного ветра, скорость которого 10–30 км/с) или к внезапному сбросу внешних оболочек. В последнем случае образуется так называемая *планетарная туманность*. Она выглядит как кольцообразная, быстро расширяющаяся газовая оболочка, окружающая яркую и горячую звезду в центре. Центральная звезда — не что иное, как раскаленное ядро бывшего красного гиганта. Иногда звезда в течение «жизни» может терять до 70–80 % массы вещества. Причины этого еще недостаточно изучены.

Если после исчерпания ядерного горючего (со сбросом оболочки или нет) оставшаяся звезда имеет массу $m < 1,44 \cdot m_{\odot}$ (значение $m_{\text{ч}} = 1,44 \cdot m_{\odot}$ называется *пределом Чандрасекара* и играет особую роль в астрофизике при описании эволюции звезд), она в конечном итоге превращается в белого карлика. Это горячие компактные объекты массой, примерно равной массе Солнца, но радиус их в десятки и сотни раз меньше. Чем больше масса белого карлика, тем меньше его размер и выше плотность. Расчеты позволяют получить предельные значения $R \geq 1027$ км, $\rho \leq 2,3 \cdot 10^{10}$ г/см³.

Вещество белого карлика при таких физических условиях представляет собой вырожденный электронный газ (рис. 3.16). Фактически этот объект — центральная часть бывшего красного гиганта после того, как в нем прекращаются все возможные ядерные реакции. Вследствие малых размеров, несмотря на высокую

эффективную температуру (вплоть до 70 000 К), белые карлики имеют низкую светимость (см. рис. 3.8).

Поскольку белые карлики лишены внутренних источников энергии, они, медленно остывая, постепенно излучают запасенную тепловую энергию. Светимость и температура их медленно снижаются. Известны, например, белые карлики с $T_{\text{eff}} \approx 5000$ К. Светимость $L \approx 0,001 \cdot L_{\odot}$ соответствует возрасту примерно 10^9 лет.

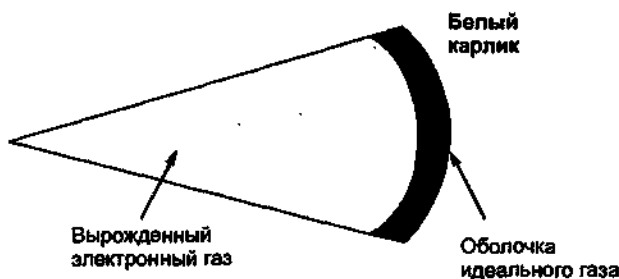


Рис. 3.16. Внутреннее строение белого карлика

Примечателен вид спектров белых карликов. Спектральные линии их (в основном — гелия) сильно уширены из-за большого давления и имеют заметное гравитационное красное смещение.

Гораздо более драматичен финал эволюции самых массивных звезд: звезды массой $m > 8 m_{\odot}$ проходят стадию термоядерного взрыва, или вспышки *сверхновой* (SN) звезды. В этот момент они достигают в максимуме абсолютной звездной величины от -14^m до -21^m и светимости 10^{34} Вт, т.е. иногда больше светимости своей галактики. Вспышка длится несколько сотен дней, поэтому полная энергия, излучаемая сверхновой звездой, может превышать 10^{43} – 10^{44} Дж, а с учетом энергии, уносимой нейтрино, — 10^{46} Дж.

По световым (временной ход кривой блеска) и спектральным свойствам сверхновые звезды подразделяются на два типа (SN I и SN II), что свидетельствует о некоторых различиях в физической природе явления. Вспышки SN I имеют $\langle M \rangle \approx -20^m$ и связаны со взрывом белого карлика, который получает насыщенное водородом вещество в результате аккреции в тесных двойных системах, либо это конечный продукт эволюции молодых массивных звезд типа Вольфа — Райе. Вспышки SN II имеют $\langle M \rangle \approx -18^m$ и представляют собой конец спокойной эволюции массивной звезды с $m > 8 m_{\odot}$.

Вспышки сверхновых звезд наблюдались в нашей галактике в 1006, 1054, 1572, 1604 гг.; в туманности Андромеды — в 1885 г. В 1987 г. были хорошо изучены характеристики вспыхнувшей сверхновой звезды в Большом Магеллановом Облаке.

Чтобы понять причины взрыва сверхновой звезды, нужно знать структуру массивных звезд в конце эволюции (см. рис. 3.15). Звезды массой $4m_{\odot} < m < 8m_{\odot}$ имеют вырожденное ядро, которое состоит в основном из углерода и кислорода (более тяжелые элементы еще не образовались, т.е. это происходит раньше, чем изображено на рис. 3.15). Масса звездного ядра растет главным образом за счет слоевого горения более легких, чем углерод, элементов. Когда она приближается к пределу Чандрасекара, силы давления уже не могут противостоять гравитации. Ядро сжимается, и появляются условия для мгновенного возгорания углерода, которое носит взрывной характер. Внезапное увеличение температуры снимает вырождение ядра, начинается коллапс (катастрофическое сжатие) всей звезды. Далее сильный нагрев падающего в центр звезды вещества, еще не прошедшего все стадии термоядерного синтеза, приводит к мощному ядерному взрыву звезды, который наблюдается как *SN I*. У таких звезд элементы Fe, Co, Ni, Mn, Cr образуются уже в момент взрыва.

В отличие от предыдущего случая, звезды с $m > 8m_{\odot}$ имеют невырожденное ядро, элементы «железного пика» успевают возникнуть до взрыва (см. рис. 3.15). Вследствие сопутствующего повышения температуры до $8 \cdot 10^9$ К и более ядра железа начинают испытывать α -распад, гидродинамическое равновесие нарушается. Звездное ядро, а затем и оболочка испытывают коллапс. При этом происходит новый разогрев вещества и термоядерный взрыв на основе мгновенных ядерных превращений элементов, сохранившихся в оболочке и способных на термоядерный синтез. Такой взрыв наблюдается как *SN II*.

Важной особенностью вспышек сверхновых звезд является мощный поток нейтрино, возникающих в результате слабого взаимодействия протонов и электронов ($p + e \rightarrow n + \nu$). Оболочки таких звезд, рассеянные взрывом, образуют различные расширяющиеся *туманности*, которые затем наблюдаются в разных диапазонах длин волн (яркий пример — Крабовидная туманность). Поскольку массы центральных остатков сверхновых звезд, как правило, превосходят предел Чандрасекара, а запасы ядерного горючего исчерпаны, остатки звезд коллапсируют за время порядка 1 с в *нейтронную звезду* или в *черную дыру*.

В процессе коллапса звезды с последующим образованием такого объекта, как нейтронная звезда, гравитационное сжатие длится до тех пор, пока вещество звезды не достигает плотности, близкой к плотности атомного ядра ($\rho_{\text{ял}} \approx 2,8 \cdot 10^{14}$ г/см³). При этом электроны «вдавливаются» в протоны с образованием нейтронов ($p + e \rightarrow n + \nu$), которые при таких гравитационных силах являются уже стабильными частицами (не подвержены β -распаду). Происходит так называемая «нейтронизация» вещества.

Современные расчеты показывают, что для нейтронных звезд также существует предельная масса: $m_{\text{max}} \leq 2,5m_{\odot}$. При этом плотность достигает $\rho_{\text{max}} \geq 10^{15}$ г/см³, а радиус $R \approx 10$ км. Однако есть и «маленькие» нейтронные звезды, для которых

$m_{\min} \approx 0,1 m_{\odot}$; $\rho_{\min} \approx 2 \cdot 10^{14}$ г/см³; $R \approx 200$ км. На рис. 3.17 показана модель строения нейтронной звезды с $\rho \approx 5 \cdot 10^{14}$ г/см³ и $R \approx 16$ км.

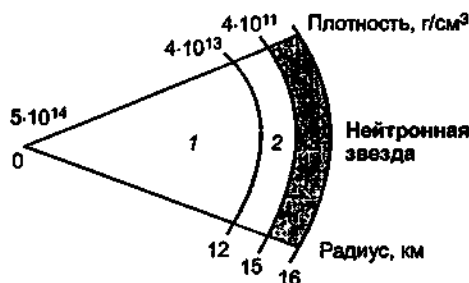


Рис. 3.17. Внутреннее строение нейтронной звезды: 1 — жидкое ядро из нейтронов с примесью протонов и электронов; 2 — внутренняя кора из ядер Fe и соседних элементов, переобогащенных нейтронами, с примесью свободных нейтронов; 3 — внешняя кора из ядер ^{56}Fe с примесью Co, Cr, Ni и вырожденных электронов

Вращение нейтронных звезд в процессе коллапса повышается в силу сохранения момента количества движения до нескольких сотен оборотов в секунду. Напряженность магнитного поля таких звезд также возрастает до колоссальных значений. Магнитное поле приобретает довольно сложную структуру и индуцирует сильные электрические поля. Это приводит к тому, что заряженные частицы вокруг нейтронной звезды излучают в направлении узкого конуса. Подобное узконаправленное излучение в сочетании с быстрым вращением может наблюдаться на Земле как последовательность импульсов. Подобные явления впервые отмечались в 1967 г., а объекты, которые давали такие импульсы, названы пульсарами (от англ. *pulse* и *star*). Теперь ясно, что это не что иное, как нейтронные звезды. Вращение нейтронной звезды в мощном электромагнитном поле приводит к постепенному ее торможению и увеличению периода пульсаций.

Итак, массы большинства нейтронных звезд заключаются в пределах $1,44 m_{\odot} - 2,5 m_{\odot}$. Если масса звезды, оставшейся после взрыва или более «мирного» истечения вещества, превышает $m_{\max}$, то даже давление вырожденных нейтронов, т.е. ядерная плотность, не может остановить гравитационный коллапс звезды. В итоге она превращается в особый объект — черную дыру. Ее радиус меньше так называемого гравитационного радиуса для данного объекта.

Гравитационный радиус Шварцшильда r_{grav} , который дает оценку радиуса черной дыры, определяется по формуле

$$r_{\text{grav}} = \frac{2G \cdot m}{c^2}, \quad (3.30)$$

где m — масса объекта; $G = 6,6726 \cdot 10^{-11}$ Н · м²/кг⁻² — гравитационная постоянная; c — скорость света.

Радиус Шварцшильда можно рассчитать также для любого объекта.

Характерной особенностью объекта внутри сферы радиусом r_{grav} является то, что параболическая скорость для него больше скорости света, т.е. такой объект ничего не излучает. Собственное излучение черной дыры увидеть невозможно, но ее можно обнаружить (как и нейтронную звезду) благодаря характерному излучению вещества вокруг нее.

Поскольку вблизи нейтронной звезды и черной дыры классические законы физики не соблюдаются и описываются они только на основе общей теории относительности, эти объекты называют *релятивистскими*.

Довольно часто на небесной сфере наблюдаются две или несколько близко расположенных звезд. Некоторые из них на самом деле находятся далеко друг от друга и только проецируются в очень близкие точки на небе. Такие звезды называются *оптически двойными*. В отличие от них *физически двойная звезда* — это две звезды, которые находятся между собой в тесном гравитационном взаимодействии, образуют единую динамическую систему и обращаются вокруг общего центра масс. Иногда наблюдаются также группы из трех и более звезд (*тройные и кратные системы*). Если компоненты физически двойной звезды могут наблюдаться раздельно (разрешаются), то такая звезда называется *визуально-двойной*. Если двойственность звезды устанавливается только по периодическим изменениям видимой звездной величины, такая звезда называется *затменной переменной*. У *спектрально-двойной* звезды орбитальные движения компонентов обнаруживаются по периодическим смещениям спектральных линий. Двойные звезды очень распространены в Галактике: около половины всех звезд Млечного Пути образуют двойные или кратные системы. Изучение двойных звезд позволяет определить важнейшую их характеристику — массу.

Движение компонентов двойной звезды происходит в соответствии с законами Кеплера: оба компонента описывают в пространстве подобные (с одинаковым эксцентриситетом) эллиптические орбиты вокруг общего центра масс. Таким же эксцентриситетом обладает орбита одного компонента (*звезды-спутника*) относительно другого (*главной звезды*), если его считать неподвижным. Закон Кеплера применительно к *двойным звездам* таков:

$$\frac{m_1 + m_2}{m_{\odot}} = \frac{a^3}{P^2}. \quad (3.31)$$

Здесь m_1, m_2 — массы компонентов двойной звезды; $m_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг — масса Солнца; a — большая полуось эллиптической орбиты спутника относительно главной звезды, выраженная в астрономических единицах; P — период этого движения, годы.

Большая полуось a равна сумме больших полуосей орбит движений обеих звезд относительно центра их масс: $a = a_1 + a_2$. Из законов механики следует, что $m_1/m_2 = a_2/a_1$.

Легко можно определить взаимосвязь между большой полуосью эллиптической орбиты в астрономических единицах a , этой же величиной, но выраженной в секундах дуги, α , и параллаксом π :

$$a(\text{а.е.}) = \frac{\alpha''}{\pi''}. \quad (3.32)$$

Особый интерес представляют *тесные двойные системы* — пары звезд, расстояние между которыми сравнимо с их размерами. При этом существенную роль начинают играть приливные взаимодействия между компонентами. Под действием приливных сил поверхности обеих звезд перестают быть сферическими. Звезды приобретают эллипсоидальную форму, у них возникают направленные друг к другу приливные горбы. Существенную роль в эволюции таких систем играет взаимный обмен веществом, перетекание вещества с одного компонента на другой — *аккреция*. Иногда вещество одного или обоих компонентов формирует оболочку, которая охватывает обе звезды.

Если спутником в тесной двойной системе является белый карлик и на него попадает достаточное количество богатого водородом вещества из оболочки главной звезды, происходит термоядерный взрыв этого вещества. Подобное явление мы наблюдаем как вспышку *новой звезды*. Это не означает рождение звезды, а лишь отражает определенную стадию ее переменности. Новые звезды — эруптивные (с выбросом вещества) переменные звезды особого типа. Во время взрыва видимая звездная величина уменьшается чаще всего на $10\text{--}13^m$, что соответствует увеличению светимости иногда в миллионы раз. В среднем абсолютная звездная величина в максимуме достигает $M = -8^m,5$. Общее количество энергии, выделяющейся при вспышке новой звезды, превышает $10^{39}\text{--}10^{40}$ Дж. По спектрам в максимуме вспышки новые звезды похожи на сверхгиганты спектральных классов $A\text{--}F$. После вспышки они выглядят как горячие карлики.

В том случае, если спутником в тесной двойной системе оказывается нейтронная звезда, при аккреции вещества можно наблюдать явление, очень похожее на вспышку новой звезды, только без отделения оболочки (в поле тяготения нейтронной звезды это практически невозможно). Это явление называется вспышкой *барстера*. Во время такой вспышки барстер излучает преимущественно в рентгеновском диапазоне.

3.1.4. Крупномасштабные звездные системы

Все видимые на небе звезды и Млечный Путь образуют единую, динамически связанную систему — нашу *Галактику*, которая включает в себя также множество

других, невидимых простому глазу звезд, их систем, межзвездную материю и т.д. Считается, что в состав Галактики входит порядка $2 \cdot 10^{11}$ звезд. Структура Галактики представлена на рис. 3.18. Видно, что Галактика является сплюснутой системой, симметричной относительно главной плоскости, называемой *плоскостью Галактики*. Большой круг, по которому она пересекается с небесной сферой, называется *галактическим экватором*. Солнце расположено на 20–25 пк севернее плоскости галактического экватора, поэтому средняя линия Млечного Пути не совпадает с ним. При наблюдении из Солнечной системы центр Галактики проецируется в созвездие Стрельца, а точнее — в область с координатами $\alpha = 265^\circ$ и $\delta = -29^\circ$. По направлению к центру Галактики, а также по мере приближения к ее плоскости звездная плотность возрастает: в центре она достигает 10^5 – 10^6 звезд в 1 пк^3 , тогда как в окрестности Солнца — около 0,12 звезд в 1 пк^3 (1 звезда в 8 пк^3 , т.е. среднее расстояние между звездами равняется 2 пк).



Рис. 3.18. Схема строения Галактики

Таким образом, распределение звезд в Галактике имеет две ярко выраженные тенденции: во-первых, они очень сильно концентрируются к галактической плоскости, во-вторых, концентрируются к центру Галактики. Центральное сгущение звезд Галактики — *балдж*. Его диаметр, скорее всего, не превышает 1–2 кпк. В центре балджа выделяют компактное ядро. В самом центре Галактики, как полагают, находится черная дыра массой порядка $10^6 \cdot M_\odot$. Солнце удалено от центра Галактики на расстояние около 8 кпк. Объекты, самые удаленные в направлении, противоположном от центра, находятся от Солнца на расстоянии примерно 7 кпк. Диаметр видимого диска Галактики составляет около 30 кпк, но это величина условная, так как звездная плотность по мере удаления от центра уменьшается постепенно, резкой границы не существует. Например, некоторые объекты сферического *гало* могут встречаться на расстояниях до 100 кпк. Однако большая часть звезд расположена вблизи плоскости Галактики, и звездная плотность уменьшается по мере удаления от нее почти по экспоненциальному закону. Эффективная толщина звездного диска (где плотность снижается в e раз) равняется примерно 500–600 пк.

Большая часть самых молодых объектов Галактики (звезды ранних спектральных классов *O* и *B*, цефеиды, рассеянные звездные скопления, звездные ассоциации, сверхновые *SN II*, газовые и пылевые туманности, молекулярные облака и т.п.) образуют еще более тонкий диск толщиной 100–200 пк. Это *плоская подсистема* Галактики (рис. 3.18). Следует подчеркнуть, что некоторые объекты (например, самые молодые звезды классов *O* и *B*) встречаются не везде в плоской подсистеме, а только в ее так называемых *спиральных ветвях (рукавах)*, которые, собственно говоря, ими и образованы. Более старые звезды и планетарные туманности вместе с плоской подсистемой образуют более толстый диск толщиной несколько сотен парсеков — *звездный диск* Галактики.

С другой стороны, самые старые объекты в Галактике — звезды типа *RR* Лиры и *W* Девы, субкарлики и шаровые звездные скопления — гораздо слабее концентрируются к галактической плоскости, но зато обнаруживают ярко выраженную тенденцию сильно концентрироваться к центру Галактики. Поэтому эти объекты принято объединять в другую галактическую группу — *сфероидальную подсистему* Галактики, которая вместе с галактическими полями, космическими лучами и *галактической газовой короной* образует *гало* (рис. 3.18).

Объекты, принадлежащие к разным подсистемам Галактики, различаются химическим составом и кинематическими характеристиками. Подобное различие отражает ход эволюции Галактики.

Благодаря длительному изучению движений и лучевых скоростей звезд было установлено, что Галактика вращается как единая динамическая система. Однако это вращение является дифференциальным, т.е. скорость звезд изменяется в зависимости от расстояния между ними и центром.

Отмечаются следующие особенности вращения Галактики.

1. Вращение происходит по часовой стрелке, если смотреть на Галактику со стороны ее северного полюса, который находится в созвездии Волосы Вероники.

2. Угловая скорость вращения снижается по мере удаления от центра, но медленнее, чем если бы вращение звезд вокруг центра Галактики происходило по законам Кеплера.

3. Центральная часть диска в области балджа вращается почти как твердое тело. Линейная скорость вращения вначале по мере удаления от центра возрастает пропорционально расстоянию вплоть до максимального значения ~250 км/с. Затем она уменьшается до 200–220 км/с в окрестности Солнца, после чего остается примерно постоянной или начинает немного снижаться.

4. Солнце и звезды в его окрестности совершают полный оборот вокруг центра Галактики примерно за 240–250 млн лет. Этот период называется *галактическим годом*.

Зная скорость вращения Галактики, можно оценить ее массу. В результате расчетов получается значение около $M_{\text{Gal}} = 2 \cdot 10^{11} \cdot M_{\odot}$. Однако Галактика может обладать значительной скрытой массой, заключенной в короне, которая увеличивает

приведенную оценку в несколько раз. Примерно 98 % массы Галактики приходится на звезды и около 2 % — на газ, пыль и другие составляющие.

Что касается движения Солнца относительно окружающих звезд, то путем наблюдений было установлено, что Солнечная система движется в направлении своего апекса, который находится в созвездии Геркулеса и имеет координаты $\alpha = 270^\circ$ и $\delta = +30^\circ$, со скоростью ~ 20 км/с относительно окружающего межзвездного газа. Чтобы лучше ориентироваться среди объектов Галактики, принята галактическая система координат (рис. 3.19).

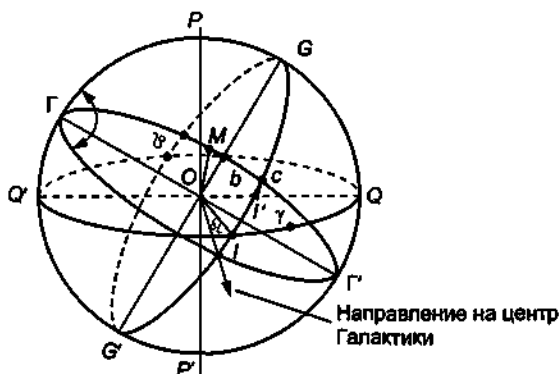


Рис. 3.19. Галактическая система координат: GG' — галактическая ось; QOQ' — галактический экватор; l, b — соответственно галактическая долгота и широта светила M

Среди других галактик наиболее близко от нашей Галактики находятся Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако (галактики неправильной формы), а также туманность Андромеды (спиральная галактика). Последняя внешне наиболее похожа на нашу Галактику, но имеет большие размеры. В настоящее время можно наблюдать миллиарды галактик. В существующих каталогах описана большая часть галактик ярче 15^m (их несколько десятков тысяч).

По внешнему виду, структуре и характеру распределения яркости галактики подразделяются на эллиптические (E), спиральные (S) и неправильные (Ir). Иногда как особый вид галактик выделяют линзовидные ($S0$), которые занимают промежуточное положение между эллиптическими и спиральными: у них есть звездный диск, но нет спиральных рукавов. Выделяют также пекулярные галактики (P), имеющие характерные особенности строения и формы. Эллиптические и спиральные галактики в свою очередь подразделяются на подвиды в зависимости от формы эллипсов (первые) или развитости спиральных ветвей (вторые). Спиральные галактики, имеющие вытянутую перемычку (*бар*) между спиральными ветвями, обозначаются символами SB . Примерная классификация галактик дана на рис. 3.20.

В табл. 3.8 приведены основные физические характеристики некоторых галактик, расположенных близко от нашей Галактики.

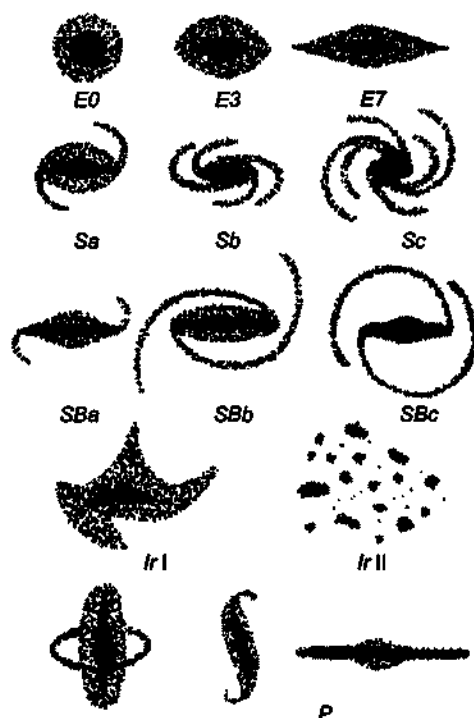


Рис. 3.20. Камертонная диаграмма структур галактик Хаббла: эллиптические (E); спиральные (S); неправильные (Ir); пекулярные (P)

Таблица 3.

Галактики ярче 8^m по сравнению с нашей Галактикой

Галактика	Тип	Диаметр, кпк	Расстояние, Мпк	m_V	M_B	$^1g(m/m_\odot)$
Млечный Путь (Галактика)	<i>Sbc</i>	30	—	—	-20,9	11,3
Большое Магелланово Облако	<i>Ir</i>	10	0,05	0,1	-18,4	10,0
Малое Магелланово Облако	<i>Ir</i>	4,3	0,06	2,4	-16,3	9,2
Система в Скульпторе (карликовая эллиптическая)	<i>dE</i>	0,6	0,08	7	-11,2	8,5
Система в Печи (карликовая эллиптическая)	<i>dE</i>	1,8	0,2	7	-12,9	9

Окончание табл. 3.8

Галактика	Тип	Диаметр, кпк	Расстояние, Мпк	m_V	M_B	$\lg(m/m_\odot)$
NGC 55		38	2,4	7,1	-20,4	10,5
NGC 224 (туманность Андромеды)	Sb	40	0,7	3,5	-21,8	11,3
NGC 253	Sc	20	2,4	7	-20,3	11,1
NGC 598	Sc	17	7,7	5,8	-18,7	10,7
NGC 3031	Sb	33	3,3	6,9	-20,3	11,3
NGC 5128	E/S0	15	5,0	6	-22	> 11,3

Массы большинства наблюдаемых галактик равны 10^9 – $10^{12} m_\odot$. Исключив карликовые галактики, типичным значением массы можно считать $\sim 10^{11} m_\odot$.

Галактики редко бывают одиночными. Чаще всего они образуют небольшие группы или входят в состав скоплений из сотен и тысяч галактик. Наша Галактика входит в состав так называемой *Местной группы* галактик, которая включает в себя три спиральные (наша Галактика, туманность Андромеды, галактика в созвездии Треугольника), а также несколько десятков карликовых эллиптических и неправильных галактик, крупнейшими из которых являются Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако. Скопления галактик в свою очередь формируют *Сверхгалактики* или *Сверхскопления*.

Скорость удаления V_r внегалактических объектов, которое вызвано космологическим расширением Вселенной, пропорциональна расстоянию до этих объектов r и описывается *законом Хаббла*:

$$V_r = H_0 \cdot r = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = z \cdot c, \quad (3.33)$$

где H_0 — постоянная Хаббла, которая, по оценкам разных авторов, находится в пределах 60–80 км/(с · Мпк).

Наиболее вероятным значением постоянной Хаббла в настоящее время считается $H_0 = 75$ км/(с · Мпк). Отношение $z = \Delta\lambda/\lambda$ при этом обычно называется *красным смещением*. Для релятивистского случая ($V_r \rightarrow c$) красное смещение равно:

$$z = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1 = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (3.34)$$

Закон Хаббла положен в основу определения расстояний до других галактик.

В выражении (3.33) используется следствие из *закона Доплера*, который играет важную роль и в других вопросах астрофизики. На основании измерения смеще-

ния положений спектральных линий закон Доплера позволяет судить о скорости и направлении движения небесного объекта. В общем виде формула эффекта Доплера (рис. 3.21) такова:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cdot \cos \theta}. \quad (3.35)$$

Здесь ν_0 — частота линии излучения источника И; ν — частота излучения, регистрируемая приемником П; $\beta = v/c$ (v — скорость источника относительно приемника, c — скорость света); θ — угол между линией, соединяющей источник и приемник, и направлением вектора скорости источника.

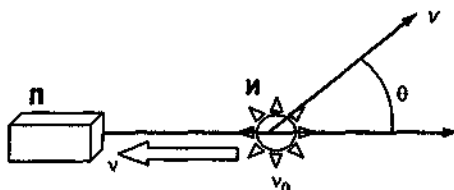


Рис. 3.21. Наблюдение эффекта Доплера

Используя формулу (3.35), можно получить несколько частных случаев:

при $\theta = 0$ получаем $\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$, т.е. так называемое *красное* доплеровское смещение;

при $\theta = \pi$ имеем $\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$ — *фиолетовое* доплеровское смещение;

при $\theta = \frac{\pi}{2}$ $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ — *поперечный* эффект Доплера.

Довольно часто $v \ll c$, тогда для изменения частоты $\Delta \nu$ используется формула

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = -\frac{v}{c} \cdot \cos \theta. \quad (3.36)$$

3.1.5. Вопросы космогонии и космологии

Происхождение и эволюцию небесных тел изучает особый раздел астрономии — *космогония*. Космогонические проблемы имеют большое значение для развития научного мировоззрения в целом, однако они относятся к наиболее трудным астрономическим задачам. Вопросы эволюции планетных систем гораздо менее изучены, чем, например, эволюции звезд, поскольку до недавних пор мы знали только одну такую систему — Солнечную. Исследования других планетных систем начали проводить совсем недавно.

В XVIII в. благодаря ньютоновской механике сложилось представление о Вселенной как о неизменной системе космических тел, управляемой точными законами природы. Тогда считали, что механизм Вселенной был запущен один раз («первотолчком») и функционирует сам собой без каких-либо изменений. Декарт (1644) впервые высказал предположение о том, что Солнечная система образовалась из облака газа и пыли. Подобную гипотезу впоследствии развивали Бюффон (1749) и Кант (1755), полагая, что в центре облака возникло Солнце, а в периферийных частях — планеты. Эта картина в общих чертах считается правильной и сегодня.

В 1796 г. Лаплас высказал предположение о том, что в процессе образования планет большую роль может играть вращение *первичной газопылевой туманности*. Он показал, что центробежная сила при сжатии возрастает быстрее, чем сила тяжести, и при их равенстве возникает так называемая *ротационная неустойчивость*, при которой туманность сплющивается, принимая форму чечевицы, а с ее экватора отделяется вещество. Из этого вещества вокруг туманности образуются плоские кольца, похожие на кольца Сатурна, которые впоследствии конденсируются в планеты. Однако гипотезы Канта и Лапласа в их классической форме не позволяли получить объяснение, почему в Солнечной системе 98 % момента количества движения принадлежит планетам и только 2 % — Солнцу.

Английский ученый Джинс в начале XX в. выдвинул другую гипотезу, которая позволяла «обойти» эту трудность. Он считал, что Солнце, как и другие звезды, сформировалось без планетной системы, а планетная система появилась в результате того, что другая звезда прошла близко от Солнца. Она «вырвала» из него часть вещества, вследствие конденсации которого образовались планеты. Однако существуют факты, опровергающие гипотезу Джинса. Можно, например, показать, что вероятность достаточно близкого прохождения двух звезд друг от друга почти равна нулю. Кроме того, удельный угловой момент выброшенного из Солнца вещества не может превышать угловой момент проходящей рядом звезды. Расчеты показывают, что в этом случае звезда должна двигаться относительно Солнца со скоростью около 5000 км/с, а это гораздо больше, чем параболическая скорость в Галактике (300 км/с). Повышенное (по сравнению с солнечным) содержание лития и дейтерия на планетах скорее всего означает, что планетное вещество отделилось от солнечного еще до того, как в нем начались ядерные реакции.

Основы теории образования планет из твердых частиц околосолнечного допланетного облака были заложены О.Ю. Шмидтом в исследованиях, проведенных в 1944 г. Однако представления о происхождении и ранней эволюции Солнечной системы до сих пор не приобрели характера законченной теории. В то же время основные этапы этой эволюции во многом определились.

1. Газопылевое облако уплотнилось под действием, по-видимому, ударной волны от взрыва сверхновой звезды. Продукты этого взрыва проникли в межзвездную пыль, которая вошла впоследствии в состав *углистых хондритов*.

2. Масса газопылевого облака превосходила определенную критическую величину и начала сжиматься под действием силы тяжести. Это явление называется *гравитационным коллапсом*. Когда наиболее плотные участки облака массой порядка звездной достигли критического предела, они в свою очередь также начали сжиматься, и образовалось несколько центров коллапса (происходила фрагментация). Один из образовавшихся фрагментов впоследствии породил Солнце и Солнечную систему. В центре сжимающегося фрагмента появилось сгущение пыли и газа, которое было ядром *аккреции*. Процесс аккреции — это захват окружающей разреженной среды, приток которой постепенно увеличивает массу ядра.

3. Через 10^4 – 10^5 лет после начала сжатия фрагмента масса центрального сгущения достигла примерно $0,1 \cdot M_{\odot}$, и вещество стало непрозрачным, температура возросла, пыль испарилась. Вскоре после испарения пыли произошла диссоциация молекулярного водорода. В течение 10–100 лет центральное сгущение сжималось, образуя газовую протозвезду (*Протосолнце*).

Аккреция межзвездного вещества Протосолнцем продолжалась. Примерно через 10^5 лет его масса достигла сегодняшнего уровня, а радиус стал примерно в 100 раз больше современного. Приток межзвездного вещества прекратился. Началась стадия гравитационного сжатия Протосолнца. К этому моменту уже существовала дискообразная (благодаря ротационной неустойчивости) газопылевая *протопланетная туманность*, центром которой было Протосолнце. Туманность продолжала расти в процессе дальнейшей аккреции. По-видимому, ее диск приобрел кольцевую структуру, и на этой стадии во внешней его части начали формироваться планеты-гиганты. Это происходило в общем-то так же, как и образование Протосолнца, включая появление более мелкомасштабных дисков. Из них впоследствии сформировались системы спутников.

В начальной стадии этого периода часть пылевого вещества, которое испарилось перед образованием Протосолнца, а затем попало в диск, вновь возвратилось в твердую фазу. При этом возникли частицы обычных хондритов.

В современных моделях существующее распределение момента количества движения в Солнечной системе объясняется тем, что газ в протопланетной туманности был частично ионизованным, а Протосолнце имело значительное магнитное поле. В результате взаимодействия плазмы и поля возникали газовые потоки, которые передавали момент количества движения в протопланетную туманность.

4. Следующий период длился около 10^8 лет. Продолжалось гравитационное сжатие Протосолнца. Размеры его уменьшились, приблизившись к современным. Солнечный ветер (гораздо более сильный, чем в наши дни) удалил газ из внутренней части протопланетной туманности. Пылевое вещество этой туманности все более концентрировалось к некоторой средней плоскости. Пылинки все чаще сталкивались, появлялись все более крупные частицы, протекал процесс *аккумуляции* (роста) твердых тел. Происходило преимущественное увеличение больших тел за счет малых. Наиболее крупные тела постепенно образовали зародыши пла-

нет, подобные астероидам, — *планетезимали*. Количество планетезималей в тот период было весьма значительным. При столкновениях они не только объединялись, но и разрушались.

Наконец сформировалось несколько особо крупных тел. Они стали ядрами аккреции, вокруг которых происходило формирование планет земной группы.

Земля продолжала увеличиваться до современных размеров, по-видимому, около 10^8 лет. Согласно некоторым моделям, процесс аккреции был неоднородным: вначале происходило накопление тяжелых и менее тугоплавких элементов (железо), а силикатные магии планет образовались позже. Вообще говоря, в картине образования планет много неоднозначностей. Существует альтернативная гипотеза, в соответствии с которой родоначальниками планет земной группы были крупные протопланеты (подобные Юпитеру или Сатурну). Они лишились газовой оболочки из-за приливного взаимодействия с Солнцем.

Существуют некоторые фактические подтверждения описанного сценария образования Солнечной системы. В результате наблюдений молодых звезд в инфракрасной области спектра около многих из них были обнаружены образования, напоминающие протопланетные туманности.

Поиски планет около других звезд (*экзопланет*) — одна из наиболее сложных задач современной астрономии. Тем не менее их можно обнаружить благодаря точным астрономическим наблюдениям, например, регистрируя волнообразную траекторию собственного движения звезды вокруг общего с планетами центра масс. Кроме того, можно измерить пульсацию в лучевой скорости звезды, систематически наблюдая ее спектр с очень высоким разрешением. Астрометрический и спектроскопический методы позволяют обнаруживать экзопланеты за пределами Солнечной системы, по массе близкие к массе Юпитера.

Такие методы дают возможность обнаружить двойные системы, один из компонентов которых является *коричневым карликом*. Это звездобразный объект малой массы, ядерные реакции в котором происходили в течение короткого времени (несколько миллионов лет), а затем прекратились. Коричневые карлики — новый класс тел, занимающих промежуточное положение между планетой и звездой. Граница между экзопланетами, внутри которых ядерных реакций никогда не было, и коричневыми карликами — около 13 масс Юпитера. Предполагается, что коричневый карлик образуется в результате фрагментации молекулярного облака, в отличие от планетного тела, которое формируется из протопланетной туманности. Несколько экзопланет, близких по массе к Юпитеру, были обнаружены на очень небольших расстояниях от звезды (порядка 0,1 а.е.). По-видимому, сценарий возникновения такой системы был совершенно не таким, как процесс образования Солнечной системы. Но есть и похожие случаи, когда экзопланеты типа Юпитера обращаются вокруг звезд на расстояниях 2–3 а.е. Обнаружены также экзопланеты, массы которых близки к массе Земли и даже Луны. Удивительно то, что некоторые из них обращаются вокруг пульсаров.

Исследования любых, даже самых отдаленных объектов еще не достаточно для выяснения свойств Вселенной. В то же время она является также предметом изучения астрономии. К тому же эволюционный подход к изучению мира — важнейшая особенность современной астрономии. Происхождение, физическую природу, строение и эволюцию Вселенной как целого изучает ее особый раздел — *космология*. В частности, она рассматривает наиболее общие свойства всей области пространства, доступной прямым наблюдениям (это несколько тысяч мегапарсеков), которую иногда называют *Метагалактикой*.

Основная проблема космологии заключается в том, что всю безграничную Вселенную невозможно «охватить» наблюдениями. В связи с этим то, что известно о Метагалактике, приходится экстраполировать на Вселенную.

Идея об одинаковой средней плотности вещества для достаточно больших объемов пространства во Вселенной — одна из основных в космологии. Размеры областей, в пределах которых среднюю плотность вещества можно считать практически одинаковой, составляют около 100 Мпк, что гораздо меньше размеров Метагалактики. Однако они велики по сравнению с масштабами локальных неоднородностей, связанных с существованием звезд, галактик и их скоплений. О такой равномерности распределения вещества во Вселенной свидетельствует тот факт, что галактики во всех направлениях в среднем распределены равномерно.

То, что средняя плотность вещества не зависит от величины области усреднения (на очень больших масштабах), в космологии расценивается как следствие более общих свойств Вселенной — *однородности* и *изотропии*. Однородность означает одинаковую плотность материи в пространстве при усреднении в достаточно больших объемах, т.е. отсутствие выделенных областей пространства, а изотропия — отсутствие во Вселенной выделенных направлений. Предположение об однородности и изотропии Вселенной называется *космологическим принципом*.

Следует отметить, что если бы Вселенная имела иерархическую структуру, в которой объекты каждого масштаба образуют системы следующего, более крупного масштаба, то ни однородности, ни изотропии не наблюдалось бы.

Ранние представления о Вселенной наряду с ее однородностью включали также принцип неизменности (статичности) нашего мира. Однако первые попытки экстраполировать эти свойства на бесконечное евклидово пространство привели к *фотометрическому* и *гравитационному парадоксам*.

Фотометрический парадокс был сформулирован в 1744 г. Ж. Шезо в Швейцарии, а в 1826 г. — Г. Ольберсом в Германии. Суть его заключается в том, что если пространство является безграничным и равномерно заполнено звездами, то в любом направлении луч зрения рано или поздно пересечет какую-либо звезду. Поскольку яркость объекта не зависит от расстояния до него, нам должно казаться, что все небо ночью равномерно светится, как диск Солнца. К тому же межзвездное поглощение света не устраняет этот парадокс, так как поглощенное излучение переизлучается. Устраняется этот парадокс, если учесть, что энергия света от уда-

ленных объектов снижается из-за красного смещения, т.е. если отказаться от принципа статичности Вселенной. Кроме того, объем пространства, который фактически доступен наблюдениям, конечен и ограничен так называемым *горизонтом видимости во Вселенной*. Под ним понимают сферу, все точки которой удалены от наблюдателя на расстояние, пройденное светом за все время существования расширяющейся Вселенной. Кроме того, объекты находящиеся на горизонте видимости, удаляются от нас вследствие красного смещения со скоростью света и, следовательно, не могут быть видимы.

Гравитационный парадокс был сформулирован в 1895 г. немецким астрономом Х. Зеелигером. Он заключается в том, что, пользуясь законом Ньютона, в бесконечной Вселенной, равномерно заполненной веществом, нельзя однозначно рассчитать силу гравитации в заданной точке. Если ее вычислять, суммируя силы, действующие на пробную массу в этой точке, которые создаются концентрическими слоями с центром в этой же точке, то, очевидно, получится нуль. Если осуществлять расчет для концентрических слоев с центром в некоторой другой точке, удаленной на расстояние r от данной, то сила тяготения окажется равной силе, с которой шар радиусом r притягивает точку, расположенную на его поверхности.

В результате оказывается, что закон всемирного тяготения Ньютона с его математическим аппаратом неприменим к безграничной Вселенной, для описания которой используется *общая теория относительности* (ОТО). Основы этой теории были заложены в 1916 г. А. Эйнштейном (для частного случая статической Вселенной). В ОТО гравитационный парадокс отсутствует. Появление теории относительности ознаменовало собой начало современного этапа развития космологии. В более общем виде космологические решения были найдены выдающимся советским математиком А.А. Фридманом в 1922 г. Однако позже выяснилось, что ряд важнейших космологических результатов при некотором упрощении можно получить и на основании уравнений механики Ньютона.

В частности из законов Ньютона следует, что если вещество, согласно космологическому принципу, распределено достаточно равномерно и не вращается вокруг какой-либо оси, то такая масса должна *сжиматься* под действием гравитационных взаимодействий между ее частями или *расширяться*, если она обладает достаточным запасом кинетической энергии. Однако под действием тех же гравитационных сил этот процесс расширения со временем должен замедляться.

На основании классических представлений можно также показать, что в однородной изотропной Вселенной справедлив закон Хаббла. Это следует из принципа одинакового относительного увеличения любых расстояний в такой Вселенной при ее расширении.

Рассмотрим теперь сферу произвольного радиуса r с центром в некоторой заданной точке пространства. Внутри такой сферы будет содержаться вещество массой $m = 4\pi r^3 \rho / 3$ (ρ — средняя плотность вещества во Вселенной). В силу изотропии и однородности все точки этой сферы будут удаляться от центра с одина-

ковой скоростью, так что радиус станет увеличиваться со временем пропорционально некоторой функции времени $R(t)$:

$$r(t) = r R(t). \quad (3.37)$$

Функция $R(t)$ (так называемый *масштабный фактор*) характеризует закон изменения со временем расстояния между любыми двумя точками независимо от значения r .

Тогда единичная масса, расположенная на границе рассматриваемой сферы, обладает кинетической $E_1 = v^2/2$ и потенциальной $E_2 = -G \cdot M/r$ энергией. В силу закона сохранения энергии их сумма постоянна:

$$E = \frac{1}{2} v^2 + \left(-\frac{Gm}{r} \right). \quad (3.38)$$

Если полная энергия больше нуля ($E > 0$), то расширение происходит бесконечно, хотя и с постоянным замедлением, а масштабный фактор $R(t)$ всегда возрастает. Наоборот, при $E < 0$ скорость расширения v со временем снижается до нуля, после чего расширение сменяется сжатием. В момент, когда $v = 0$, функция $R(t)$ достигает максимума, а затем убывает. И наконец, если $E = 0$, то расширение происходит неограниченно, но со скоростью, которая стремится к нулю. Очевидно, что скорость расширения в этом случае должна быть *параболической*: $v_p = \sqrt{\frac{2Gm}{r}}$. Подставляя

в эту формулу значение v из закона Хаббла ($v = r \cdot H_0$) и учитывая закон сохранения энергии при $E = 0$, получаем соответствующее выражение для средней плотности вещества во Вселенной:

$$\rho_0 = \frac{3H_0^2}{8\pi G}. \quad (3.39)$$

Значение ρ_0 не зависит от выбранного радиуса сферы r , т.е. полученный результат справедлив для любых масштабов. Значение плотности, соответствующее нулевой полной энергии, называют *критическим*. При средней плотности во Вселенной, которая больше или меньше критической, происходит соответственно ограниченное или неограниченное расширение Вселенной.

Принимая, согласно современным оценкам, $H_0 = 75$ км/(с·Мпк), получаем, что в настоящее время критическое значение плотности во Вселенной — около 10^{-29} г/см³. Оценка масс светящегося и несветящегося вещества галактик и скоплений галактик позволяет определить среднюю плотность порядка 10^{-30} г/см³, т.е. меньше критической. Однако на основании данных последних наблюдений далеких галактик и реликтового излучения получен вывод о том, что средняя плотность Вселенной близка к критической, но при этом 60–70 % приходится на плотность энергии вакуума («темная энергия»).

Интересен вопрос о физическом смысле постоянной Хаббла. Она имеет размерность частоты, т.е. обратная ей величина соответствует времени: $t = 1/H_0 \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ с} = 13 \cdot 10^9 \text{ лет}$. Таким образом, мы получили время, необходимое для расширения Метагалактики до современного ее состояния, при условии, что скорость расширения была постоянной. Это время согласуется с возрастом большинства галактик и старейших звезд нашей Галактики, т.е. большинство галактик образовалось на достаточно ранних стадиях расширения Вселенной, по-видимому, в первый миллиард лет, когда средняя плотность вещества была значительно выше, чем в наши дни.

Современная релятивистская космология, которая началась с работ А.А. Фридмана, учитывает влияние больших масс на свойства пространства — времени (это выражается, например, в искривлении хода светового луча вблизи звезд). Суммарное действие гравитирующих масс может вызвать определенную кривизну пространства в целом, что значительно повлияет на его свойства, а следовательно, и на эволюцию всей Вселенной. На геометрические свойства пространства оказывает влияние и его расширение.

А.А. Фридман показал, что однородная изотропная Вселенная не может находиться в равновесном состоянии. Она должна быть нестационарной, т.е. испытывать либо расширение, либо сжатие. Соответственно и средняя плотность должна изменяться со временем. Значение критической плотности, получаемое в релятивистской космологии, в общем случае совпадает с «классическим» [формула (3.39)].

При средней плотности, которая равна критической, скорость расширения стремится к нулю, кривизна пространства равна нулю, и в среднем оно обладает евклидовой геометрией. В остальных случаях геометрия пространства является неевклидовой. При плотности, которая меньше критической, кривизна отрицательна, а если плотность больше критической, то положительна. Соответственно в первом случае Вселенная всегда расширяется, во втором — расширение в некоторый момент должно смениться сжатием.

В последнем случае в силу неевклидовости геометрии пространство *должно быть конечным*, т.е. в любой момент времени оно должно иметь определенный конечный объем и конечную массу. Однако границ в нашем понимании у Вселенной нет. Двумерной моделью, которая в какой-то мере может описать такое замкнутое трехмерное пространство, является поверхность раздуваемого воздушного шара. Галактики в такой модели представляют собой плоские фигуры на поверхности шара.

В 1965 г. было сделано очень важное открытие, подтвердившее правильность предположения об изотропии и однородности Вселенной. Обнаружено *фоновое радиополучение* с интенсивностью, одинаковой во всех направлениях. По распределению энергии по длинам волн оно оказалось тепловым и соответствовало температуре 2,73 К. При такой температуре максимум излучения приходится на $\lambda = 1 \text{ мм}$. Поскольку во Вселенной неизвестны объекты, которые обладали бы таким характерным излучением, оно отождествлено с излучением, сохранившимся с тех вре-

мен, когда плотность вещества Вселенной была очень велика, а среда была еще непрозрачной (*реликтовое излучение*). Со временем в результате расширения вещество охладилось, из ионизованного оно стало нейтральным и прозрачным. Среда больше не поглощала излучение, оно оторвалось от вещества и, распространяясь во всех направлениях, сохранилось до нашего времени.

Расчет показывает, что вещество должно было стать прозрачным, когда его плотность снизилась до 10^{-20} г/см³. Поскольку реликтовое излучение также испытывало красное смещение при расширении Вселенной, то несложный подсчет показывает, что фотоны реликтового излучения, имеющие сейчас длину волны 1 мм, прежде имели длину 1 мкм, что соответствует максимуму излучения по закону Планка при температуре 3000–4000 К.

Таким образом, существование реликтового излучения свидетельствует не только о большой плотности Вселенной в прошлом, но и о ее высокой температуре. В связи с этим современная модель Вселенной, которая описывает ее состояние и эволюцию, называется «горячей» моделью.

О еще более плотных состояниях Вселенной, сопровождавшихся значительно более высокими температурами, можно было бы судить на основании аналогичного излучения *реликтовых нейтрино*. Для них Вселенная была непрозрачной при плотности $\rho \geq 10^7$ г/см³, т.е. на очень ранних этапах ее расширения. Когда плотность стала меньше этого значения, нейтрино, как затем и реликтовое излучение, перестали взаимодействовать с веществом, оторвались от него и в дальнейшем претерпели только космологическое красное смещение, обусловленное расширением. Такие реликтовые нейтрино должны обладать в настоящее время энергиями порядка нескольких десятитысячных долей электрон-вольта и соответствовать температуре около 2 К. Регистрировать их, к сожалению, пока невозможно.

Рассмотрим основные особенности модели горячей расширяющейся однородной изотропной Вселенной, которые относятся к наиболее ранним этапам ее эволюции (табл. 3.9).

Экстраполируя назад во времени (более 10 млрд лет назад) закон изменения плотности и температуры, можно указать момент, когда Вселенная начала расширяться из особого сверхплотного состояния, которое принято называть *сингулярностью*. Начало этого расширения обычно называют *Большим взрывом*. Теоретически давление и плотность в этот момент стремятся к бесконечности. Все известные на сегодняшний день законы физики не могут быть применены для таких условий. Они не описывают состояние вещества вблизи самой сингулярности. Даже релятивистская общая теория относительности при значениях, превышающих 10^{93} г/см³, неприменима, поскольку не учитывает квантовые эффекты.

В эпоху 10^{-43} – 10^{-36} с после Большого взрыва, когда температура превышала 10^{28} К, Вселенная, как полагают, находилась в особой стадии расширения, которую обычно называют *инфляционной*. Расширение пространства происходило с ускорением, а энергия в единице объема оставалась постоянной. Такое состояние

вещества возможно только при условии *отрицательного давления* (как, например, при растяжении твердого тела внешними силами). Оно объясняется особыми свойствами вакуума на этой стадии. Интересно, что в подобных условиях гравитация должна была приводить не к притяжению, а к взаимному отталкиванию частиц.

Таблица 3.9

Основные этапы эволюции Вселенной

Эра	Время от момента Большого взрыва	Этап эволюции	Температура, К	Плотность, г/см ³
Планковская	$<10^{-43}$ с	Пока неизвестные законы физики, квантовые свойства пространства—времени	?	?
Адронная	10^{-43} с	Граница применимости релятивистской теории тяготения	10^{32}	10^{94}
	10^{-35} с	Возникновение зарядовой асимметрии	10^{28}	10^{78}
	10^{-5} с	Аннигиляция нуклонов и антинуклонов	$3 \cdot 10^{12}$	10^{16}
Лептонная	10^{-4} с	Граница применимости экспериментально проверенных законов физики	10^{12}	10^{14}
	10^{-3} с	Аннигиляция мезонов	$3 \cdot 10^{11}$	10^{12}
	0,2 с	Образование реликтовых нейтрино	$2 \cdot 10^{10}$	10^7
Излучения	10 с	Аннигиляция электронов и позитронов	10^{10}	10^4
	100 с	Образование первичного гелия	10^8	10^2
Вещества	10^6 лет	Отрыв реликтового излучения от вещества	$4 \cdot 10^3$	10^{-20}
	10^9 лет	Начало возникновения звезд и галактик	30	10^{-26}
	$1-2 \cdot 10^{10}$ лет	Современная эпоха	2,7	$10^{-29}-10^{-30}$

После этого начался процесс появления элементарных частиц и их непрерывного взаимопревращения при столкновениях. Вначале возникало одинаковое ко-

личество частиц и соответствующих им античастиц. Они аннигилировали и вновь появлялись при столкновениях гамма-квантов. Со снижением температуры массы возникающих частиц также уменьшались, пока не стали появляться менее массивные частицы — нуклоны (протоны и нейтроны) и антинуклоны, электроны и позитроны, нейтрино и антинейтрино и т.д. Далее в результате небольшой асимметрии свойств частиц и античастиц они «вымирали» не строго одинаково. В результате аннигиляции античастицы практически все исчезли, а малая доля частиц осталась. Таким образом, наблюдаемый мир устроен из вещества, а не из антивещества.

Образование нуклонов завершило *эру адронов* эволюции Вселенной (адроны — частицы, подверженные сильным взаимодействиям: протоны, нейтроны, мезоны и др.). Далее наступила *эра лептонов*, когда среда состояла преимущественно из положительных и отрицательных мюонов, нейтрино и антинейтрино, позитронов и электронов, а нуклоны были относительно редки. По мере дальнейшего расширения Вселенной протекала аннигиляция мюонов, а также электронов и позитронов. Затем прекратилось взаимодействие нейтрино с веществом и к моменту 0,2 с после сингулярности произошел «отрыв» реликтовых нейтрино.

Примерно через 10 с после сингулярности температура достигла значения около 10^{10} К и началась *эра излучения*. На том этапе по численности преобладали фотоны (еще взаимодействовавшие с веществом), а также реликтовые нейтрино. По истечении около 100 с после Большого взрыва начались первые процессы ядрообразования. Часть протонов (около 10 % их общего числа) успела соединиться с нейтронами и образовать ядра гелия. Эра излучения закончилась переходом основной части вещества из ионизованного в нейтральное состояние, уменьшением его непрозрачности и «отрывом» излучения. Через миллион лет после начала расширения наступила *эра вещества*, когда плотность материи стала в основном определяться плотностью вещества, а не излучения. Из горячей водородно-гелиевой плазмы с ничтожной примесью других ядер стало развиваться все многообразие Вселенной.

Весьма принципиальным является вопрос о причинах появления неоднородностей, из которых впоследствии возникли галактики, скопления галактик и другие структурные образования Вселенной. Численные модели показывают, что гравитация может привести к возникновению заметных флуктуаций плотности, из которых впоследствии образовались галактики и их скопления, только при значительном остывании газа — в эпоху вещества, когда ионизованный газ во Вселенной стал в основном нейтральным, а излучение «оторвалось» от вещества.

В процессе образования наиболее крупных структур Вселенной существенную роль могли сыграть частицы, слабо взаимодействовавшие с веществом (типа нейтрино), но имевшие ненулевую массу покоя. Возможно, они образуют то «скрытое» вещество, на долю которого сегодня приходится основная масса Вселенной. Когда (спустя несколько сотен лет после начала расширения Вселенной) скорость таких частиц снизилась до значений, которые гораздо меньше скорости света,

флуктуации их пространственного распределения могли дать начало таким структурным образованиям Вселенной, как скопления и сверхскопления галактик. Сами галактики при этом появляются, конечно, из обычного вещества, а слабо взаимодействующие частицы образуют центры притяжения для гигантских сгущений масс, являясь, таким образом, источником скрытой массы скоплений галактик.

Вопросы и задания для самопроверки

1. В чем принципиальное различие строения планет земной группы и планет-гигантов?
2. Какие планеты исследовались при помощи космических аппаратов (пролетных, орбитальных, посадочных)?
3. Почему максимальная высота гор на Марсе больше, чем на Земле?
4. Происходит ли на Венере, Марсе, Юпитере, Уране смена сезонов?
5. Какие процессы формирования атмосфер вам известны?
6. Чем различаются спектры излучения планет и звезд?
7. Почему спектр излучаемой планетой энергии находится в более длинноволновой области, чем спектр энергии, падающей на нее?
8. Почему средняя температура поверхности Венеры выше, чем у Меркурия, хотя она находится дальше от Солнца?
9. Каков источник внутреннего тепла планет-гигантов?
10. В чем суть парникового эффекта на некоторых планетах?
11. У какой из двух планет выше эффективная температура — у Земли или у Венеры?
12. Есть ли твердая поверхность у Юпитера?
13. В чем заключается сходство и различие атмосфер Земли, Венеры и Марса?
14. Где расположены главный пояс астероидов и пояс Койпера?
15. Есть ли у астероидов спутники?
16. Какой физический параметр положен в основу принятой последовательности спектральных классов звезд?
17. Судя по цвету звезд Бетельгейзе и Ригеля, определите, какая из них горячее?
18. Рассчитайте, во сколько раз изменяется звездная величина Марса от противостояния до соединения.
19. Каков смысл введения абсолютной звездной величины?
20. Почему главная последовательность на диаграмме спектр — светимость является самой «населенной»?
21. Перечислите названия классов светимости.
22. Как с помощью диаграммы спектр — светимость можно определять расстояния до звезд?
23. Какие классы звезд должны описываться законами абсолютно черного тела с наибольшей степенью точности?
24. Какова взаимосвязь между светимостью, массой и радиусом звезд?
25. Почему существуют верхнее и нижнее ограничения для значений масс звезд?
26. Что является источником энергии звезд?
27. Почему не может быть одновременного «горения» водорода и гелия в центральном ядре звезды?

28. Почему более массивные звезды эволюционируют быстрее, чем звезды меньшего размера?
29. Какую роль для звезды играет конвективная зона?
30. Чем различается строение разных типов звезд?
31. Что означают понятия «красный гигант», «белый карлик», «нейтронная звезда» и «черная дыра»?
32. Какова последовательность образования химических элементов в недрах звезд?
33. Как бы вы определили расстояние до другой галактики с помощью обнаруженной там цефеиды?
34. Каковы примерные механизмы вспышки *сверхновой* и *новой* звезд?
35. Рассчитайте гравитационный радиус для Солнца, Земли, человека.
36. Опишите строение нашей Галактики.
37. Сколько примерно оборотов совершило Солнце вокруг центра Галактики за свою «жизнь»?
38. Какие бывают типы галактик?
39. Назовите стадии эволюции протопланетной туманности.
40. Планеты какого типа обнаружены около других звезд?
41. При плотности Вселенной, которая равна критической, масштабный фактор изменяется по закону $R(t) \sim t^{2/3}$. Найдите закон изменения постоянной Хаббла в зависимости от времени.
42. В процессе расширения Вселенной спектр реликтового излучения всегда оставался планковским. Определите на основе закона Вина, сколько лет назад температура реликтового излучения была в 2 раза выше. Используйте информацию из предыдущего вопроса.

Примеры решения задач

Задача 1. Определите изменение блеска планеты от соединения до противостояния Δm , если промежуток времени между двумя событиями $\Delta T = 390$ сут. Считать орбиты планеты и Земли круговыми, лежащими в одной плоскости.

Решение. Поскольку $\Delta T = S/2$ (S — синодический период), то по синодическому уравнению $\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{S}$ определяем сидерический период планеты:

$$T = \frac{2\Delta T \cdot T_{\oplus}}{2\Delta T - T_{\oplus}} = 1,88 \cdot T_{\oplus} = 1,88 \text{ лет.}$$

Из третьего закона Кеплера находим большую

полуось орбиты планеты: $a = T^{2/3} = 1,52 \text{ а.е.}$ (Полученные значения свидетельствуют о том, что речь в задаче идет о Марсе.) Теперь по формуле Погсона рассчитаем, как изменяется блеск планеты:

$$\lg \frac{E_{\text{соед}}}{E_{\text{оп}}} = 0,4\Delta m \Rightarrow \lg \left(\frac{a - a_{\oplus}}{a + a_{\oplus}} \right)^2 = 0,4\Delta m \Rightarrow \Delta m = 5 \cdot \lg \frac{0,52}{2,52} = -3,4.$$

Задача 2. При наблюдении спектральной линии $\lambda_0 = 0,59$ мкм в направлениях на противоположные края солнечного диска на его экваторе обнаружили, что длина волн различается на $\delta\lambda = 8,0$ пм. Определите период вращения Солнца вокруг собственной оси.

Решение. Из формулы (3.36) величины сдвига длины волны для удаляющегося и приближающегося края Солнца можно записать:

$$\begin{cases} \lambda_1 - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{v}{c} \\ \lambda_2 - \lambda_0 = -\lambda_0 \frac{v}{c} \end{cases} \Rightarrow \delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = 2\lambda_0 \frac{v}{c}.$$

Теперь выразим период вращения Солнца через различие в длинах волн:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{4\pi R \cdot \lambda_0}{c \cdot \delta\lambda}.$$

Полагая радиус Солнца $R = 6,96 \cdot 10^8$ м, получаем $T = 2,15 \cdot 10^6$ с = 24,9 сут.

Задачи для самостоятельного решения

1. Из вещества планеты Земля ($R_{\oplus} = 6371$ км) сделана «провода» длиной от Земли до Солнца ($r = 1,496 \cdot 10^8$ км); α Сеп ($r = 1,34$ пк); туманности Андромеды ($r = 0,7$ Мпк). Каков примерно диаметр каждой проволоки?

2. Сколько звезд в нашей Галактике и сколько галактик в видимой части Вселенной приходится на одного человека?

3. Чего больше — звезд в Галактике или комаров на Земле?

4. Звезд в Галактике больше, чем деревьев в сибирской тайге или нет?

5. Чего больше — звезд в видимой части Вселенной или атомов в капле воды?

6. Кулонова сила притяжения электрона к протону в атоме водорода больше, чем ньютонова сила гравитационного притяжения двух космонавтов, обменивающихся рукопожатием в открытом космосе, или нет?

7. * Почему ночью темно?

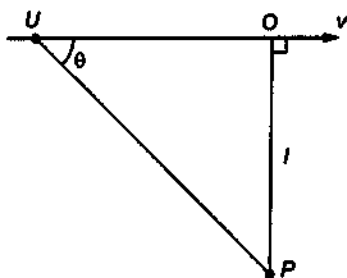
8. На какую высоту выбрасывается вещество из вулканов спутника Юпитера Ио, если скорость его выброса 1 км/с? Масса Ио равна $8,94 \cdot 10^{22}$ кг, диаметр — 3630 км.

9. На экваторе некоторой планеты тела весят вдвое меньше, чем на полюсе. Средняя плотность вещества планеты $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³. Определите период вращения планеты вокруг собственной оси.

10. Найдите зависимость веса тела от географической широты. Считайте, что угловая скорость вращения и физические параметры Земли известны.

11. Некоторый источник U , испускающий электромагнитные сигналы с собственной частотой $\omega_0 = 3,0 \cdot 10^{10}$ рад/с, движется в Солнечной системе с постоянной

скоростью $v = 0,8c$ по прямой, которая находится от наблюдателя P на Земле (его можно считать неподвижным) на расстоянии l (см. рисунок). Какой будет частота сигналов, воспринимаемых наблюдателем в момент, когда: 1) источник окажется в точке O ; 2) наблюдатель увидит его в точке O ?



12. Сколько звезд нулевой величины могут заменить свет, испускаемый всеми звездами от 10-й до 11-й величины, если их число равно 546 000? Среднюю звездную величину звезд от 10-й до 11-й звездной величины принять равной 10,5.

13. На северном небе 2000 звезд 6-й величины. Во сколько раз их общий свет сильнее света Сириуса, блеск которого $-1^m,46$?

14. В спектре новой звезды 1934 г. в Геркулесе темные линии сместились относительно нормального положения к фиолетовому концу. Линия H_γ ($\lambda = 434,1$ нм) сместилась на $\Delta\lambda = 1,01$ нм. Какова скорость газа, выброшенного из звезды и вызвавшего своим поглощением появление в спектре темных линий?

15. * Считая массы обеих составляющих двойной звезды одинаковыми, вычислите расстояние между ними и их массы, если максимальное расщепление спектральных линий $(\Delta\lambda)_{\max} = 1,2 \cdot 10^{-4}$, причем оно возникает через каждые $\tau = 30$ сут.

16. В газовом облаке, которое окружает горячую звезду, наблюдаются мощные потоки атомарного водорода. Одна из спектральных линий атомарного водорода имеет длину волны $\lambda_0 = 656,3$ нм. Определите доплеровское смещение этой линии $\Delta\lambda$, если наблюдать ее под прямым углом к направлению потока атомов водорода с кинетической энергией $T = 1,0$ МэВ.

17. Определите суммарную звездную величину двойной звезды, состоящей из компонентов 2-й и 4-й звездных величин.

18. Толиман (α Центавра) — двойная звезда, суммарная звездная величина которой $0^m,06$. Звездная величина более яркого компонента $0^m,32$. Какова звездная величина менее яркого компонента?

19. Сириус — самая яркая звезда неба, которая создает на Земле освещенность $9 \cdot 10^{-6}$ лк, а звезда 6-й величины — $8 \cdot 10^{-9}$ лк. Какова звездная величина 1 кд на расстоянии 1 км и 1 м?

20. Рассчитайте световую энергию, которая падает на планету за период ее обращения вокруг Солнца (по вытянутому эллипсу), если световая мощность Солнца P ,

площадь сечения планеты S , а в момент, когда планета находится на минимальном расстоянии r_0 от Солнца, ее скорость v_0 .

21. Звездная величина Солнца при наблюдении с Земли $-26^m,7$. Какова звездная величина Солнца, видимого с Нептуна? Во сколько раз Солнце с Нептуна кажется ярче, чем Сириус?

22. Найдите приближенный закон, по которому изменяется температура абсолютно черного тела в зависимости от его расстояния (r а.е.) от центра Солнца.

23. Вычислите температуру абсолютно черного шара, находящегося от Солнца на таком же расстоянии, что и Меркурий, если солнечная постоянная для Земли 1360 Вт/м^2 .

24. Определите освещенность поверхности Меркурия в «подсолнечной» точке. Считать, что яркость Солнца равна $B = 1,5 \cdot 10^9 \text{ кд/м}^2$ и не зависит от направления излучения.

25. Выведите формулу, которая выражает звездную величину внешней планеты m при расстоянии ее от Солнца r и от Земли ρ , зная, что при среднем противостоянии, когда $r_0 = a$ и $\rho_0 = a-1$ (a — большая полуось ее орбиты в астрономических единицах), видимая звездная величина планеты равна m_0 .

26. Во время великого противостояния в 1924 г. видимая звездная величина Марса была $-2^m,8$. Его расстояние от Солнца было $r = 207$ млн км, а от Земли — $\rho = 56$ млн км. Какова будет звездная величина Марса во время наименее близкого противостояния, если расстояние от Солнца $r' = 249$ млн км, а от Земли — $\rho' = 100$ млн км?

27. Молекулы циана (CN) выделяются с поверхности кометного ядра при температуре 200°C под действием солнечных лучей. Покинут ли они ядро кометы, если оно представляет собой глыбу диаметром $2R = 100$ м, имеющую плотность $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$?

28. Как должна измениться температура поверхности Солнца, чтобы солнечная постоянная изменилась на 1 %?

29. По теории Гельмгольца энергия солнечного излучения может поддерживаться за счет сжатия солнечного шара со скоростью 35 м в год. Когда при такой скорости сжатия Солнца его видимый угловой радиус уменьшился бы на величину $0'',1$, которую можно измерить современными приборами?

30. * Чему равна работа сил тяготения, которая получилась бы при сжатии Солнца от бесконечно больших размеров до современного значения его радиуса?

31. * Однородный шар имеет массу M и радиус R . Определите давление P внутри шара, обусловленное гравитационным сжатием, как функцию расстояния r от его центра. Вычислите P в центре Земли, считая, что она является однородным шаром.

32. Получите формулу, которая выражает угловой видимый диаметр звезды D (в секундах дуги) через параллакс звезды π и ее радиус R (в радиусах Солнца).

33. * Чему равна температура поверхности Луны в «подсолнечной» точке?

34. * Допустим, что вокруг звезды с температурой T и средней плотностью $\bar{\rho}$ движется планета. У нее нет атмосферы, она обращена к звезде одной стороной и имеет такое же альbedo A , что и Луна (0,07). Чему равен период обращения этой планеты по орбите, если температура на ее поверхности такая же, как на Луне? Как зависит температура на диске планеты от зенитного расстояния звезды? Считается, что и звезда и планета излучают, как абсолютно черное тело.

35. * Земная атмосфера имеет оптическую толщину по нормали $\tau \sim 0,2$ (на длине волны $\lambda \sim 500$ нм). Что было бы, если бы масса атмосферы увеличилась в 5 раз? Каким увидели бы безоблачное небо земляне в полдень и в полночь? А если бы масса атмосферы уменьшилась в 5 раз?

36. При плавном увеличении массы атмосферы от нуля небо днем было бы сначала черным, затем черно-синим, становилось бы все более ярким, потом менее ярким, наконец наступила бы тьма. При какой оптической толщине достигается максимум яркости неба?

37. * Солнце встает над морем. Один человек любуется восходом с палубы корабля, другой — с вершины горы высотой 4 км на расположенном в океане вулканическом острове (скажем, с обсерватории Мауна-Кеа на Гавайях). Для какого наблюдателя диск Солнца будет ярче и во сколько раз? Считать атмосферу Земли однородным шаровым слоем, соответствующим размерам тропосферы (~ 8 км). Оптическую толщину слоя τ на длине волны $\lambda \sim 550$ нм принять равной 0,1.

38. * Какой будет освещенность от ночного неба на дне фабричной трубы диаметром $D = 1$ м и высотой $H = 30$ м? Во сколько раз она изменится при прохождении в зените звезды Вега (α Лиры) с $m = 0^m,14$? Яркость ночного неба $B = 2 \cdot 10^{-4}$ кд/м². Согласно гарвардской системе звездных величин звездная величина светила, дающего освещенность 1 лк у поверхности Земли, равна $-13^m,89$.

39. Будет ли видна невооруженным глазом Луна с поверхности Меркурия в момент нижнего соединения Земли и Меркурия? Принять расстояние Меркурия от Солнца 0,4 а.е., а Луны от Земли — 400 000 км. Видимая звездная величина Луны для наблюдателя на Земле $m = -12^m,5$. Разрешит ли глаз наблюдателя отдельно Луну и Землю в этом случае?

40. Оцените фотонный поток (число фотонов/(м²·с)), приходящий: от Солнца; α Сеп; от звезды 25^m. Поток от источника нулевой звездной величины составляет примерно 10^{10} фотонов/(м²·с).

41. Определите радиус Антареса, зная, что его температура $T = 3100$ К, абсолютная звездная величина $M_v = -2,7$.

42. Блеск Солнца и звезды (по зрительному ощущению) различается в 10^{16} раз. Звезда находится на расстоянии 100 пк. Какова ее абсолютная величина?

43. Какое светило — Солнце или Золотая Рыба ($M_{\text{З.Рыб}} = -9^m,4$) обладает большей светимостью и во сколько раз?

44. Выразите светимость компонентов двойной звезды Крюгер 60 по сравнению с Солнцем, зная, что их абсолютные величины $11^m,6$ и $13^m,4$, абсолютная величина Солнца $4^m,85$.

45. Определите абсолютные величины компонентов звезды Крюгер 60, зная, что их видимые величины равны $9^m,6$ и $11^m,4$, а параллакс $\pi = 0'',257$.

46. Видимая звездная величина звезды $m_v = 5^m,0$, она находится на расстоянии 17 пк. Во сколько раз светимость звезды отличается от светимости Солнца?

47. Видимая звездная величина звезды $m_v = 20^m$. Будет ли она видна невооруженным глазом, если ее приблизить к нам в 10^4 раз?

48. Вычислите, во сколько раз Ригель ярче Солнца, зная, что его параллакс $\pi = 0'',003$, а $m_v = 0^m,13$.

49. Звездная величина Веги равна $+0^m,1$. Какова была бы звездная величина этой звезды, если бы она удалилась от нас на расстояние, которое в 1000 раз больше? Можно ли было тогда увидеть Вегу невооруженным глазом?

50. Во сколько раз по яркости отличается от Солнца звезда Проксима Центавра, для которой $\pi = 0'',762$, а $m_v = +11^m,05$?

51. Блеск двух звезд (по зрительному ощущению) различается в 10^2 раз. Если их абсолютные величины одинаковы, то как различаются их расстояния до нас?

52. Определите эффективную температуру Альдебарана и вычислите его видимую звездную величину, зная, что для этой звезды $\pi = 0'',057$, $M_v = -0^m,1$, радиус ее равняется 62 радиусам Солнца.

53. Определите радиус Альдебарана и вычислите расстояние до него, зная, что для этой звезды $\pi = 0'',057$; $M_v = -0^m,1$; $T = 3300$ К.

54. Абсолютная звездная величина звезды $M = 2^m,0$. На каком расстоянии она будет восприниматься как звезда с $m = +1^m,0$? Эта звезда ярче Солнца или наоборот?

55. Будет ли видна звезда невооруженным глазом, если ее $M_v = 0^m$, а расстояние 12,2 пк?

56. * Сравните освещенность земной поверхности от полной Луны и от Солнца 22 декабря ($m_\odot = -26^m,8$, $m_\zeta = -12^m,7$). Широта местности $\varphi = 53^\circ,5$. Считать, что восходящий узел орбиты Луны совпадает с точкой весеннего равноденствия.

57. * Суммарная яркость тройной звезды соответствует визуальной звездной величине $m_0 = 1^m$. Определите видимые звездные величины всех компонентов, если у первых двух они одинаковы, а у третьего звездная величина $m_3 = 3^m,5$.

58. * Определите, через какое время звезда 16-й звездной величины станет видна невооруженным глазом при приближении к Солнечной системе (тангенциальная скорость звезды равна нулю), если полосы поглощения линий водорода H_α в ее атмосфере смещены в фиолетовую область на $\Delta\lambda = 0,14$ нм ($\lambda_{H_\alpha} = 422,6$ нм). Расстояние до звезды в начальный момент времени $r = 12$ пк.

59. * Исчезнет ли из поля зрения звезда с $m_v = 2^m$, видимая невооруженным глазом, через 10^6 лет, если она удаляется от Солнечной системы (тангенциальная скорость звезды равна нулю)? Первоначальное расстояние $r = 10$ пк, а полосы поглощения линий H_α смещены в красную область на $\Delta\lambda = 0,11$ нм ($\lambda_{H_\alpha} = 422,6$ нм).

60. * Двойная звезда имеет блеск каждого из компонентов $m_1 = 2,4^m$, $m_2 = 3^m,96$. Определите суммарную звездную величину.

61. * В 2000 г. американскими астрономами была открыта очередная малая планета из семейства транснептуновых планет «Плутино» («Плутончики»), которая имеет диаметр примерно $D \approx 650$ км, ее расстояние от Солнца в афелии $r_{\text{а}} = 5,6$ млрд км, а в перигелии — $r_{\text{п}} = 2,7$ млрд км. Определите максимальную звездную величину, которую должен иметь Плутино при наблюдениях с Земли (влияние атмосферы не учитывать), при условии, что коэффициент отражения поверхности планеты $A = 0,2$. Для расчетов принять, что солнечная постоянная $Q = 1360$ Вт/м²; энергия, излучаемая с единицы поверхности Солнца, $\epsilon_{\odot} = 6,28 \cdot 10^7$ Вт/м²; радиус Солнца $R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8$ м; астрономическая единица $r_{\odot} = 1,5 \cdot 10^{11}$ м; видимая звездная величина Солнца $m_{\odot} = -26^{\text{м}},8$.

62. * Круговая орбита визуально-двойной звезды с одинаковыми составляющими $m = 7^{\text{м}},3$, каждая одинакового спектра (класс G2V) наклонена к лучу зрения на $\theta = 45^\circ$. Наибольшая наблюдаемая лучевая скорость спутника относительно главной звезды $v_r = 20$ км/с; наибольшее наблюдаемое собственное движение спутника относительно главной звезды $\mu = 0'',05$ в год; период обращения $P = 6$ лет. Определите размеры, параллакс, массу и светимость каждого компонента системы, а также радиус относительной орбиты.

63. * Период обращения двойной звезды $P = 100$ лет. В момент ее максимального удаления расстояние главной звезды от центра масс равнялось $a_1 = 10$ а.е. Определите минимальное расстояние между звездами, если масса главной звезды $M_1 = 5 M_{\odot}$, а масса спутника $M_2 = m_{\odot}$.

64. Сколько времени понадобилось бы воображаемому поезду, который движется без остановок со скоростью 200 км/ч, чтобы добраться до ближайшей звезды — Проксимы Центавра, параллакс которой $\pi = 0'',762$?

65. Параллакс звезды 61 Лебеда равен $0'',37$. Каково расстояние до нее в световых годах?

66. Видимая звездная величина Сириуса равна $-1^{\text{м}},46$, а его спутника — $+8^{\text{м}},67$. Во сколько раз истинный блеск (по зрительному ощущению) Сириуса больше истинного блеска его спутника? Расстояние между этими звездами пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием от Земли до Сириуса.

67. Вычислите абсолютную звездную величину Сириуса, зная, что его параллакс $\pi = 0'',377$, а видимая звездная величина $m = -1^{\text{м}},46$.

68. Определите абсолютную величину Антареса, зная, что его параллакс $\pi = 0'',019$, а видимая звездная величина $m = +0^{\text{м}},91$.

69. Каково в парсеках расстояние до Полярной звезды, если по спектру ее абсолютная величина $M_1 = -5^{\text{м}},59$, а видимая величина $m_1 = +2^{\text{м}},02$. Определите то же для новой звезды в Геркулесе, если ее абсолютная величина, определенная спектрально, $M_2 = -7^{\text{м}},5$, а видимая величина $m_2 = +1^{\text{м}},2$ (в наибольшем блеске).

70. В таблице приведены фотографические m_p и визуальные m_v величины ярких звезд. Расположите их в порядке увеличения интенсивности цвета: белые, желтые, оранжевые, красные.

Фотографические m_p и визуальные m_v величины ярких звезд

Звезды	m_p	m_v	Звезды	m_p	m_v
Спика	0,94	1,21	Арктур	1,36	0,24
Антарес	2,95	1,22	Ригель	0,30	0,34
Альтаир	1,05	0,89	α Центавра	0,63	0,06
Канелла	0,88	0,21	γ Андромеды	3,40	2,28

71. Температуру звезды можно определить, зная ее показатель цвета, по формуле $T = \frac{7200}{CI + 0,64}$. Определите среднюю температуру звезд спектральных классов

B0, A0 и dG0, зная, что их средние показатели цвета соответственно равны $-0,33$; $0,00$; $0,57$.

72. Определите радиус Хадара (β Центавра), если температура звезды $T = 21\,000$ К, абсолютная визуальная звездная величина $M_v = -3,4$.

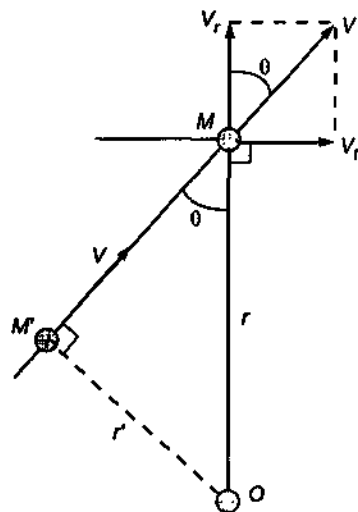
73. Звезда Арктур на 1 см^2 поверхности Земли, перпендикулярный ее лучам, посылает в минуту $64 \cdot 10^{-12}$ калорий. Параллакс звезды $\pi = 0'',08$, а ее радиус в 26 раз больше радиуса Солнца. Определите температуру Арктура.

74. Бетельгейзе посылает на Землю $E = 7,7 \cdot 10^{-11}$ кал/(см 2 · мин). Определите температуру этой звезды, зная, что ее параллакс $\pi = 0'',011$, а угловой диаметр, измеренный интерферометром, $d = 0'',047$.

75. Вычислите среднюю плотность звезды 40 Эрида В по следующим данным: масса звезды составляет 0,44 массы Солнца; $T = 11\,000$ К; $M_v = 11^m,2$.

76. Известны пространственная скорость звезды V , образующая с лучом зрения угол θ (см. рисунок), лучевая V_r и тангенциальная V_t скорости звезды, ее параллакс π , собственное движение μ и видимая величина m . Получите выражения для расчета момента времени t , когда звезда M была (или будет) на минимальном расстоянии от Солнца O в точке M' . Какими будут тогда значения π' , μ' , m' , V_r' и V_t' ?

77. Определите дату наибольшего сближения «летающей звезды Барнарда» с Солнцем, если для нее $m = 9^m,54$; $\mu = 10'',31$; $\pi = 0'',552$; $V_r = -108$ км/с; $V_t = 88,5$ км/с. Определите также значения этих параметров в момент сближения.



78. Вычислите среднюю плотность белого карлика, являющегося спутником другой звезды, по следующим данным: спектры главной звезды и спутника одинаковы; средняя плотность главной звезды $\rho_1 = 0,2 \text{ г/см}^3$. Разность видимых звездных величин главной звезды и спутника 10^m , отношение их масс 2:1.

79. Параллакс визуально-двойной звезды Кастор $\pi = 0'',076$; собственное движение $\mu = 0'',20$ в год; лучевая скорость системы $V_r = +3 \text{ км/с}$; видимая величина компонентов $m_1 = 2^m,0$ и $m_2 = 2^m,8$; большая полуось орбиты $a = 6'',06$; период обращения $P = 306$ лет. Определите большую полуось орбиты в километрах, светимость компонентов по сравнению с Солнцем, относительную орбитальную скорость спутника, суммарную массу двух звезд, отношение их радиусов (температуры обеих звезд одинаковы) и скорость системы в целом.

80. Определите отношение масс компонентов спектрально-двойной звезды β Скорпиона, если полуамплитуды лучевых скоростей главной звезды и спутника соответственно $k_1 = 126$ и $k_2 = 152 \text{ км/с}$.

81. Каков радиус орбиты спектрально-двойной звезды Лакайль 3105? По раздвоению линий в спектре звезды установлено, что относительная скорость компонентов 620 км/с , а период равен $3^d 2^h 46^m$. Орбиту считать круговой, ее плоскость — проходящей через Солнце, а массы обоих компонентов — одинаковыми.

82. Переменная звезда δ Цефея имеет период $P = 5^d,37$ и среднюю видимую звездную величину $m = +3^m,95$. На каком расстоянии от нас в парсеках находится δ Цефея?

83. Если амплитуда изменения блеска цефеиды в болометрических звездных величинах $\Delta m = 2^m,0$ и изменение ее блеска обусловлено пульсацией, то каково изменение ее радиуса? В максимуме блеска температура звезды $T_1 = 9000 \text{ К}$, в минимуме — $T_2 = 7000 \text{ К}$.

84. Определите отношение радиусов r/R слабой и яркой звезд ($r < R$) в системе затменной двойной звезды типа Алголя, если из наблюдений известно, что отношение ее блеска в минимуме к блеску в максимуме равно k . Затмение яркой звезды большего радиуса слабой звездой меньшего радиуса считать центральным; слабую звезду (спутник) при затмении считать совершенно темной.

85. Истинный период изменения блеска затменной переменной звезды $P = 3^d$, лучевая скорость ее $V_r = +30 \text{ км/с}$. Чему равен наблюдаемый непосредственно период этой звезды?

86. В созвездии Геркулеса в 1934 г. вспыхнула новая звезда. Ее блеск в течение суток увеличился на $\Delta m = 5^m$. Расстояние до звезды, измеренное сразу после вспышки, $r_1 = 1800 \text{ св. лет}$. Докажите, что эта вспышка не могла быть вызвана внезапным приближением звезды к Земле.

87. Средний видимый блеск цефеиды в звездном скоплении созвездия Геркулеса $m = 15^m,1$, период ее пульсации — около 11 ч. Определите расстояние до звездного скопления в созвездии Геркулеса.

88. Каково расстояние до галактики, если в ее спектре красное смещение линии H_γ ($\lambda = 434,1$ нм) $\Delta\lambda = 14,5$ нм?

89. Определите расстояние r и линейный диаметр D спиральной галактики в созвездии Треугольника, если ее угловой диаметр $d = 1^\circ$, а период наблюдающихся там цефеид $P = 13^d$ при видимой звездной величине $m = 19^m,6$.

90. В спиральной галактике, отстоящей от нас на $r_1 = 7,5$ млн св. лет, обнаружены две цефеиды, которые имеют одинаковый период, но одна из них находится на ближайшем к нам краю галактики, другая — на $\Delta r = 20\,000$ св. лет дальше. Каково различие видимых величин этих звезд, если считать их абсолютные величины строго одинаковыми?

91. * Квазар 3C 273 (один из самых близких) имеет блеск $m = 12^m,88$, красное смещение $z = 0,158$, угловой диаметр оболочки $d = 1''$. Сравните размеры оболочки квазара с диском Галактики и блеск полной Луны с блеском 3C 273 при его расположении в ядре Галактики.

92. * Вблизи ядра Галактики, по данным радионаблюдений, происходит выброс вещества, который сместился за год на $\varphi = 9''$ от центра. Измерения сдвига спектральных линий фронта выброса позволили отметить фиолетовое смещение $z = 0,5$. Определите скорость выброса вещества в классическом приближении с учетом конечности скорости света.

93. Где светлее — днем на Плутоне или в лунную ночь на Земле?

94. Затменно-двойная система имеет два одинаковых компонента. На сколько звездных величин изменяется блеск системы в момент полного затмения одного компонента другим?

95. В звездном скоплении N звезд, звездная величина каждой из них m . Вычислите суммарную звездную величину скопления.

96. На небе около 6000 звезд ярче 6-й звездной величины. Считая, что у всех звезд одинаковая светимость и они распределены в пространстве равномерно, определите, сколько на небе звезд ярче m -й звездной величины.

97. Европа, один из четырех галилеевых спутников Юпитера, имеет радиус $R_E = 1600$ км. Этот спутник полностью покрыт льдом. Вычислите звездную величину Европы в момент, когда Юпитер находится ближе всего к Земле. Для Юпитера: радиус $R_J = 71\,400$ км, альbedo $A_J = 0,55$, звездная величина в противостоянии $m = -2^m,5$.

98. Как изменяется видимая звездная величина самосветящегося объекта, если расстояние до него изменяется незначительно ($\Delta r/r \ll 1$)?

99. Определите максимальное расстояние, с которого Солнце еще можно видеть невооруженным глазом.

100. Можно ли увидеть в крупнейшие телескопы звезды, подобные Солнцу, в туманности Андромеды ($r \approx 0,7$ Мпк)?

101. Звезды главной последовательности спектрального класса $B0V$ ($T = 30\,000$ К) имеют массу $M \sim 15 \cdot M_\odot$. Воспользовавшись соотношением масса — светимость для звезд главной последовательности, вычислите их среднюю плотность.

102. Как изменится светимость звезды, если ее радиус уменьшится на $\epsilon = 2\%$, а эффективная температура на столько же увеличится?

103. Определите разность абсолютных звездных величин двух звезд одинакового размера, эффективные температуры которых различаются на 10% .

104. Светимость одной из двух одинаковых по размеру звезд на 4% больше, чем другой. Считая, что обе звезды излучают как абсолютно черное тело, найдите, на сколько различаются: а) температуры звезд; б) длины волн, соответствующие максимуму в распределении энергии в спектре; в) интенсивности излучения в максимуме спектра; г) интенсивности излучения на определенной длине волны в области спектра, где справедливо приближение Рэлея — Джинса.

105. Определите толщину алюминиевой фольги от шоколадки, сев на которую в окрестности звезды класса $O5V$, объект малой массы (например, комар) мог бы улететь на ней, как на фотонном парусе, к другим звездам. В момент, когда комар садится на фольгу, она находится в состоянии покоя.

3.2. Астрофизические приборы

Телескопы, используемые в процессе астрономических исследований, созданы на основе оптической схемы, которую разработал Кеплер. Объектив телескопа дает в своем главном фокусе действительное изображение небесных светил, рассматриваемое в окуляр. 1° небесной сферы изображается в фокальной плоскости телескопа отрезком, равным приблизительно $\frac{10}{573}$ фокусного расстояния F объектива

или зеркала. Увеличение, которое дает телескоп, равно отношению фокусного расстояния F объектива или зеркала к фокусному расстоянию окуляра f : $W = \frac{F}{f}$, оптическая длина трубы равна $F + f$.

Разрешающая сила (угловое разрешение) $\Delta\varphi$ телескопа характеризуется предельным угловым расстоянием между двумя звездами, которые видны в этот телескоп, не вполне сливаясь друг с другом. Теоретическое угловое разрешение определяется явлением дифракции электромагнитного излучения на объективе телескопа диаметром D : $\Delta\varphi \approx \frac{\lambda}{D}$ (λ — рабочая длина волны). В практических

расчетах можно использовать формулу $\Delta\varphi \approx \frac{11,6}{D}$, где D — диаметр объектива в сантиметрах, результат — в угловых секундах, для длиннофокусных объективов с соотношением диаметра и фокусного расстояния $\frac{D}{F} < \frac{1}{12}$. Для других видов

объективов можно воспользоваться формулой $\Delta\varphi \approx \frac{13,8}{D}$.

Проницающая сила телескопа характеризуется предельной величиной звезд, еще видимых в телескоп в совершенно ясную темную ночь. Она приближенно выражается формулой $m \approx 7,5 + 5 \cdot \lg D$, где D выражено в сантиметрах.

Объектив телескопа характеризуется также *светосилой* (*относительным отверстием*), т.е. отношением $A = \frac{D}{F}$, которое принято выражать дробью с двоеточием, например, 1:2, 1:7, 1:20 и т.п.

Спектральные приборы, используемые в астрономии, характеризуются в основном *спектральной разрешающей силой* $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ ($\Delta\lambda$ — минимальный интервал между двумя близкими спектральными линиями со средней длиной волны λ ,

которые еще регистрируются как отдельные). Другой важной характеристикой спектральных аппаратов является *угловая дисперсия* $C = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda}$ ($\Delta\alpha$ — угол между лучами света, прошедшими диспергирующий элемент и различающимися по длине волны на $\Delta\lambda$). Величина $C' = f \cdot \frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda}$ (f — фокусное расстояние оптической системы, находящейся за диспергирующим элементом) называется *линейной дисперсией*.

Список крупнейших телескопов мира, а также наиболее интересных проектов с их использованием приведен в приложении.

Список крупнейших телескопов мира, а также наиболее интересных проектов с их использованием приведен в приложении.

Вопросы и задания для самопроверки

1. В чем заключается принцип построения телескопа Кеплера? Какие еще бывают схемы телескопов?
2. Каков физический смысл разрешающей силы телескопа?
3. Может ли телескоп одновременно иметь большие светосилу и увеличение?
4. Почему оптические телескопы уступают преимущественно в высокогорной местности?
5. Под какими широтами находятся обсерватории, которые могут измерять абсолютные координаты звезд?

Примеры решения задач

Задача 1. Определите линейный диаметр Луны по данным фотосъемки телескопом с $F = 1$ м, если на негативе диаметр диска Луны имеет размер $d = 9,57$ мм при съемке на минимальном расстоянии до Луны. Среднее расстояние до Луны $a = 384\,400$ км и $e = 0,0549$. Оцените в процентах, как максимально изменятся размеры изображения диска в разных точках орбиты.

Решение. При малых угловых размерах Луны справедливы выражения

$$\frac{D_{\epsilon}}{r_q} = \frac{d}{F} \quad \text{или} \quad D_{\epsilon} = \frac{r_q \cdot d}{F},$$

где D_{ϵ} — искомый диаметр Луны; r_q — расстояние до Луны в перигее, которое определяем по формуле

$$r_q = a(1 - e) = 384\,400(1 - 0,0549) = 384\,400 \cdot 0,9451 = 363\,296 \text{ км.}$$

В итоге получаем

$$D_{\epsilon} = \frac{363\,296 \cdot 9,57}{1000} = 3475 \text{ км.}$$

Для оценки максимального различия диаметров диска на пегативе найдем отношение диаметров по формуле для перигея и апогея:

$$\frac{r_q}{r_Q} = \frac{d_Q}{d_q} = \frac{1-e}{1+e} = \frac{0,9451}{1,0549} \approx 0,896.$$

Следовательно,

$$\frac{d_q - d_Q}{d_q} = \left(1 - \frac{d_Q}{d_q}\right) \cdot 100\% \approx 10,4\%.$$

Задача 2. Вогнутое зеркало в телескопе Ньютона имеет фокусное расстояние $F = 60$ см. Удаленность предмета наблюдения $a_1 = 500$ м. Определите: 1) в какой точке оси трубы нужно расположить малое плоское зеркало, чтобы изображение находилось на расстоянии $c = 15$ см от оси; 2) каково получаемое уменьшение; 3) каким будет увеличение, если рассматривать малое изображение в лупу с фокусным расстоянием $f = 3$ см при расстоянии наилучшего зрения $S = 24$ см.

Решение. 1. Запишем формулу зеркала: $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{F}$ (a_1 — расстояние от вершины вогнутого зеркала до предмета; a_2 — расстояние от вершины вогнутого зеркала до изображения; F — фокусное расстояние этого зеркала). Здесь по условию задачи $a_2 = c + l$ (l — расстояние от вершины вогнутого зеркала до плоского зеркала; c — расстояние от плоского зеркала до изображения). Получаем: $a_2 = \frac{F \cdot a_1}{a_1 - F}$; $l = \frac{F \cdot a_1}{a_1 - F} - c = 45,072$ см.

2. Получаемое при этом увеличение (фактически уменьшение):

$$\Gamma = \frac{a_2}{a_1} = \frac{c+l}{a_1} = 0,0012014.$$

3. Запишем формулу тонкой линзы: $-\frac{1}{a'_1} + \frac{1}{a'_2} = \frac{1}{f}$, где a'_1 — расстояние от линзы (лупы) до предмета (предметом здесь является изображение, полученное с помощью зеркала, см. п. 1) этой задачи); a'_2 — расстояние от линзы (лупы) до изображения; f — фокусное расстояние этой лупы. Расстояние до предмета отсчитывается против хода лучей, поэтому $a'_1 < 0$. Так как в подобных системах с использованием лупы изображение является мнимым (и увеличенным), т.е. созданным в том же направлении от лупы, где находится предмет, то и $a'_2 < 0$, т.е. $a'_2 = -S$. Получаем

$$\frac{1}{|a'_1|} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f}; |a'_1| = \frac{S \cdot f}{S + f}.$$

В итоге увеличение в этом случае

$$\Gamma' = \frac{S}{|a'_1|} = \frac{S + f}{f} = 9.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. При наблюдении с 60 мм телескопом за время интегрирования 1 с ПЗС-камера позволяет получить изображение звезды до $8''$. Какие звезды можно регистрировать с использованием такой камеры при наблюдении с 11-дюймовым телескопом и экспозицией 1 мин?

2. Какова разрешающая и проникающая сила телескопа с объективом 75 см?

3. Какое увеличение необходимо, чтобы при наблюдении Юпитер (видимый диаметр $40''$) был такой же величины, как Луна, видимая невооруженным глазом?

4. Если угловой диаметр Луны $\varphi_L = 31'$, то каков будет диаметр ее изображения в фокусе объектива с фокусным расстоянием $F = 254$ см?

5. Диаметр телескопа $D = 1,25$ м, светосила его $A = 1/5$. Каким будет в его фокусе линейный диаметр изображения Марса, если его угловой диаметр $\varphi = 25''$?

6. Звезда пересекла по диаметру поле зрения неподвижного телескопа за t секунд. Чему равно в угловой мере (в дуге большого круга) поле зрения телескопа d , если склонение звезды δ ?

7. Шаг микрометрического винта прибора $h = 0,50$ мм. Какова цена одного оборота винта (в угловой мере), если микрометр укреплен на телескопе с фокусным расстоянием $F = 650$ см?

8. Нити микрометра установлены так, что для телескопа с фокусным расстоянием $F_1 = 150$ см звезда вследствие суточного движения перемещается от одной нити до другой в течение $t_1 = 15$ с. Сколько времени будет длиться это явление при тех же условиях, но для телескопа с фокусным расстоянием $F_2 = 450$ см?

9. В обсерватории имеются два астрографа (экваториально установленные фотографические телескопы). Первый имеет диаметр объектива $D_1 = 16$ см, светоси-

лу $A_1 = 1:4$, второй — $D_2 = 16$ см, $A_2 = 1:20$. Какой астрограф выгоднее использовать для: 1) получения фотографии хвоста кометы; 2) фотографирования лунных гор; 3) «падающих звезд»; 4) солнечных пятен; 5) точного фотографического определения положений звезд в Плеядах; 6) получения фотографии туманности Ориона?

10. В астрономическом спектрографе на флинтгласовую призму с углом преломления $\gamma = 53^\circ$ падает в плоскости главного сечения белый луч под углом падения $\alpha = 40^\circ 30'$. Как отклоняются красные и фиолетовые лучи, если их показатели преломления $n_k = 1,6$; $n_f = 1,64$?

11. Дифракционная решетка в кварцевом астрономическом спектрографе имеет ширину $L = 25$ мм и содержит $n = 250$ штрихов на 1 мм. Фокусное расстояние объектива, в фокальной плоскости которого находится фотопластинка, $F = 80$ см. Свет падает на решетку нормально. Спектр исследуемой газовой туманности, окружающей звезду класса $B0$, содержит спектральную линию, компоненты дублета которой имеют длины волн $\lambda_1 = 310,154$ нм, $\lambda_2 = 310,184$ нм. Определите: 1) расстояния на фотопластинке между компонентами дублета в спектрах первого и второго порядка; 2) будут ли они разрешены в этих порядках спектра.

12. * Вычислите величину фототока, возникающего в фотокатоде чувствительностью 1200 мА/лм, когда в телескоп наблюдают звезду $A0$, величина которой $m = -10^m$. Диаметр объектива телескопа $D = 125$ см. Потери света в телескопе составляют 15 %. Согласно гарвардской системе звездных величин звездная величина светила, дающего освещенность 1 лк у поверхности Земли, равна $-13^m,89$.

13. Какова безопасная скорость движения управляемого с Земли марсохода «Pathfinder», если его телескамера «видит» только на 10 м?

14. Определите самый маленький линейный размер образований на Луне, различимых невооруженным глазом?

15. * За орбитой Нептуна на гелиоцентрических расстояниях 30–50 а.е. находится открытый в 1992 г. пояс Койпера, состоящий из малых тел типа комет и астероидов. К 1998 г. в поясе было обнаружено около 60 объектов. Предполагается, что там имеются десятки тысяч тел крупнее 100 км. Каковы примерно минимальные размеры тел пояса Койпера, которые можно обнаружить с помощью космического телескопа Хаббла, если его проникающая сила $m = 28^m$? Принять альбедо тел пояса Койпера $A = 0,2$.

16. Сколько фотонов падает за 1 с на зеркало самого большого в мире телескопа Кека ($D = 10$ м) с Веги и со звезды 30^m ? Поток от источника нулевой звездной величины составляет примерно 10^{10} фотонов/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$).

17. В телескопе Ньютона радиус кривизны зеркала $R = 1,0$ м, предмет находится на расстоянии $a_1 = 400$ м. Определите расстояние от оси телескопа до изображения, если плоское зеркало удалено на $l = 40$ см от вершины объектива. Каково получаемое уменьшение?

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

1.1. Небесная сфера. Системы небесных координат.

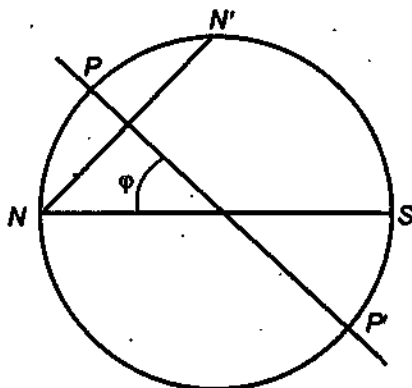
Преобразование координат

1. $32^{\circ}32'15''$. 2. $51^{\circ}02'$. 3. $6^{\text{h}}33^{\text{m}}10^{\text{s}}$. 4. $17^{\text{h}}36^{\text{m}}$. 5. $16^{\text{h}}30^{\text{m}}$. 6. $58^{\circ}35'$. 7. $8^{\text{h}}48^{\text{m}}$. 8. $77^{\circ}30'$. 9. 56° . 10. 18^{h} . 11. $11^{\text{h}}30^{\text{m}}$. 12. $23^{\text{h}}34^{\text{m}}27^{\text{s}}$. 13. $2^{\text{h}}48^{\text{m}}$. 14. $67^{\circ}30'$. 15. $7^{\text{h}}48^{\text{m}}$. 16. $20^{\text{h}}26^{\text{m}}32^{\text{s}}$. 17. $3^{\text{h}}00^{\text{m}}$. 18. $-30^{\circ}03'$; $-48^{\circ}40'$. 19. $-16^{\circ}36'$. 20. $273^{\circ}15'$. 21. $15^{\text{h}}30^{\text{m}}$. 22. $16^{\text{h}}05^{\text{m}}37^{\text{s}}$; 13; $1^{\text{h}}54^{\text{m}}46^{\text{s}}$. 23. $\varphi = \delta = 83^{\circ}17'$. 24. Когда наблюдатель находится на одном из полюсов Земли или светило находится в полюсе мира. 25. $57^{\circ}42'$; $10^{\circ}48'$. 26. Это возможно, если зенитный угол полюса мира равен углу между осью мира и осью эклиптики $z_p = 90^{\circ} - \varphi = \varepsilon = 23^{\circ}26'$, т.е. для полярных кругов $|\varphi| = 66^{\circ}34'$ в тот момент, когда точка Υ восходит для северного полушария Земли и заходит для южного. 27. $11^{\circ}33'$; $58^{\circ}27'$; 0° ; $46^{\circ}54'$. 28. $\beta = 66^{\circ}34'$; $\lambda = 90^{\circ}$. 29. $\alpha = 18^{\text{h}}$; $\delta = 66^{\circ}34'$. 30. В обоих случаях Сириус будет находиться на юго-юго-западе под часовым углом $t = +19^{\text{m}}$; по карте звездного неба (см. п. 1.3) можно определить азимут $A \approx 4^{\circ}$ и высоту $h \approx 18^{\circ}$. 31. Звезда будет в зените. 32. Вега находится в западной стороне под часовым углом $t = 5^{\text{h}}26^{\text{m}}$, Капелла — в восточной стороне под $t = 18^{\text{h}}50^{\text{m}}$; Вега находится в восточной стороне под $t = 17^{\text{h}}26^{\text{m}}$, Капелла — в западной стороне под часовым углом $t = 6^{\text{h}}50^{\text{m}}$. 33. $1^{\text{h}}24^{\text{m}}$. 34. Используя формулу $\cos(z) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t)$, находим $\cos(t) = 0,461$ и $t = 4^{\text{h}}10^{\text{m}}10^{\text{s}}$. 35. Если наблюдатель находится на земном экваторе, а звезда — на небесном экваторе. 36. У светил, которые кульминируют к северу от зенита, т.е. с $\delta > \varphi$, а для Минска $\delta > 54^{\circ}$. 37. 47° . 38. $17^{\circ}03'$. 39. Нет, так как у него $|\delta| > (90^{\circ} - |\varphi|)$. 40. Южный Крест начинает появляться с северной широты $\varphi = 35^{\circ}$, а виден полностью при $\varphi \leq 26^{\circ}$. 41. $35^{\circ}25'$. 42. $24^{\circ}02'$. 43. $54^{\circ}12'$. 44. $\alpha = 19^{\text{h}}09^{\text{m}}13^{\text{s}}$; $\delta = 18^{\circ}18'00''$. 45. В Беларуси Солнце всегда кульминирует к югу от зенита. Можно воспользоваться формулой для высоты светила в верхней кульминации: $h = 90^{\circ} - \varphi + \delta$ (φ — широта места; δ — склонение светила). Учтем также, что склонение Солнца в течение года изменяется в пределах $-\varepsilon \leq \delta_{\odot} \leq +\varepsilon$, где $\varepsilon = 23^{\circ}26' = 23^{\circ},45$ — наклон эклиптики к экватору. Следовательно, $66^{\circ},55 - \varphi \leq h_{\odot} \leq 113^{\circ},45 - \varphi$. Например, в Минске ($\varphi \approx 54^{\circ}$) $12^{\circ},55 \leq h_{\odot} \leq 59^{\circ},45$. Попробуйте самостоятельно определить, в какие дни достигаются эти пределы. 46. У незаходящих светил высота нижней кульминации $h = \varphi + \delta - 90^{\circ} > 0$, т.е. это звезды со склонениями $\delta > 90^{\circ} - \varphi$. На представленном ниже рисунке показана проекция небесной сферы на плоскость небесного меридиана. Незаходящие звезды заполняют сегмент NPN' . Площадь этого сегмента

$2\pi(1 - \cos \varphi) = 4\pi \sin^2 \frac{\varphi}{2}$, площадь небесной сферы 4π . Доля незаходящих звезд рав-

на отношению этих площадей, т.е. $\sin^2 \frac{\varphi}{2}$. Частные случаи: на полюсе ($\varphi = 90^\circ$) по-

ловины звезд никогда не заходит; на экваторе ($\varphi = 0^\circ$) все звезды восходят и заходят; в Петербурге ($\varphi \approx 60^\circ$) доля незаходящих звезд равна $\sim 25\%$; в Минске ($\varphi \approx 54^\circ$) доля незаходящих звезд равна $\sim 20\%$.



Проекция небесной сферы на плоскость небесного меридиана на широте φ

47. Звезда в зените $\Rightarrow \varphi = \delta$; в нижней кульминации $\varphi = 90^\circ - \delta + h$; $\varphi = (90^\circ + h)/2 = 83^\circ 17'$. 48. $\varphi = 34^\circ 47'$; $\varepsilon = 23^\circ 54'$.

1.2. Измерение времени. Системы счета времени

1. $5^h 43^m 30^s$. 2. $z = 13^\circ 02'$; $s = 12^h 10^m 10^s$. 3. $15^h 13^m 32^s$. 4. $6^h 33^m 10^s$. 5. $z = 60^\circ$; $\delta_1 = -4^\circ 15'$, $\alpha_1 = 7^h 35^m 15^s$; $\delta_2 = 64^\circ 15'$, $\alpha_2 = 19^h 35^m 15^s$; $z = 40^\circ$; $\delta_1 = 15^\circ 45'$, $\alpha_1 = 7^h 35^m 15^s$; $\delta_2 = 84^\circ 15'$, $\alpha_2 = 19^h 35^m 15^s$. 6. За 128 и 3300 лет соответственно. 7. $22^h 33^m 48^s$. 8. В $19^h 20^m$. 9. В верхней кульминации будут звезды, у которых $\alpha = 18^h 20^m$, например, α и ε Лиры. 10. Приблизительно 22 августа. 11. С помощью табл. 1.1 определяем звездное время в ближайшую предшествующую полночь 14 ноября: $S = 2^h + 23 \cdot 4^m = 3^h 32^m$. Следовательно, звездное время события $s = \alpha + t = S + T_m \cdot K \approx 23^h 32^m$, а так как во время восхода $t = 18^h$, то $\alpha = 5^h 32^m$. В тот день, когда звезда взойдет в $5^h 30^m$ вечера, звездное время в ближайшую предшествующую полночь будет $S = s - T_m \cdot K \approx 6^h$, что соответствует примерно 22 декабря. 12. $\delta = 46^\circ 35'$; $\alpha = 15^h 15^m 10^s$. 13. По карте звездного неба находим для Солнца на 1 марта: $\alpha_\odot \approx 22^h 47^m$; $\delta_\odot \approx -7^\circ 45',5$; в момент кульминации $h_{\max} = 90^\circ - \varphi + \delta_\odot = 90^\circ - 53^\circ 54' - 7^\circ 45',5 = 28^\circ 20',5$ и $T_\odot = 12^h$,

тогда среднее время $T_m = T_\odot + \eta = 12^h 12^m$. Так как часовой пояс Минска $n = 2$, то по формуле $T_m = T_\Pi + (\lambda - n)$ получаем поясное время $T_\Pi = 12^h 21^m 20^s$. Продолжительность дня можно определить по уравнению для часового угла восхода и захода светила $\cos t = -\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta_\odot$. Получаем $\Delta t = 10^h 33^m 51^s$. 3. 14. Средняя продолжительность календарного лунного года по мусульманскому календарю $Y = (19 \cdot 354 + 11 \cdot 355) / 30 = 354,36667$. Так как средний лунный месяц $29^d, 530588$, то действительная продолжительность лунного года $Y_0 = 354,36705$, ошибка календаря составляет $0,00038$ сут в год, т.е. одни сутки «набегают» примерно за 2590 лет.

15. Для команды судна, курсирующего между Дальним Востоком и Аляской, которое покинуло восточное побережье 1 февраля в воскресенье в високосный год и совершает рейс за одну неделю, будет 10 воскресений в феврале. 16. Средняя продолжительность года по персидскому календарю $Y_\Pi = (365 \cdot 25 + 366 \cdot 8) / 33 = 365,2424$ (продолжительность тропического года $Y_0 = 365,2422$), ошибка — $\Delta Y_\Pi = 0,0002$, т.е. одни сутки «набегают» за 5000 лет; для григорианского календаря получаем $Y_\Gamma = (365 \cdot 303 + 366 \cdot 97) / 400 = 365,2425$ и $\Delta Y_\Gamma = 0,0003$, т.е. одни сутки «набегают» за ~3333 года. 17. Солнечные сутки тогда были бы короче звездных примерно на 4^m (при таких же скоростях вращения и движения вокруг Солнца).

18. Солнечное время отсчитывается от полуночи, поэтому когда в Гринвиче 0^h , там полночь, т.е. Солнце находится в нижней кульминации. В верхней кульминации оно будет в этот момент на противоположной стороне земного шара, так что долгота места наблюдения равна 12^h , или 180° . 19. Период колебаний маятника длиной l определяем по формуле Гюйгенса: $P = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ($g = G \frac{M_\oplus}{R_\oplus^2}$ —

ускорение свободного падения; G — гравитационная постоянная; $M_\oplus$ — масса Земли; $R_\oplus$ — расстояние от центра Земли в точке, где находится маятник). Таким образом, $P = 2\pi \cdot R_\oplus \sqrt{\frac{l}{GM_\oplus}}$. Для малого изменения периода при незначительном изменении радиуса Земли получим: $\Delta P = 2\pi \sqrt{\frac{l}{GM_\oplus}} \cdot R_\oplus \cdot \frac{\Delta R_\oplus}{R_\oplus}$. Отсюда $\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta R_\oplus}{R_\oplus}$.

($\Delta R_\oplus$ — изменение радиуса Земли от экватора к полюсу, т.е. сжатие сфероида $\frac{\Delta R_\oplus}{R_\oplus} \approx \frac{1}{300}$), значит, $\frac{\Delta P}{P} \approx \frac{1}{300}$. За сутки часы на полюсе «уйдут» на $60^m \cdot 24 \cdot \frac{1}{300} \approx 5^m$.

Изменение периода, обусловленное изменением l , равно $\Delta P \approx \frac{dP}{dl} \Delta l$, или $\frac{\Delta P}{P} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta l}{l}$.

Поэтому необходимое для компенсации изменения хода часов изменение длины маятника $\frac{\Delta l}{l} \approx 2 \frac{\Delta P}{P} \approx \frac{1}{150}$. При длине маятника 1,5 м на полюсе его следует удли-

нить на 1 см. 20. Часы «уйдут» на час. Действительно, Земля вращается равномерно. Пусть ω_0 — ее начальная угловая скорость, β — угловое ускорение. ω — угловая скорость в момент t . Тогда $\omega = \omega_0 + \beta \cdot t$. Но $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ (φ — угол пово-

рота Земли). Интегрируя, получаем $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \beta \frac{t^2}{2}$. Если бы Земля вращалась без ускорения, мы имели бы $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t$, так что дополнительный угол $\Delta\varphi = \beta \frac{t^2}{2}$. Осталось вычислить угловое ускорение Земли. За 1 сут продолжи-

тельность суток возрастает на $\frac{0,02 \text{ с}}{365 \cdot 1000 \text{ сут}} = \frac{0,02}{365 \cdot 1000 \cdot 86400} \text{ сут} = 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ сут}$.

Поэтому угловая скорость, которая вначале была равна $\omega_0 = 2\pi \text{ рад/сут}$, через сутки станет $\omega_0 + \Delta\omega = \frac{2\pi}{1 + 6,3 \cdot 10^{-13}} \text{ рад/сут}$. Увеличение угловой скорости за

1 сут $\Delta\omega \approx -2\pi \cdot 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ рад/сут} = -4 \cdot 10^{-12} \text{ рад/сут}$, угловое ускорение $\beta \approx \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = -4 \cdot 10^{-12} \text{ рад/сут}^2$. Отсюда $|\Delta\varphi| \approx 4 \cdot 10^{-12} \frac{(365)^2 10^6}{2} \text{ рад} = 0,266 \text{ рад} \approx 15^\circ \approx 1^h$.

Какие часы при этом отстанут или уйдут вперед — атомные или синхронизированные с вращением Земли? Интересно, что столь малое угловое ускорение ($\beta = -4 \cdot 10^{-12} \text{ рад/сут}^2$) все же удалось обнаружить и измерить в результате анализа древних хроник, содержавших описание солнечных затмений. 21. Следующий раз пять воскресных дней в феврале было в 1948 г., так как повторение соответствия календарных дней года тем же дням недели происходит через $4 \cdot 7 = 28$ лет. При определении предыдущего года следует учесть, что по григорианскому календарю 1900 г. не был високосным. Таким образом, учитывая это, получаем искомый год — 1880. 22. В полдень $T_\odot = 12^h$; $T_m = T_\odot + \eta = 12^h 1^m 20^s$, тогда поясное время $T_n = T_m - (\lambda - 3^h) = 11^h 44^m 51^s$. 23. Поясное время по показаниям часов $T'_n = 1^h 15^m - 1^h = 0^h 15^m$; в момент верхней кульминации звездное время $s = 7^h 36^m$. Рассчитаем среднее солнечное время: $T_m = (s - S) \cdot K' \approx 1^h$, где $S = 6^h + 9 \cdot 4^m = 6^h 36^m$ — звездное время в ближайшую предшествующую среднюю полночь (см. табл. 1.1), а среднее солнечное время по показаниям часов $T'_m = T'_n + (\lambda - 2^h) = 0^h 45^m$. Получаем поправку часов $u = T_m - T'_m = +0^h 15^m$. 24. Кульминация по поясному времени произошла $T_n = (16^h 24^m + 7^h 6^m)/2 = 11^h 45^m$, а по истинному и среднему солнечному — соответственно: $T_\odot = 12^h$; $T_m = T_\odot + \eta = 12^h 14^m$. Тогда $\Delta T = T_n - T_m = -29^m$.

1.3. Подвижная карта звездного неба

1. 2 марта или 13 октября. 2. 12 марта или 3 октября. 3. 16 апреля или 28 августа. 4. Примерно с 1 августа до 15 января. 5. Созвездие Волосы Вероники. 6. Созвездие Цефей; $\alpha = 218^\circ, 4$; $\delta = -83^\circ, 3$. 7. По формуле для высоты светил в кульминации определяем географическую широту местности, на которой Ригель может кульминировать в зените: $h = 90^\circ - \varphi + \delta \Rightarrow \varphi = 90^\circ + \delta - h = 90^\circ - 8^\circ 15' - 90^\circ = -8^\circ 15'$. Следовательно, путешественник находился в южном полушарии. Определяя по Южному Кресту направление на юг, можно найти все стороны света. По подвижной карте звездного неба можно узнать, что звезда Ригель вечером кульминирует весной (в южном полушарии). 8. Среднее солнечное время в этот момент $T_m \approx 22^h 28^m$; Юпитер будет находиться на эклиптике в точке, противоположной положению Солнца в этот день. Следовательно, он будет хорошо виден в созвездии Водолея и $A \approx 342^\circ$, $h \approx 23^\circ$. 9. По карте определяем время захода Солнца 22 июня: $20^h 40^m$. Следовательно, в $21^h 40^m$ звезда будет иметь координаты $A \approx 153^\circ$, $h \approx 32-35^\circ$. 10. Кассиопея, Персей, Жираф, Рысь, Б. Медведица, Дракон, Лебедь, Цефей. 11. В момент верхней кульминации Луны в первой четверти Солнце будет находиться точно в направлении на запад под углом 90° к линии Земля—Луна. 15 октября координаты Солнца $\alpha \approx 13^h 30^m$, $\delta \approx -8^\circ$, поэтому Луна (считаем плоскость орбиты Луны совпадающей с плоскостью эклиптики) будет иметь координаты $\alpha \approx 19^h 30^m$, $\delta \approx -15^\circ$ и находиться в созвездии Стрельца. 12. Среднее солнечное время в этот момент $T_m \approx 0^h 28^m$. Отметив на карте дату и время, находим, что Юпитер не виден, если находится в точке весеннего равноденствия. 13. По карте определяем угол между направлениями на Солнце и на точку весеннего равноденствия 10 марта. Он составляет 48^m или 12° . Поскольку Марс находился в западной квадратуре, то его эклиптическая долгота $\lambda = 360^\circ - 90^\circ - 12^\circ = 258^\circ = 17^h 12^m$. Считая, что плоскости орбит Марса и Земли совпадают, по карте получаем $\alpha \approx 17^h 12^m$, $\delta \approx -22^\circ$. 14. Поскольку болид был в зените, то $\delta = \varphi = 53^\circ 08'$, $t = 0$. Звездное время 25.11.1916 г. было $s = \alpha + t = S + T_m \cdot K \approx 16^h 01^m$. Следовательно, радиант находился в точке с координатами ($\delta = 53^\circ 08'$, $\alpha = 16^h 01^m$), около θ Дракона. 15. В последней четверти Луна находится под углом 90° к западу от Солнца. 10 апреля координаты Солнца в созвездии Рыб (по карте) $\alpha_\odot \approx 1^h 14^m$, $\delta_\odot \approx +7^\circ$. Тогда для Луны $\alpha_\zeta \approx 1^h 14^m - 6^h = 19^h 14^m$, $\delta_\zeta \approx -20^\circ$. Она будет находиться примерно на эклиптике в созвездии Стрельца. Для наблюдателя на Луне Земля будет находиться в противоположной точке эклиптики в созвездии Близнецов, ее координаты $\alpha_\oplus \approx 19^h 14^m - 12^h = 7^h 14^m$, $\delta_\oplus \approx +20^\circ$.

1.4. Факторы, влияющие на положение светил на небесной сфере

1. Наблюдаемое зенитное расстояние центра Солнца $z' = 90^\circ - (h' + R_\odot) = 75^\circ 33' 8''$, поправка на рефракцию (из табл. 1.2) $\rho \approx 3' 39''$. Следовательно, истинное зенитное расстояние $z = z' + \rho = 75^\circ 36' 47''$, а широта при этом (учитывая, что Солнце находилось в нижней кульминации) $\varphi = 180^\circ - z - \delta = 83^\circ 03' 39''$. 2. $\alpha = 5^h 14^m 55^s$; $\delta = -9^\circ 22' 7''$. 3. Влияет на обе экваториальные координаты светил, но в кульминациях — только на склонение. 4. Всегда влияет на обе эклиптические координаты светил. 5. Воспользуемся формулой $\cos(z) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t)$. Так как с учетом рефракции зенитное расстояние Солнца при восходе и заходе $z = 90^\circ 35'$, для широты $\varphi = 0^\circ$ получаем: $\cos t = -\frac{\sin 35'}{\cos \delta_\odot}$, что даст при $\delta_\odot = 0^\circ$ увели-

чение продолжительности дня (по сравнению с «нормальной» 12^h) $\Delta t \approx 4^m 40^s$, а при $\delta_\odot = \pm 23^\circ 26'$ $\Delta t \approx 5^m 05^s$. Таким образом, можно утверждать, что рефракция приводит к увеличению продолжительности дня на экваторе Земли примерно на 5^m . 6. Чтобы видеть весь диск Луны (угловой его радиус $r \approx 16'$) в полнолуние на горизонте, необходимо, чтобы наблюдаемое зенитное расстояние центра Луны было $z' = 89^\circ 44'$. Тогда с учетом рефракции ($\rho = 35'$) и горизонтального параллакса ($p = 57'$) получаем истинное зенитное расстояние Луны: $z = z' + \rho - p = 89^\circ 22'$. Солнце в этот момент будет находиться на зенитном расстоянии $z_\odot = 90^\circ 38'$, а с учетом рефракции наблюдаемый верхний край его диска будет на зенитном расстоянии $z' = 89^\circ 47'$, т.е. Солнце в этот момент для наблюдателя еще не зайдет. 7. Рефракция уменьшает вертикальный диаметр диска из-за того, что нижний его край она поднимает над горизонтом больше, чем верхний. Горизонтальный диаметр не изменяется. 8. Погрешность можно оценить из тех соображений, что горизонтальный параллакс определен (как следует из условия) с точностью $5 \cdot 10^{-5}$ угл. с. Получаем 149433762 ± 850 км. 9. Очевидно, что речь в этом случае идет об абберационном смещении. Поскольку в плоскости эклиптики эклиптическая широта $\beta = 0^\circ$, то $\delta\theta = 2 \cdot v/c$ и $v = 29,82$ км/с. 10. Поскольку тангенциальная скорость Альтаира $v_t = 4,74 \cdot \frac{\mu}{\pi} = 15,75$ км/с, то полная пространственная скорость $v = \sqrt{v_t^2 + v_r^2} = 30,4$ км/с. Расстояние до Альтаира $r = 1/\pi = 5,05$ пк. Угол между лучом зрения и пространственной скоростью определяем по формуле $\operatorname{tg}(\theta) = v/v_r$. В результате получаем $\theta = 31^\circ, 2$. Поскольку Альтаир сближается с Солнцем (из условия задачи лучевая скорость является отрицательной), то минимальное расстояние, на которое он приблизится к Солнцу, $r_{\min} = r \cdot \sin(\theta) = 2,62$ пк. При этом он пройдет расстояние $l = r \cdot \cos(\theta) = 4,32$ пк за время $t = l/v \approx 138879$ лет. При любом перемеще-

нии звезды ее абсолютная звездная величина $M = m + 5 - 5 \cdot \lg(r)$ не изменяется (если не изменяются ее собственные физические характеристики). Приравнявая этот параметр в настоящий момент и при минимальном сближении $r_{\min}$, получаем видимую звездную величину Альтаира в будущем: $m' \approx -0^m,54$. 11. Следующее равноденствие в звездном году наступает раньше предыдущего. Значит, точка Υ движется навстречу Солнцу с востока на запад, т.е. слева направо в северном полушарии Земли и справа налево — в южном. 12. Используя формулы (1.12)–(1.14), рассчитаем собственное движение Сириуса $\mu = -\sqrt{\mu_\delta^2 + (15 \cdot \mu_\alpha \cdot \cos \delta)^2} \approx -1'',323$, тангенциальную скорость $v_t = 4,74 \frac{\mu}{\pi} \approx -16,5$ км/с и полную пространственную скорость $v = -\sqrt{v_t^2 + v_r^2} \approx -18,13$ км/с. Учитывая условие задачи (знак минус у лучевой скорости), определяем угол между лучом зрения и пространственной скоростью: $\cos(180^\circ - \theta) = v_r / v \Rightarrow \theta \approx 114^\circ,44$.

1.5. Задачи практической астрономии

1. $\alpha = 7^h 35^m 48^s$, $\delta = 12^\circ 05'$. 2. $z = 6^\circ 48'$ к северу от зенита, $s' = 10^h 17^m 37^s$. 3. 21 марта $\alpha_\odot = 0$, $\delta_\odot = 0$. Дифференцируя формулу для определения часового угла восхода и захода светила $\cos t_\odot = -\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta_\odot$, получаем $\sin t_\odot \cdot \Delta t_\odot = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \delta_\odot} \Delta \delta_\odot$. Так как

$\cos \delta_\odot = 1$ и $\sin t_\odot = 1$, то $\Delta t_\odot = \operatorname{tg} \varphi \cdot \Delta \delta_\odot$. За один день Солнце проходит по эклиптике $\sim 1^\circ = 4''$, поэтому $\Delta \delta_\odot = 1^\circ \cdot \sin \varepsilon = 4'' \cdot \sin \varepsilon = 1^m 36^s$. Однако $\Delta t_\odot = 1^m 36^s$, поэтому $\operatorname{tg} \varphi = 1$ и $\varphi = 45^\circ$. 4. В зените находится светило, высота которого в момент верхней кульминации $h = 90^\circ - \varphi + \delta = 90^\circ$, т.е. склонение такого светила должно равняться широте местности $\delta = \varphi$. Поскольку склонение Луны может изменяться максимально в пределах $+28^\circ 35'$ ($28^\circ 35' = 23^\circ 26' + 5^\circ 09'$)... $-28^\circ 35'$, то в диапазоне таких широт Луну можно наблюдать в зените. 5. В течение звездного месяца (27,32 сут) у Луны дважды склонение $\delta = 0^\circ$, когда она может быть в зените над какой-либо точкой экватора (см. предыдущую задачу). Следовательно, в течение года она будет в зените на экваторе $n = [2 \cdot 365,2422 / 27,32] = 26$ раз. 6. 1363,64 км. 7. Погрешность можно оценить из тех соображений, что время определено (как следует из условия) с точностью $5 \cdot 10^{-8}$ с. Получаем $365\,065\,775 \pm 7$ м. 8. Благодаря подвижной карте звездного неба можно найти, что $\delta_\odot \approx +20^\circ$. Поскольку в нижней кульминации $z = 180^\circ - \varphi - \delta$, $h = \varphi + \delta - 90^\circ$, то $\varphi = 90^\circ + h - \delta = 90^\circ + (h' + d_\odot / 2) - \delta = 74^\circ 27' 16''$. 9. Образование полутени и способ решения задачи может продемонстрировать представленный ниже рисунок. Длина полутени

$= 14^h 12^m - 6^h 25^m = 7^h 47^m$. 17. Разница по времени Δt равна разнице по долготе: $\Delta t = \Delta \lambda = (24^h \cdot l)/L = (24^h \cdot l)/(2\pi \cdot R_3 \cdot \cos \varphi)$, где L — длина параллели на широте φ ; $R_3 = 6378,16$ км — экваториальный радиус Земли. Получаем $\Delta t = 2^m 33^s,23$. 18. Определяем время захода с точностью до получаса. Часовой угол Солнца при заходе вычисляем по формуле $\cos(t_\odot) = -\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta_\odot)$. Широта места φ должна быть известна, склонение Солнца $\delta_\odot$ можно рассчитать по дате или определить по подвижной карте звездного неба, а можно взять из «Астрономического ежегодника». Например, для Минска $\varphi \approx 54^\circ$, 5 ноября $\delta_\odot = -16^\circ$, так что $\cos(t_\odot) \approx 0,395$ и $t_\odot \approx 66^\circ,75 = 4^h,45$. Значит, Солнце зайдет через 4,45 ч после истинного полудня. Истинный полдень наступит около 12^h по минскому времени. Следовательно, Солнце зайдет около $16^h 27^m$.

2.1. Видимые и действительные движения планет

1. Угол α между направлениями от Солнца к Юпитеру и к Земле в момент, когда Юпитер находится в западной квадратуре (см. рис. 2.2), определяется по соотношению $\cos \alpha = R_3/R_{\text{Ю}} = 1/5,2028$, откуда $\alpha \approx 79^\circ$. Если западная квадратура наступит через x дней, то в этот момент гелиоцентрические долготы будут удовлетворять условию $(l + x \cdot n_{\text{Ю}}) - (L + x \cdot n_3) = \alpha$, где l, L — соответственно текущая долгота Юпитера и Земли на 1 июля; $n_{\text{Ю}}$ и n_3 — среднее суточное движение Юпитера и Земли (см. табл. 2.1). В результате получаем отрицательное значение $x \approx -67^\circ/54',1 = -74,3$ сут, т.е. это событие было в прошлом. Чтобы получить событие в будущем, нужно к интервалу x добавить синодический период Юпитера или при расчете x добавить период 360° : $x \approx (360^\circ - 67^\circ)/54',1 \approx 325$ сут. В итоге получаем 21 мая следующего года. 2. Сидерический период $T = \frac{T_\oplus \cdot S}{S - T_\oplus} = 809,94$ сут, отсюда

да $a = T^{2/3} = 1,7$ а.е. 3. Примерно 16 ноября. 4. Поскольку речь в задаче идет о наибольшей восточной элонгации, то исходное уравнение $(l + x \cdot n_{\text{М}}) - (L + x \cdot n_3) = 270^\circ + \theta = 292^\circ,77$. Отсюда $x = 113,55$ сут, т.е. событие произойдет 9 ноября. 5. Через 362 сут. 6. Это событие произойдет через 252 сут, т.е. 11 сентября. Венера будет отстоять от Солнца под углом $\sim 46^\circ,33$ к востоку и в момент его захода она будет находиться в созвездии Весов в точке, примерные координаты которой $A \approx 48^\circ$, $h \approx 10^\circ$. 7. Она находилась бы намного дальше орбиты Плутона, т.е. $a \rightarrow \infty$. Например, такой синодический период у звезд. 8. 23 октября того же года. 9. В 2,36 раза. 10. На 22-е сут. 11. Определяем среднее суточное движение планеты: $n = \frac{360^\circ}{T_\oplus \cdot r^{3/2}} = 14'',026 \text{ сут}^{-1} = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ рад/сут}$ (для Земли $r_\oplus = 1$ а.е., $n_\oplus = 59',1 \text{ сут}^{-1} = 1,72 \cdot 10^{-2} \text{ рад/сут}$). Тогда угол φ суточного смещения на небесной сфере в проти-

востоянии можно рассчитать по формуле $\operatorname{tg} \varphi \approx \frac{n_{\oplus} r_{\oplus} - n r}{r - r_{\oplus}}$, откуда $\varphi = 1^{\circ} 16', 54$

12. $q = a(1 - e) = 1,97$ а.е.; $Q = a(1 + e) = 2,84$ а.е.; звездный период $T = 3,73$ года = 1362,38 сут; синодический период $S = 1,366$ года = 499 сут; круговая скорость $v_c = 2\pi a/T \approx 19,2$ км/с; среднее суточное движение $n = 2\pi/T \approx 4,6 \cdot 10^{-3}$ рад/сут; угол суточного смещения на небесной сфере в противостоянии (см. предыдущую задачу) $\varphi \approx 15'$. 13. По формуле (2.9) получаем выражение для определения периода обращения Дактиля: $T^2 = T_{\oplus}^2 \frac{M_{\oplus}}{M} \frac{a^3}{a_{\oplus}^3}$ ($T_{\oplus}$ — период обращения Земли вокруг

Солнца; $M_{\oplus}$ — масса Солнца, M — масса Иды; a — радиус орбиты Дактиля; $a_{\oplus}$ — полуось орбиты Земли). Здесь учтено, что масса Земли намного меньше массы Солнца, а масса Дактиля меньше массы Иды. В итоге получаем $T = 1,049$ сут = $25^h 10^m 43^s, 6$. 14. По формуле, которая аналогична использованной в предыдущей задаче, получаем $M = 1,436 \cdot 10^{22}$ кг. 15. В этот момент Венеру лучше наблюдать перед восходом Солнца. По карте определяем положение Венеры на эклиптике относительно положения Солнца 19.08.1996 г. (она отклонена к западу от Солнца на 47°): Венера находилась в тот день в созвездии Близнецов в точке с координатами $\delta \approx 24-27^{\circ}$, $\alpha \approx 6^h 40^m$. Следующая западная элонгация будет через синодический период $S = 583,92$ сут, т.е. 26 марта 1998 г. Расстояние от Земли до Венеры в описываемый период $\Delta = 1$ а.е. $\cdot \cos(47^{\circ}) = 0,682$ а.е. Лучевая скорость Венеры в момент западной элонгации $v_{\text{луч}} = v_v - v_{\oplus} \cdot \sin(47^{\circ})$, где $v_v = 2\pi r_v/T_v$ — орбитальная скорость Венеры; $v_{\oplus} \cdot \sin(47^{\circ}) = \sin(47^{\circ}) \cdot 2\pi r_{\oplus}/T_{\oplus}$ — составляющая орбитальной скорости Земли по линии Земля—Венера. Получаем $v_{\text{луч}} = 13,3$ км/с. 16. Определяем угол минимального смещения планеты, видимый глазом: $\Delta\varphi_{\min}/d\theta = d/D$, $\Delta\varphi_{\min} = 0', 1 = 6''$. Затем вычисляем среднее суточное движение небесного тела: $n = \frac{360^{\circ}}{T_{\oplus} \cdot r^{\frac{3}{2}}} = 7', 4 \text{ сут}^{-1} = 2,15 \cdot 10^{-3}$ рад/сут (для Земли $r_{\oplus} = 1$ а.е., $n_{\oplus} = 59', 1 \text{ сут}^{-1} =$

$1,72 \cdot 10^{-2}$ рад/сут). Чтобы получить угловое смещение тела на небесной сфере в противостоянии за сутки, используем формулу $\operatorname{tg} \varphi_1 \approx \frac{n_{\oplus} r_{\oplus} - n r}{r - r_{\oplus}}$, полученную

в задаче 11. Получаем $\varphi_1 = 591'', 3 \text{ сут}^{-1}$. Следовательно, минимальный угол в противостоянии на небесной сфере тело пройдет за время $t_{\min} = \Delta\varphi_{\min}/\varphi_1 = 14^m 36', 7$.

Для соединения формула будет несколько иной: $\operatorname{tg} \varphi_2 \approx \frac{n_{\oplus} r_{\oplus} + n r}{r + r_{\oplus}}$. Получаем $\varphi_2 =$

$1064'', 3 \text{ сут}^{-1}$ и $t_{2\min} = \Delta\varphi_{\min}/\varphi_2 = 8^m 07', 1$. 17. По уравнению (2.13) определяем параболическую скорость на расстоянии $r = 0,005543$ а.е.: $v_{\text{п}} = 567,224$ км/с. Следовательно, комета движется по параболе, а эксцентриситет $e \approx 1$. 18. На круговой

орбите полная энергия $E = T + U = \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r}$. Так как $v^2 = GM\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right) = \frac{GM}{r}$, то

$$E = -\frac{GMm}{2r} = \frac{U}{2} = -T. \text{ После взрыва полная энергия } E' = T' + U' = \frac{GMm}{2r} - \frac{GMm}{r} \times \\ \times (1-q) = -\frac{GMm}{2r}(1-2q), \text{ т.е. } T' = T, E' = -\frac{GMm}{r}\left(\frac{1}{2} - q\right) \text{ или } E' = T + U(1-q). \text{ В ре-}$$

зультате получаем: 1) $q > 1/2, E' > 0$ (спутник движется по гиперболической орбите и покидает основную звезду); 2) $q = 1/2, E' = 0$ (спутник движется по параболической орбите и тоже покидает основную звезду); 3) $q < 1/2, E' < 0$ (спутник движется по эллиптической орбите, большая полуось которой определяется по формуле $E' = -\frac{GMm}{2a}(1-q) = -\frac{GMm}{2r}(1-2q)$ или $a = r\frac{1-q}{1-2q}$). 19. 687 сут. 20. По-

скольку звездный период Юпитера $T = 11,862$ г., то синодический период равен $S = 398,87$ сут, следовательно, противостояние будет 18 августа следующего года.

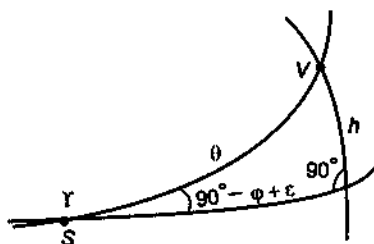
21. Синодический период Венеры 586 сут, следовательно, это событие произойдет 14 сентября следующего года. 22. Определяем сидерический период Меркурия:

$T = 87,97$ сут. Отсюда среднее суточное движение $n = 4^\circ 5' 32''$, 24. 23. Поскольку $\sin \theta = 1 \text{ а.е.}/1,524 \text{ а.е.}$, то $\theta = 41^\circ 0' 29''$, 8. 24. Это произойдет на 230-е сут, т.е. 19 августа. 25. Определяем гелиоцентрическую долготу Юпитера и Земли 1 сентября:

$l = 296^\circ 10', L = 340^\circ 4' 12''$. На чертеже, где в масштабе изображено точное расположение орбит этих планет, откладываем относительно Солнца полученные углы гелиоцентрических долгот от произвольно выбранного направления на точку Υ и определяем примерное положение планет на их орбитах. Затем измеряем угол относительно Земли между выбранным направлением на точку Υ и на Юпитер. Получаем геоцентрическую или эклиптическую долготу Юпитера $\lambda \approx 286^\circ = 19^h 4^m$. Затем, полагая, что орбита Юпитера находится в плоскости эклиптики, по карте определяем его положение (около π Стрельца) и склонение ($\delta \approx -20^\circ$). Следовательно, с учетом условия восходимости светил ($|\delta| < (90^\circ - |\phi|)$) Юпитер был хорошо виден в тот вечер в Санкт-Петербурге. 26. В последний момент наблюдения угол между направлением от Солнца на Землю и Юпитер $\alpha = 360^\circ \cdot (365,25 - 315)/365,25 \approx 50^\circ$. По теореме синусов (сделайте чертеж) получаем $r_{\text{Ю}} = r \times \frac{\sin(\Delta l)}{\sin(180^\circ - \Delta l - \alpha)}$ $\approx 5 \text{ а.е.}$ 27. 1000 лет. 28. Угол наибольшего видимого отклоне-

ния Венеры от Солнца θ определяем по соотношению $\sin \theta = 0,72$. Эклиптика наиболее высоко стоит над горизонтом, когда точка Υ заходит. Следовательно, наиболее высоко над горизонтом Венера может находиться в момент захода Солнца 21 марта (Венера при этом должна быть в наибольшей восточной элонгации). С помощью приведенного ниже рисунка по теореме синусов для сферических тре-

угольников определяем: $\frac{\sin \theta}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin h}{\sin(90^\circ - \varphi + \varepsilon)}$ ($\varepsilon = 23^\circ 26'$ — наклон эклиптики к небесному экватору). Отсюда $\sin h = 0,72 \cdot \cos(\varphi - \varepsilon)$.



Положение Венеры V в наибольшей восточной элонгации в момент захода Солнца S 21 марта

29. Из третьего закона Кеплера $\left(\frac{a_{\text{Л}}}{a_{\text{Ф}}}\right)^3 = \left(\frac{T_{\text{Л}}}{T_{\text{Ф}}}\right)^2$, учитывая, что $\frac{a_{\text{Л}}}{a_{\text{Ф}}} = \frac{0_{\text{Л}}}{0_{\text{Ф}}}$ ($\theta_{\text{Ф}}$ и $\theta_{\text{Л}}$ —

угловые удаления Фобоса и Деймоса), находим $\theta_{\text{Ф}} = 33'', 21$. 30. Из условия задачи определяем перигелийное и афелийное расстояния: $q = 0,3057$ а.е., $Q = 0,4664$ а.е.

Следовательно, $T = \left(\frac{q+Q}{2}\right)^{3/2} = 0,24$ г. = 87,6 сут. 31. $S = 1,606$ г. = 586,6 сут. 32. Счи-

таем, что в марсианских солнечных сутках, как и в земных, 24^{h} марсианского среднего солнечного времени, т.е. период $T_{\text{М}} = 24^{\text{h}} 37^{\text{m}}$ ср. солн. времени соответствует периоду $T'_{\text{М}} = 24^{\text{h}}$ марс. ср. солн. времени. Тогда звездный период обращения Фобоса по марсианскому времени $T'_{\text{Ф}} = T_{\text{Ф}} \cdot T'_{\text{М}} / T_{\text{М}} = 7^{\text{h}} 39^{\text{m}} \cdot 24^{\text{h}} / 24^{\text{h}} 37^{\text{m}} = 7^{\text{h}} 45,8$ марс. ср. солн. времени. Далее по формуле для синодического периода $\frac{1}{S} = \frac{1}{T'_{\text{Ф}}} - \frac{1}{T'_{\text{М}}}$ вы-

числяем период между двумя кульминациями Фобоса: $S = 10^{\text{h}} 49^{\text{m}} 16^{\text{s}}, 4$ марс. ср. солн. времени. 33. Поскольку средняя суточная скорость движения Юпитера по орбите $n_{\text{Ю}} = (360^\circ \cdot 60') / 4332,6 \approx 5'$ в сутки, то за $9^{\text{h}} 50^{\text{m}} 30^{\text{s}}$ он пройдет по орбите вокруг Солнца угол $\alpha = 5' \cdot 9^{\text{h}} 50^{\text{m}} 30^{\text{s}} / 24^{\text{h}} = 2', 05$. Следовательно, на этот угол ему нужно повернуться вокруг своей оси, чтобы завершились его солнечные сутки, за время $\Delta t = 9^{\text{h}} 50^{\text{m}} 30^{\text{s}} \cdot 2', 05 / 360^\circ \approx 3^{\text{s}}, 36$. Возможен еще один вариант решения. По формуле для синодического периода $\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\text{зв.сут}}} - \frac{1}{T_{\text{сол}}}$ (см. предыдущую задачу)

определяем продолжительность солнечных суток на Юпитере: $S = 35433^{\text{s}}, 354 = 9^{\text{h}} 50^{\text{m}} 33^{\text{s}}, 354$, что на $3^{\text{s}}, 354$ больше звездных суток. 34. Наибольшая западная элонгация (наилучшая утренняя видимость) будет на 365-е сутки, т.е. в следую-

шем году. 35. 1. Период обращения Нептуна находим из третьего закона Кеплера: $T_{\Psi} = \sqrt[3]{a_{\Psi}^3} = 164,892$ г. или $T_{\Psi} = 164$ г. и 326 дней. Таким образом, первое обращение произойдет примерно 14–15 августа 2011 г. (не учитывая високосные годы).

2. Рассчитаем синодический период: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T_{\Psi}}, S = \frac{T_{\Psi} \cdot T_{\oplus}}{T_{\Psi} - T_{\oplus}} = 164,892/163,892 =$

$= 1,0061$ лет $= 1$ г. 2,2 дня, т.е. это событие должно было произойти 26 сентября 1847 г. 36. Период обращения Плутона вокруг Солнца 248,6 лет. Открыт он был Клайдом Томбо в 1930 г. За это время Плутон сместился по орбите на угол $\varphi \approx 73 \cdot 360^\circ/248,6 \approx 105^\circ,7$. 37. Можно. Перигелийное расстояние для Плутона ($a = 39,48$ а.е., $e = 0,2488$) $q = a(1 - e) = 29,66$ а.е., т.е. в перигелии он немного ближе к Солнцу, чем Нептун, у которого почти круговая орбита ($a = 30,07$ а.е., $e = 0,0086$). Однако сближения Нептуна и Плутона не происходит, так как периоды обращения этих планет находятся в резонансе: $T_{II}/T_{II} = 248,6/164,8 \approx 3/2$. В начале XXII в. Плутон окажется вблизи афелия, его расстояние от Солнца будет около $Q = a(1 + e) = 49,30$ а.е. Если считать, что мгновенный размер Солнечной системы определяется расстоянием от Солнца до наиболее удаленной от него в данный момент планеты, то можно сказать, что он периодически изменяется от 30 до 50 а.е. 38. Большая полуось орбиты Нептуна равна $165^{2/3} \approx 30$ а.е., т.е. Нептун находится в 30 раз дальше от Солнца, чем Земля. Угловой диаметр Солнца, видимый с Земли, равен примерно $30'$. Следовательно, при наблюдении с Нептуна диск Солнца будет виден под углом $1'$, т.е. его можно будет разглядеть, но на пределе разрешения глаза. Однако реально увидеть диск нельзя, Солнце «слепит глаза», и предельное разрешение не будет достигнуто. 39. См. рисунок.



40. $\arcsin(1/5,2) \approx 11^\circ,1$. 41. Расстояние до α Сеп равно приблизительно 1,34 пк, т.е. большая полуось орбиты Земли (1 а.е.), расположенная перпендикулярно лучу зрения, видна с α Сеп под углом $1/1,34 \approx 0'',7463$. Так как большая полуось орбиты Юпитера равна 5,2 а.е., а сама его орбита близка к круговой, то наибольшее угловое расстояние от Солнца, на котором Юпитер виден с α Сеп, составляет $3'',88$.

42. $(1/25-1/88)^{-1} \approx 35$ сут; $(1/25-1/365,25)^{-1} \approx 26,8$ сут; $(1/25-1/90800)^{-1} \approx 25,01$ сут.

43. Угловой диаметр диска Солнца $\sim 0^\circ,5$. Расстояние от Солнца до Венеры $0,72$ а.е., расстояние от Земли до Венеры в нижнем соединении $0,28$ а.е. Пересекая по диаметру диск Солнца, Венера проходит в своем синодическом движении дугу относительно Солнца $(0^\circ,5-0,28)/0,72 \approx 0^\circ,194$. Поскольку синодический период Венеры равен $583^d,92$, получаем, что она проходит по диску Солнца за $(0^\circ,194 \times 583^d,92)/360^\circ \approx 0^d,315 \approx 7^h34^m9^s,6$. Если смотреть на Солнечную систему со стороны северного полюса эклиптики, то Венера и Земля движутся вокруг Солнца против часовой стрелки, с запада на восток, причем Венера быстрее, чем Земля. Поэтому вблизи нижнего соединения Венера перемещается по небу слева направо (попятное движение — с востока на запад). Таким же будет и ее движение по диску Солнца.

44. Покрываемая звезда находится на много порядков дальше от Земли, чем Плутон. Поэтому конус тени, отбрасываемой Плутоном на Землю при покрытии, можно считать цилиндром, диаметр сечения которого равен диаметру Плутона, т.е. 2356 км. Это и есть ширина полосы на поверхности Земли, в пределах которой можно наблюдать, как Плутон покроет звезду. Продолжительность покрытия определяется диаметром тени и скоростью ее движения по поверхности Земли. Орбитальная скорость Земли равна 30 км/с, Плутона — в $\sqrt{30}$ раз меньше, так как скорость обратно пропорциональна корню из радиуса орбиты. Если во время покрытия вектор скорости Земли перпендикулярен оси цилиндра тени, то тень движется по поверхности Земли со скоростью Земли относительно Плутона, т.е. $30 - 30/\sqrt{30}$ км/с; если параллелен, то тень движется со скоростью Плутона, т.е. $30/\sqrt{30}$ км/с. Отсюда продолжительность покрытия в том месте, где наблюдатель пересекает тень по диаметру: $2356/24,5 \approx 96^s,1 \approx 1^m,6$ в первом случае и $2356/5,5 \approx 430^s,1 \approx 7^m,2$ — во втором.

45. Мощность сигнала, который поступает на зондируемое тело, пропорциональна r^{-2} . Мощность сигнала, приходящего от тела на Землю, также пропорциональна r^{-2} . Поэтому мощность отраженного эхосигнала пропорциональна r^{-4} . Расстояние от Земли до астероида в соединении $r_1 = 5/3 + 1 = 8/3$ а.е., в противостоянии — $r_2 = 5/3 - 1 = 2/3$ а.е.; отношение расстояний $r_1/r_2 = 4$. Значит, при локации астероида вблизи соединения нужно послать сигнал, который в $4^4 = 256$ раз более мощный, чем в противостоянии, чтобы получить обратные сигналы одинаковой мощности. Освещенность от астероида в противостоянии только в $4^2 = 16$ раз больше, чем в соединении, соответственно звездная величина меньше примерно на 3^m .

46. Солнечная система разрушится. Планеты удалятся от Солнца по параболам, поскольку скорость их движения по первоначальным (почти круговым) орбитам равна параболической скорости при уменьшенной вдвое массе центрального тела. Возможно, останутся Меркурий, Марс и Плутон (планеты с наибольшими эксцентриситетами орбит), если они будут находиться вблизи перигелиев своих орбит в момент изменения массы

Солнца. 47. Земля начнет испытывать вдвое большую, чем прежде, силу притяжения со стороны Солнца, поэтому она перейдет с круговой орбиты на эллиптическую, которая будет находиться внутри прежней орбиты. Таким образом, в момент, когда Земля будет покидать круговую орбиту, она будет находиться в афелии своей новой эллиптической орбиты. Интегралы энергии, описывающие движение Земли в поле центрального тела, массы которых равны M и $2M$, имеют вид $v^2 = GM \frac{1}{a}$,

$$v^2 = G(2M) \left(\frac{2}{a} - \frac{1}{a'} \right), \text{ где } a, a' \text{ — первоначальное и новые значения большой полу-}$$

оси орбиты Земли. Сравнивая эти два выражения, получаем, что $a' = \frac{2}{3}a \approx 0,667 \text{ а.е.}$

Определяем период обращения Земли по новой орбите. По третьему уточненному

$$\text{закону Кеплера имеем } \frac{a^3}{T^2 M} = \frac{a'^3}{T'^2 (2M)}, \text{ откуда } T' = T \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{a'}{a} \right)^3} \approx 0,385 \text{ г.}$$

Эксцентриситет новой орбиты найдем по соотношению $a = a'(1 + e')$, откуда $e' = 0,5$.

48. Из формул (2.10), (2.11), а также интеграла энергии $v^2 = GM_{\odot} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$ и выра-

жений для расстояний в перигелии и афелии $q = a(1 - e)$, $Q = a(1 + e)$ следует, что отношение соответствующих скоростей $\frac{v_q}{v_Q} = \frac{1+e}{1-e}$. Если оно равно 3, то $e = 0,5$.

49. По определению $v = 2\pi r/T$. Если период обращения T выразить в годах, радиус орбиты r — в а.е., а скорость движения по орбите v — в км/с, то получаем $v = 30 \frac{r}{T}$,

поскольку орбитальная скорость Земли равна 30 км/с. С другой стороны, по третьему закону Кеплера $T^2 = r^3$, поэтому $v = \frac{30}{\sqrt{r}}$. 50. Из третьего закона Кеплера

$$a = T_{\odot}^{2/3} \approx 0,167 \text{ а.е.} \approx 25 \cdot 10^6 \text{ км.}$$

51. Если вспомнить понятия возмущений и возмущающей силы, то для того, чтобы у какого-либо объекта был спутник, возмущающее ускорение (разность ускорений, сообщаемых Солнцем спутнику и телу, вокруг которого он движется) не должно быть больше, чем ускорение притяжения спутника центральным телом. Возмущающее ускорение можно определить так:

$$a = \omega_A - \omega_B = GM_{\odot} \left(\frac{1}{(r-d)^2} - \frac{1}{r^2} \right) \approx GM_{\odot} \frac{2 \cdot d}{r^3}, \text{ где } M_{\odot} \text{ — масса Солнца; } r \text{ — ге-}$$

лиоцентрическое расстояние астероида; d — искомое расстояние между астероидом и его спутником. Поэтому уравнение для определения d имеет вид

$$\frac{2M_{\odot}d}{r^3} = \frac{M}{d^2}, \text{ откуда } d = r \left(\frac{M}{2M_{\odot}} \right)^{1/3}, \text{ где } M = 4\pi R^3/3 \approx 8,4 \cdot 10^{18} \text{ кг — масса цен-}$$

трального астероида. Получаем $d \approx 19\,160$ км. Интересно, что на самом деле минимальный радиус круговой орбиты спутника, при котором он может покинуть астероид и начать двигаться по гелиоцентрической орбите, можно определить по

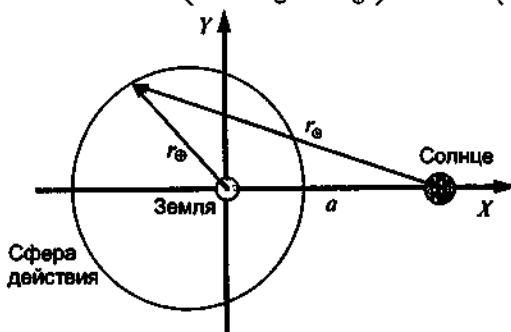
формуле $d \approx 0,5R_H$, где $R_H \equiv r \left(\frac{M}{3M_\odot} \right)^{1/3}$ — радиус Хилла. 52. Обозначим $M_\oplus$ и $M_\odot$

массы Земли и Солнца, a — расстояние между ними. Введем систему координат, как показано на приведенном ниже рисунке. Ясно, что искомая поверхность обладает осевой симметрией относительно оси абсцисс. Поэтому достаточно найти сечение поверхности плоскостью XY , т.е. уравнение плоской кривой вида $f(x, y) = 0$.

Запишем условие равенства сил притяжения к Солнцу и Земле: $\frac{M_\odot}{r_\odot^2} = \frac{M_\oplus}{r_\oplus^2}$. Уч-

тем, что $r_\oplus^2 = x^2 + y^2$, $r_\odot^2 = (x - a)^2 + y^2$. После несложных преобразований полу-

чаем уравнение сферы тяготения: $\left(x + \frac{M_\oplus \cdot a}{M_\odot - M_\oplus} \right)^2 + y^2 = \frac{M_\odot \cdot M_\oplus}{(M_\odot - M_\oplus)^2} \cdot a^2$.



Сфера действия Земли относительно Солнца

Таким образом, сфера тяготения — это действительно сфера, радиус которой

$$r_g = a \sqrt{\frac{M_\odot \cdot M_\oplus}{(M_\odot - M_\oplus)^2}} \approx a \sqrt{\frac{M_\oplus}{M_\odot}}, \text{ а центр смещен по оси } OX \text{ от центра Земли в про-}$$

тивоположном от Солнца направлении на расстояние $\Delta r_g = \frac{M_\oplus}{M_\odot - M_\oplus} a \approx \frac{M_\oplus}{M_\odot} a$.

Получаем $r_g \approx 260\,000$ км, $\Delta r_g \approx 450$ км, так что центр сферы находится внутри Земли. Плоскостью (проходящей посередине между Землей и Солнцем и перпендикулярной линии Земля — Солнце) сфера действия была бы, если бы масса Земли равнялась массе Солнца. 53. Поскольку наклон экватора Марса к плоскости его орбиты ($\sim 25^\circ$) больше, чем у Земли ($23^\circ 26'$), то «уравнение от наклона эклиптики» на Марсе больше земного, а так как эксцентриситет орбиты Марса (0,093) также больше, чем у Земли (0,017), то и «уравнение от эксцентриситета» также на Марсе

больше. Следовательно, пределы изменения уравнения времени на Марсе больше, чем на Земле. 54. Рассчитаем расстояние от Меркурия до Солнца в перигелии и афелии: $q = a(1 - e) = 0,32$ а.е.; $Q = a(1 + e) = 0,48$ а.е. Тогда наименьшее расстояние от Меркурия до Земли $D_{\min} = (1 - 0,48) \cdot 1,496 \cdot 10^8 = 7,78 \cdot 10^7$ км, а наибольшее — $D_{\max} = (1 + 0,48) \cdot 1,496 \cdot 10^8 = 2,214 \cdot 10^8$ км. 55. Ответ на этот вопрос можно получить, используя карту звездного неба. Отметив указанные дату и время на карте, видим, что эклиптика находится на расстоянии около 10° от точки востока. Ни одна из верхних планет (это может быть только верхняя планета!) не имеет такого большого наклона орбиты, они все находятся только вблизи эклиптики. Следовательно, это не планета, а звезда (например, ζ Девы) или какой-то искусственный объект. 56. Из третьего закона Кеплера $\frac{T^2}{a^3} = \text{const} = C$; $T = C^{1/2} \cdot a^{1/2}$ следу-

ет $\Delta T = \frac{dT}{da} \Delta a = \frac{3}{2} C^{1/2} a^{-1/2} \Delta a$. После подстановки C получим, что период увеличится на малую величину $\Delta T = \frac{3}{2} \frac{T}{a} \Delta a$. 57. Из третьего уточненного закона Кеплера

$$\frac{T_\Phi^2 \cdot (M_\oplus + m_\Phi)}{T_\zeta^2 \cdot (M_\oplus + m_\zeta)} = \frac{a_\Phi^3}{a_\zeta^3}, \text{ пренебрегая массой Фобоса по сравнению с массой Марса,}$$

после преобразований получаем: $M_\Phi/M_\oplus \approx 0,105$. 58. Из уравнения для моментов сил имеем: $M_\Phi L_\Phi = M_\zeta (L - L_\Phi)$, где L — расстояние между центрами Земли и Луны; L_Φ — расстояние от центра Земли до общего центра масс. Получаем $L_\Phi = 4663,66$ км. 59. Представим падение тела как движение по очень вытянутому эллипсу с большой осью орбиты, равной начальному расстоянию между телами a .

Тогда согласно третьему закону Кеплера можно записать: $\frac{T^2}{(2t)^2} = \frac{a^3}{(a/2)^3} = 8$,

где T — период движения по орбите с полуосью a ; t — время падения. Получаем $t = \frac{T}{4\sqrt{2}} = \frac{T}{5,657}$ или $t = \frac{365,25 \cdot a^{3/2}}{5,657}$ (сутки), где расстояние a — в а.е. 60. 64,57 сут

(см. предыдущую задачу). 61. 43,9 г. (см. предыдущую задачу). 62. Поскольку угол падения солнечных лучей в день летнего солнцестояния $i_1 = \varphi - \varepsilon$, то световой поток, проходящий через единичное сечение, распределяется по площади $1/\cos(\varphi - \varepsilon)$. В то же время угол падения солнечных лучей в день зимнего солнцестояния $i_2 = \varphi + \varepsilon$, и световой поток, проходящий через единичное сечение, распределяется по площади $1/\cos(\varphi + \varepsilon)$. Следовательно, отношение потоков излучения, которые приходятся на единицу площади поверхности земли, составит: $\frac{\text{Лето}}{\text{Зима}} \Rightarrow \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\cos(\varphi - \varepsilon)}{\cos(\varphi + \varepsilon)}$, что на данной широте дает величину 4,51. Теперь

выясним влияние расстояния от Солнца: площадь сферы вокруг Солнца на расстоянии перигелия $S_2 = 4\pi a^2(1-e)^2$, афелия — $S_1 = 4\pi a^2(1+e)^2$. Следовательно, отношение потоков, падающих на единицу площади, $\frac{\text{Зима}}{\text{Лето}} \Rightarrow \frac{\Phi'_2}{\Phi'_1} = \frac{(1+e)^2}{(1-e)^2} = 1,07$.

Таким образом, получаем, что влияние наклона солнечных лучей больше влияния изменения расстояния от Солнца в данном городе примерно в 4,2 раза. 63. Это точка Υ , т.е. $\alpha = 0^\circ$. 64. По формулам (2.12) рассчитаем круговую скорость на расстоянии r от Солнца: $v_c = 35,23$ км/с. Так как $v < v_c$, то коническое сечение — эллипс, находящийся в окружности радиусом $r = 0,7184$ а.е. Параметры орбиты соответствуют параметрам орбиты Венеры. 65. Из второго закона Кеплера следует, что $v_0 \cdot l = v_q \cdot q = v_Q \cdot Q$, где $l = r_0 \cdot \sin \alpha$ — прицельный параметр (или прицельное расстояние); v_q и q — скорость и расстояние в перигелии; v_Q и Q — скорость и расстояние в афелии. По формуле $v_0^2 = GM_\odot \left(\frac{2}{r_0} - \frac{1}{a} \right)$ находим полуось

орбиты: $a = \frac{r_0}{2-\eta}$, где $\eta = \frac{r_0 \cdot v_0^2}{GM_\odot}$. Далее по уравнениям (2.10)–(2.12) для скоростей

и из указанного следствия второго закона Кеплера получаем выражение для эксцентриситета: $e = \sqrt{1 - (2-\eta) \cdot \eta \cdot \sin^2 \alpha}$. Окончательно имеем: $Q_{(+)} , q_{(-)} = \frac{r_0}{2-\eta} \times \left(1 \pm \sqrt{1 - (2-\eta) \cdot \eta \cdot \sin^2 \alpha} \right)$. 66. Запишем формулы, выражающие соответственно

потенциальную и кинетическую энергии планеты: $U = -G \frac{M_\odot m}{r}$; $T = \frac{mv^2}{2}$. Поскольку

ку относительная скорость выражается известной зависимостью $v^2 = GM_\odot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$,

то полная энергия $E = U + T = -G \frac{M_\odot m}{r} + \frac{GM_\odot m}{2} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) = -G \frac{M_\odot m}{2a}$.

2.2. Движение Земли и Луны

1. 22 июня Солнце на северном полюсе круглые сутки находится на высоте $\sim 23^\circ,5$ над горизонтом. Поскольку в полнолуние Луна находится почти в противоположной Солнцу точке небесной сферы, она будет все время примерно на такой же высоте под горизонтом. Таким образом, Луна не будет видна. Обоснуем ответ более точно. Наклон плоскости орбиты Луны к плоскости эклиптики составляет $\sim 5^\circ$, поэтому Луна 22 июня будет как минимум в $23^\circ,5 - 5^\circ = 18^\circ,5$ под горизонтом. Если полнолуние произойдет даже 1 июня, Луна все равно видна не будет. 2. Видимые

цвет и яркость Луны — это эффект прохождения лучей от нее через земную атмосферу: у горизонта атмосферное ослабление велико (особенно для синих лучей), и Луна кажется тусклой и желтоватой. Так что здесь достаточно объяснить, почему зимой в полнолуние Луна кульминирует высоко, а летом — низко над горизонтом. В полнолуние Луна находится в направлении, почти противоположном направлению на Солнце (наклоном ее орбиты к плоскости эклиптики $\sim 5^\circ$ пренебрегаем). Значит, полная Луна находится в полночь зимой примерно там, где Солнце — летом в полдень, т.е. выше всего в году. 3. Поскольку наклон плоскости орбиты Луны к плоскости эклиптики $i \approx 5^\circ$, склонение Луны в течение периода прецессии линии узлов (18,6 года) изменяется в пределах $-(\epsilon + i) \leq \delta \leq +(\epsilon + i)$, где $\epsilon \approx 23^\circ,5$ — наклон эклиптики к экватору, так что $-28^\circ,5 \leq \delta \leq +28^\circ,5$. Далее (см. задачу 45 из § 1.1) можно записать: $90^\circ - \delta_{\max} - \varphi \leq h \leq 90^\circ + \delta_{\max} - \varphi$. Например, для определения высоты Луны в верхней кульминации в Минске ($\varphi \approx 54^\circ$) получаем неравенства: $7^\circ,5 \leq h \leq 64^\circ,5$. Интересно, что «лунный северный полярный круг» проходит на широте около $61^\circ,5$. Севернее находится зона, где хотя бы раз в 18,6 года Луна в полнолуние не восходит. 4. В зените кульминируют светила с $\delta = \varphi$. Так как склонение Луны всегда находится в пределах (см. решение предыдущей задачи) $-28^\circ,5 \leq \delta \leq +28^\circ,5$, а самая южная точка Беларуси имеет широту около 51° , Луну здесь наблюдать в зените нельзя. 5. Когда Луна в последней четверти, она видна на небе вблизи апекса орбитального движения Земли. Следовательно, звезды, находящиеся на небесной сфере недалеко от Луны, в среднем приближаются к нам со скоростью орбитального движения Земли (~ 30 км/с). 6. Дата 7 февраля «равноудалена» от дней зимнего солнцестояния и весеннего равноденствия, так что прямое восхождение Солнца $\alpha_\odot \approx 21^h$. Поскольку Луна в последней четверти, ее прямое восхождение на 6^h меньше, значит, оно равно 15^h . 7. Это начало затмения, если наблюдение ведется в северном полушарии на широте $\varphi > 23^\circ,5$, и конец затмения в противном случае. Действительно, 22 июня в северном полушарии на широтах $\varphi > 23^\circ,5$ Солнце и Луна перемещаются по эклиптике справа налево. При этом Солнце обходит всю эклиптику за год, а Луна — за месяц. Поэтому Луна догоняет Солнце, и в начале затмения ее диск «наползает» на Солнце справа. 8. Если за синодический месяц, т.е. за $29^d,53$, Луна смещается по эклиптике относительно Солнца на 360° , то 1° (сумма угловых диаметров дисков Солнца и Луны) она пройдет за $29^d,53/360^\circ = 0^d,082 \approx 2^h$. При такой грубой оценке наклоном лунной орбиты к плоскости эклиптики ($\approx 5^\circ$) можно пренебречь. Существенная неточность в этой оценке все же есть: мы не учли вращение Земли. Попробуем получить такую же оценку с учетом этого вращения. Скорость движения лунной тени по поверхности Земли определяется двумя составляющими: скоростью движения Луны по орбите и скоростью вращения точек поверхности Земли на данной

широте вокруг оси Земли. Скорость движения лунной тени только за счет обращения Луны получим по соотношению $\frac{v_{\zeta}}{v_{\zeta T}} = \frac{a-r}{a}$, где $v_{\zeta} = 2\pi(r + R_{\oplus})/T \approx 1,023 \text{ км/с} = 3683 \text{ км/ч}$ — скорость движения Луны по орбите; T — сидерический период этого движения; $v_{\zeta T}$ — скорость движения тени Луны по Земле, определяемая этим фактором; a — астрономическая единица; r — среднее расстояние от Луны до поверхности Земли. Отсюда $v_{\zeta T} \approx 1,026 \text{ км/с} = 3693,6 \text{ км/ч}$. Теперь получим скорость движения точек на поверхности Земли за счет ее вращения на широте $\varphi = 54^\circ$: $v_{\varphi} = 2\pi R_{\oplus} \cdot \cos\varphi / 24^h = 981,5 \text{ км/ч}$ ($R_{\oplus} = 6378 \text{ км}$ — экваториальный радиус Земли). Отсюда получаем, что тень Луны движется по Земле со скоростью $v_T = v_{\zeta T} - v_{\varphi} \approx 2712 \text{ км/ч}$. Теперь нужно определить, какое расстояние пройдет тень с такой скоростью. Пояснить это поможет рисунок.

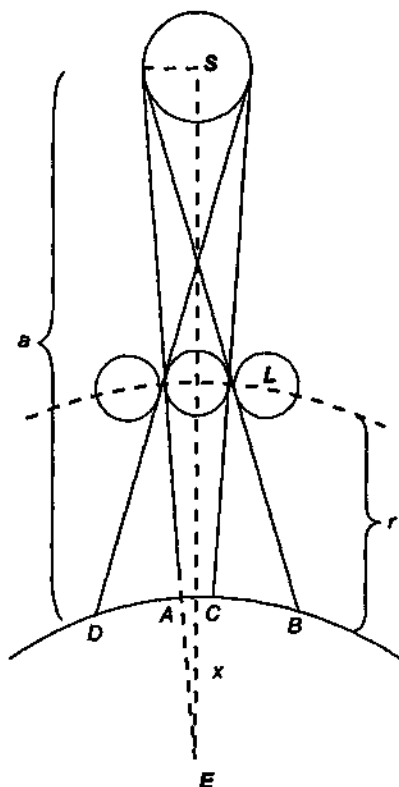


Схема появления тени и полутени при солнечном затмении:

S — Солнце, L — Луна, E — Земля

Очевидно, что это расстояние определяется зоной полутени DB на Земле при затмении. Пренебрегая кривизной Земли, расстояние AB находим по фор-

муле $\frac{a-r}{a} = \frac{2R_{\zeta}}{AB}$, где $R_{\zeta} = 1738$ км — радиус Луны. Получаем $AB = 2aR_{\zeta}/(a-r)$.

Теперь определяем диаметр полной тени от Луны на Земле AC по уравнению $\frac{R_{\odot}}{a+x} = \frac{R_{\zeta}}{r+x} = \frac{AC}{2x}$, где $R_{\odot} = 696\,000$ км — радиус Солнца. Получаем $x = (R_{\zeta}a - R_{\odot}r)/(R_{\odot} - R_{\zeta})$, $AC = 2(R_{\zeta}a - R_{\odot}r)/(a-r)$ и диаметр полутени $DB = 2AB - AC = \frac{2(aR_{\zeta} + rR_{\odot})}{a-r} = 7011$ км. В итоге наибольшую продолжительность солнечного

затмения определяем как $t = DB/v_T \approx 2^h 35^m$. 9. Максимальное склонение Луны $\delta = +23^{\circ}26' + 5^{\circ}09' = +28^{\circ}35'$, следовательно, максимальная высота $h = 90^{\circ} - \varphi + \delta = 64^{\circ}41'$. Это происходит, когда восходящий узел лунной орбиты совпадает с точкой весеннего равноденствия Υ , а сама точка Υ заходит (в этот момент эклиптика выше всего над горизонтом). Поскольку Луна находится в верхней кульминации, то ее прямое восхождение $\alpha = 6^h$. Речь идет о полнолунии, следовательно, Солнце находится в нижней кульминации, его прямое восхождение $\alpha = 18^h$, т.е. это 22 декабря. Координаты Луны $\delta = +28^{\circ}36'$, $\alpha = 6^h$, она находится (определяем по карте) в созвездии Возничего. 10. Как следует из закона сохранения энергии ($mv^2/2 = mv_0^2/2 - GM_{\zeta}m/R_{\zeta}$), какую бы скорость ни имело тело на границе сферы действия Луны, при касании лунной поверхности она не может быть меньше второй космической скорости относительно Луны. Получаем (при $M_{\zeta} = 7,34 \cdot 10^{22}$ кг; $R_{\zeta} = 1738$ км) $v_0 = \sqrt{\frac{2GM_{\zeta}}{R_{\zeta}}} \approx 2,374$ км/с. 11. В действительности путь Луны отно-

сительно Солнца, т.е. ее орбита в Солнечной системе, точек перегиба *не имеет* и везде обращена выпуклостью от Солнца. Это довольно неожиданный факт. Кривизна траектории Луны в Солнечной системе изменяется с синодическим периодом, являясь наибольшей в полнолуние и наименьшей в новолуние. Чтобы выпуклость даже в новолуние была обращена от Солнца, равнодействующая сил притяжения Луны к Солнцу и Земле должна быть направлена к Солнцу. Иначе говоря, сила притяжения Луны к Солнцу $F_{\odot}$ должна быть больше, чем сила ее притяжения к Земле $F_{\oplus}$. Проверим, так ли это: $F_{\odot} = G \frac{M_{\odot}m_{\zeta}}{R_{\odot}^2}$, $F_{\oplus} = G \frac{M_{\oplus}m_{\zeta}}{R_{\zeta}^2}$. От-

сюда $\frac{F_{\odot}}{F_{\oplus}} = \frac{M_{\odot}}{M_{\oplus}} \left(\frac{R_{\zeta}}{R_{\odot}} \right)^2 \approx \frac{2 \cdot 10^{33}}{6 \cdot 10^{27}} \frac{1}{(390)^2} \approx 2,19$, т.е. Луна притягивается к Солнцу

в 2 с лишним раза сильнее, чем к Земле. Чтобы на лунной орбите в Солнечной системе были точки перегиба, в новолуние должно быть $F_{\odot} < F_{\oplus}$, так что расстояние до Луны должно было бы быть $R'_{\zeta} < \frac{R_{\zeta}}{\sqrt{2,19}} \approx 260$ тыс. км. 12. Период колебания ма-

ятника можно выразить формулой $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, ускорение свободного падения на планете с массой M и радиусом R можно рассчитать по уравнению $g = G \frac{M}{R^2}$. Уско-

рение свободного падения на Луне $g_{\text{л}} = \frac{g_{\oplus} R_{\oplus}^2}{81 \cdot R_{\text{л}}^2} = 1,624 \text{ м/с}^2$, длина лунного секунд-

ного маятника $l' = 4,11 \text{ см}$. На Луне земной секундный маятник имел бы период $T' = T\sqrt{g_{\oplus}/g_{\text{л}}} = 2,458 \text{ с}$. 13. Используем формулу для определения синодического

периода: $\frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{1^d} - \frac{1}{60^d} = \left(\frac{59}{60}\right)\left[\frac{1}{d}\right]$. Получаем, что промежуток времени между

двумя последовательными кульминациями Луны составил бы $\Delta T = (60/59)^d \times \times 23^h 56^m 4^s,091 = 24^h 20^m 24^s,5$. 14. По формуле $\frac{1}{S} = \frac{1}{60^d} - \frac{1}{365^d,25}$ получаем $S = 71^d,79$.

15. По уравнению $\frac{1}{S} = \frac{1}{27^d,32} + \frac{1}{365^d,25}$ получаем $S = 25^d,42$. 16. Наибольший ви-

димый радиус Луны, наблюдаемый в перигее, составляет $R = 16'46''$, а максимальный горизонтальный параллакс $p = 61'18''$, поэтому максимальная эклиптическая широта верхнего края Луны (определяемая относительно центра Земли) $\beta' = = 5^{\circ}20' + 16'46'' + 61'18'' = 6^{\circ}38'4'' > 6^{\circ}38'$. Вследствие движения лунных узлов долгота Луны в этом положении на орбите может быть любой. Следовательно, в указанном интервале широт Луна покрывает любую звезду. 17. Условие незаходя-

щего светила: $\delta \geq (90^{\circ} - \varphi)$, а так как $\delta = \varepsilon \pm i$ ($i = 5^{\circ}8'$ — среднее наклонение лунной орбиты), то $\varphi_{\min} = (90^{\circ} - (\varepsilon + i)) = 61^{\circ}25'$. 18. Наибольший видимый диаметр Луны $d_{\text{л}} = 33'32''$, а наименьший видимый диаметр Солнца $d_{\odot} = 31'32''$, поэтому при изменении полуоси орбиты Луны получим: $d_{\text{л}1} \approx d_{\text{л}} - 0,03d_{\text{л}} = 32'31'',6 > d_{\odot}$ (затмения будут), $d_{\text{л}2} \approx d_{\text{л}} - 0,05d_{\text{л}} = 31'51'',4 > d_{\odot}$ (затмения еще будут), $d_{\text{л}3} \approx d_{\text{л}} - 0,1d_{\text{л}} = = 30'10'',8 < d_{\odot}$ (полных солнечных затмений уже не будет). 19. Количество звезд,

видимых невооруженным глазом (со звездной величиной $\leq 6^m$) на небесной сфере, равно 6000. Площадь небесной сферы 4π стерадиан, или $4\pi(57^{\circ},3)^2 \approx 41259 \text{ кв. град}$, т.е. средняя плотность звезд $6000/41\,259 \approx 0,1454 \text{ звезд/кв. град}$. Луна диаметром около $32'$, проходя за сутки примерно 13° , покрывает площадь $32' \cdot 13^{\circ} \approx 6,93 \text{ кв. град}$. Значит, сюда попадет примерно $0,1454 \cdot 6,93 \approx 1$ звезда в сутки. 20. Эклиптика расположена под наибольшим углом к горизонту, когда точка Υ заходит, поэтому Луна в первой четверти будет наиболее высоко кульминировать весной (около дня весеннего равноденствия) при заходе Солнца. 21. Лунное затмение происходит в полнолуние, следовательно, Луна будет находиться примерно в точке эклиптики, противоположной той, где находится Солнце. Солнце 21 января на-

ходится в созвездии Козерога в точке с координатами $\alpha_{\odot} \approx 20^h 12^m$ и $\delta_{\odot} = -20^\circ$. Значит, Луна была в созвездии Рака в точке с координатами $\alpha_{\zeta} \approx 8^h 12^m$ и $\delta_{\zeta} = 20^\circ$.

22. Промежуток времени между двумя восходами Луны (рассчитывается по формуле для синодического периода $\frac{1}{S} = \frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_{\zeta}}$, где $T_d = 23^h 56^m 4^s$ — период одного

оборота Земли вокруг оси; $T_{\zeta} = 27^d, 32$ — период обращения Луны вокруг Земли) составляет $S \approx 24^h 50^m 28^s, 4$. Следовательно, в следующий раз Луна взойдет 22 сентября в $0^h 42^m 28^s, 4$. Она восходит примерно в полночь, поэтому находится в последней четверти.

23. Максимальная яркость кольцеобразного затмения будет, когда $d_{\zeta} = 29' 20''$, $d_{\odot} = 32' 36''$. Следовательно, коэффициент ослабления можно выразить

через отношение площадей диска Солнца и кольца: $\eta = \frac{S_{\odot}}{S_{\kappa}} = \frac{d_{\odot}^2}{d_{\odot}^2 - d_{\zeta}^2} \approx 5,25$.

2.3. Движение искусственных тел

1. $t = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)^3} \approx 0,7$ года. 2. Рассчитаем круговую скорость движения спутника до ее увеличения: $v_c = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{r}} = 7546,522$ м/с. Точка, в которой произошло

увеличение скорости спутника, очевидно, после этого станет перигеем орбиты, в котором скорость определяется по выражению (2.10): $v_q = v_c + \Delta v = v'_c \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$

($v'_c = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{a}}$ — новая круговая скорость; a и e — полуось и эксцентриситет новой эллиптической орбиты). В этом случае $q = r$; $a = \frac{r}{1-e}$; $Q = r \frac{1+e}{1-e}$. Определяем e , используя интеграл движения (2.14): $v_q^2 = (v_c + \Delta v)^2 = GM_{\oplus} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$. Получаем

$1+e = \left(1 + \frac{\Delta v}{v_c}\right)^2$; $1-e = 2 - \left(1 + \frac{\Delta v}{v_c}\right)^2$. Подставляя в выражение для Q , получаем

$Q = 7794,57$ км, максимальное удаление спутника от поверхности Земли $X = Q - R_{\oplus} = 1423,57$ км. 3. В момент отрыва от поверхности астероида нужно развить вторую космическую скорость $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \sqrt{G\rho} \cdot R$, т.е. $R = v \sqrt{\frac{3}{8\pi G\rho}}$.

Поскольку на астероиде для прыжка необходимо затратить такую же энергию,

как и на Земле, то $v = \sqrt{2gh}$ (g — земное ускорение силы тяжести; h — высота, на которую центр тяжести поднимается в прыжке). В качестве разумной оценки возьмем $h = 1$ м (тогда прыгун преодолеет планку на высоте ~ 170 – 180 см). В результате получаем $R = \sqrt{\frac{3gh}{4\pi G\rho}} \approx 3400$ м. Если перед прыжком космонавт разбежится, он прыгнет и с астероида большего размера. 4. Расстояния в перигее и апогее $q = a(1 - e)$, $Q = a(1 + e)$ дают большую полуось орбиты спутника $a = (q + Q)/2 = 26\,500$ км и ее эксцентриситет $e = \frac{Q - q}{2a} \approx 0,74$. Период обращения по третьему

закону Кеплера $T = \frac{2\pi}{\sqrt{GM_\oplus}} a^{3/2} = 42917^s,6 = 11^h 55^m 17^s,6 \approx 12^h$. «Молния» — полу-

суточный спутник. 5. У спутника, движущегося по круговой орбите, центростремительная сила равна силе гравитационного притяжения, что дает $v^2 = \frac{GM}{r}$. Обозна-

чим через E_k и E_n кинетическую и потенциальную энергии в расчете на единицу массы спутника. Тогда последнее равенство можно записать так: $2E_k + E_n = 0$. Пусть E — полная энергия спутника ($E = E_k + E_n$). Эти соотношения дают $E = -E_k$; $E = E_n/2$; $E_k = -E_n/2$, откуда $\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial E_k}{\partial t}$. Равенство означает, что темп расходования энергии на трение о воздух $\frac{\partial E}{\partial t}$ (отрицательная величина — энергия расходуется)

равен темпу прироста кинетической энергии спутника $\frac{\partial E_k}{\partial t}$ (положительная величина). Очевидно, что эта энергия может быть взята только из потенциальной энергии спутника — другого источника нет. Действительно, $\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial E_n}{\partial t}$ и $\frac{\partial E_k}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{\partial E_n}{\partial t}$,

так что кинетическая энергия спутника возрастает за счет половины выделяющейся гравитационной энергии, вторая половина переходит в тепло. Таким образом, получается, что при трении спутника о воздух и его снижении скорость спутника должна возрастать (вириальный парадокс). Это же следует из формулы (2.24) для круговой скорости спутника. Осталось выяснить, какая сила совершает работу по увеличению скорости. Очевидно, что это работа силы тяготения, ведь даже при очень медленном снижении спутника движется по спирали, следовательно, всегда есть составляющая гравитационной силы, направленная вдоль скорости спутника, которая больше силы сопротивления воздуха. 6. См. предыдущую задачу. Линей-

ная скорость $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$; угловая скорость $\omega = \frac{v}{r} = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$. Очевидно, что обе скорости возрастают. 7. Приливы и отливы могут наблюдаться не только на Земле

(вызываемые притяжением Луны и Солнца). Если сила тяжести значительно изменяется на расстоянии ~ 1 м, приливы будут возникать и в теле человека. Действительно, приливное ускорение, вычисляемое как разность гравитационных ускорений двух разных точек одного и того же тела: $a = \omega_A - \omega_B = GM \left(\frac{1}{(r-l)^2} - \frac{1}{r^2} \right) \approx$

$\approx GM \frac{2l}{r^3}$, где M — масса звезды; l — характерный размер тела космонавта; r — расстояние от космического аппарата до центра звезды. При перегрузке $2g$ находим $GM \frac{2l}{r^3} = 2g$; $r = \left(\frac{GM \cdot l}{g} \right)^{1/3}$. Считая характерным размером тела человека

$l \approx 1$ м, получаем $r \approx 3000$ км. 8. Чтобы затраты энергии были минимальными, запуск должен быть осуществлен строго в направлении движения Земли (см. вывод третьей космической скорости). Звездолет необходимо запустить 21 марта в 6^h утра по местному времени в плоскости небесного меридиана под углом $h = 90^\circ - \varphi - \varepsilon = 90^\circ - 55^\circ - 23^\circ 26' = 11^\circ 34'$ к горизонту. 9. Определим параметры орбиты спутника: $r_Q = R_\oplus + h_Q = 6371 + 330 = 6701$ км; $r_q = R_\oplus + h_q = 6371 + 180 = 6551$ км; $a = (r_Q + r_q)/2 = 6626$ км. Из интеграла движения $v^2 = GM_\oplus \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$ получим скорости

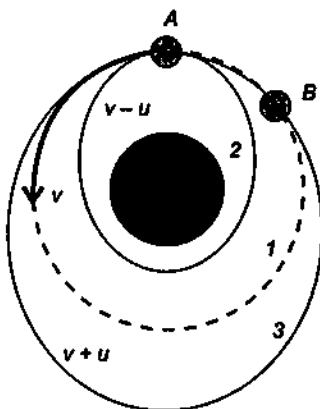
спутника (и космического корабля) в апогее и перигее: $v_Q = 7684$ м/с; $v_q = 7860$ м/с. Разность между второй космической и полученными скоростями будет: $\Delta v_Q = 10\,918 - 7684 = 3234$ м/с; $\Delta v_q = 11\,040 - 7860 = 3180$ м/с. Таким образом, лучшей точкой для старта космического корабля является перигей орбиты. 10. Радиус орбиты определяется по формуле $r = \frac{vT}{2\pi} = 10\,313\,240,3$ м, масса планеты — по урав-

нению $\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM}{r^2} \Rightarrow M = \frac{r \cdot v^2}{G} = \frac{v^3 \cdot T}{2\pi G} \approx 1,25 \cdot 10^{25}$ кг. Плотность вещества

$\rho = \frac{3M}{4\pi(r-h)^3} \approx 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³. 11. Решение задачи проиллюстрировано на рисунке.

Если бросить контейнер против движения спутников, суммарная скорость его движения в точке A будет $(v-u) < v$, период такого его движения (по эллиптической орбите) будет меньше, чем по круговой орбите. Следовательно, контейнер и спутник B встретятся в точке A только после нескольких оборотов спутника. Если бросить контейнер по движению спутников, суммарная скорость его движения в точке A будет $(v+u) > v$, период его движения (по эллиптической орбите) будет больше, чем по круговой орбите. При соответствующем подборе относительной скорости контейнера u возможна встреча спутника B и контейнера в точке A после одного оборота контейнера. Таким образом, контейнер нужно бросить по движению спутников. 12. Размер наименьших деталей на Земле l , которые можно сфото-

графировать из космоса, определяется угловым размером диска дрожания звезды. Примем его значение равным $1''$. Тогда при расстоянии 200 км от поверхности Земли получаем $l = 200 \text{ км} / 206\,265 \approx 97 \text{ см}$.



1 — движение спутников со скоростью v по круговой орбите; 2, 3 — движение контейнера со скоростью $(v-u)$ и $(v+u)$

3.1. Астрофизика планет и звезд

1. Приравниваем объемы земного шара и проволоки: $\frac{4\pi}{3} R_{\oplus}^3 = \frac{\pi}{4} d^2 r$ (d — диаметр

проволоки; r — расстояние до одного из указанных в условии объектов). Отсюда

$$d = \sqrt{\frac{16}{3} \cdot \frac{R_{\oplus}^3}{r}}, \text{ т.е. } d \sim r^{-1/2}. \text{ Подставляя числа, находим диаметры «проволоки»,}$$

протянутой до Солнца ($d = 96 \text{ км}$); $\alpha \text{ Сеп}$ ($d = 183 \text{ м}$); туманности Андромеды ($d = 25 \text{ см}$). Это значительные размеры (неожиданно «большие»), исходя из масштабов человеческого тела ($\sim 1 \text{ м}$). Но если исходить в первом случае из естественного масштаба в Солнечной системе, который задается ее собственным размером ($\sim 10^{13} \text{ м}$), получим более правильную относительную оценку. Диаметр такой «проволоки» ($\sim 10^5 \text{ м}$) составляет всего 10^{-8} размера Солнечной системы. Толщина, например, человеческого волоса $\sim 0,1 \text{ мм} = 10^{-4} \text{ м}$. Это 10^{-4} характерного размера тела человека. Поэтому в относительных единицах волос на четыре порядка толще воображаемой космической «проволоки» длиной 1 а.е. 2. На Земле живут $\sim 6 \cdot 10^9$ человек, а количество звезд в Галактике $\sim 10^{11}$. Число галактик в наблюдаемой части Вселенной того же порядка: $\sim 10^{10}$ – 10^{11} . В нашей Галактике на одного человека приходится всего несколько десятков звезд, а во всей Вселенной — не более сотни галактик. 3. На каждого землянина в Галактике приходится несколько десятков звезд (см. предыдущую задачу). Комаров на каждого жителя Земли приходится гораздо больше. 4. Деревьев в сибирской тайге больше, чем звезд в Галак-

тике. Площадь сибирской тайги $\sim 10^7 \text{ км}^2$. На одно дерево в тайге приходится менее 100 м^2 (10^{-4} км^2), значит, деревьев гораздо больше чем 10^{11} . 5. В трехатомной молекуле H_2O на каждый атом приходится в среднем по 6 нуклонов, или по $6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-27} \sim 10^{-26} \text{ кг}$. Поэтому в 1 дм^3 воды содержится 10^{26} атомов. Если принять, что во Вселенной $\sim 10^{21}$ – 10^{22} звезд (см. предыдущие задачи), то диаметр капли воды, в которой такое же количество атомов, оказывается ~ 2 – $4,5 \text{ мм}$. Таким образом, звезд в видимой части Вселенной и атомов в капле воды сравнимое количество.

6. Сила Кулона в атоме водорода $F_k = k \frac{e^2}{r_1^2} = 0,82 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ — заряд

электрона; $r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ — боровский радиус атома водорода). Сила гравитационного взаимодействия космонавтов $F_g = G \frac{m^2}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ ($m = 100 \text{ кг}$ — масса

каждого космонавта; $r = 1 \text{ м}$ — расстояние между ними). Ньютонова сила больше кулоновой всего в ~ 8 раз. 7. Если бы звезды заполняли бесконечное евклидово пространство в среднем равномерно, то небо было бы таким же ярким, как диск Солнца. Действительно, телесный угол, под которым видны диски звезд, находящихся между r и $r + dr$, равен объему шарового слоя $4\pi r^2 dr$, умноженному на число звезд в единице объема N и на телесный угол, под которым видна каждая звезда (предполагаем, что все они одинаковы; отказ от этого предположения не меняет конечного заключения), $\pi \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$, где r_0 — радиус звезды. Итак, звезды из шарового

слоя ($r, r + dr$) занимают на небе телесный угол $4\pi^2 r_0^2 \cdot N \cdot dr$. При интегрировании по r (полагая, что Вселенная безгранична) получается бесконечный телесный угол, так что диски звезд должны перекрываться, полностью закрывая собой небо. Если бы мир был так устроен, то день не отличался бы от ночи. Это знаменитый фотометрический парадокс Ольберса (в 1744 г. швейцарский астроном де Шезо и независимо от него в 1826 г. Ольберс сформулировали этот парадокс, который привел к кризису наивных космологических моделей). Из того, что по ночам темно, можно сделать весьма важный вывод о строении Вселенной: сделанные выше предположения о стационарности и безграничности видимой части Вселенной не выполняются. Разрешение фотометрического парадокса Ольберса в том, что Вселенная расширяется, поэтому нужно учитывать красное смещение. Согласно закону Хаббла, чем дальше находятся участки Вселенной, тем быстрее они от нас удаляются; галактики представляются нам такими, какими они были в далеком прошлом, поскольку свету от них требуется время, чтобы дойти до нас. Наблюдая самые далекие объекты, мы видим, как они разлетаются со скоростями, которые все ближе к непреодолимому барьеру — скорости света. Существуют квазары, которые удаляются со скоростью $285\,000 \text{ км/с}$! Если бы мы могли увидеть объекты, удаляющиеся со скоростью света, то они выглядели бы так же, как у истоков Вселенной. Не все объекты во Вселенной можно будет когда-нибудь увидеть. Свет от

объектов, расположенных дальше определенного расстояния, не успевает дойти до нас, они навсегда скрыты от нашего взора. Таким образом, видимая часть Вселенной оказывается конечной (вот выход из парадокса Ольберса). Очевидно, что Вселенная к тому же эволюционирует, как следует из закона Хаббла и теории эволюции звезд. 8. Записываем закон сохранения энергии для вещества вулканов:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GmM}{R} = -\frac{GmM}{R+h} \quad (m \text{ — масса выброшенного вещества; } M \text{ и } R \text{ — масса и радиус}$$

Ио; h — высота выброса; v — скорость выброса). Получаем: $h = \frac{v^2 R^2}{2GM - v^2 R} \approx 326 \text{ км.}$

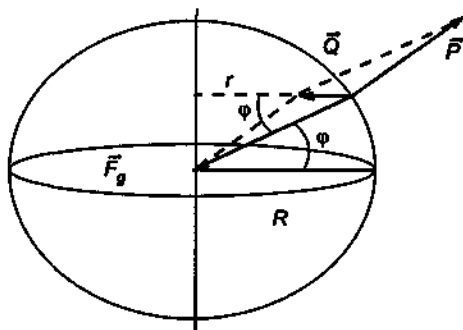
9. На полюсе вес тела массой m (равный силе реакции опоры) равен силе тяготения: $F_g = P_1$, а на экваторе их разность представляет собой центростремительную силу: $mv^2/R = F_g - P_2$ (v — скорость, с которой тело обращается на экваторе вокруг оси планеты; R — радиус планеты массой M). Поскольку по условию $P_1 = 2 P_2$, получаем: $v^2 = \frac{GM}{2R} = \frac{4\pi^2 R^2}{T^2}$. Отсюда период вращения планеты $T = \sqrt{\frac{6\pi}{G\rho}} = 2^h 41^m 45^s, 7$.

10. Векторная сумма силы тяготения $\vec{F}_g$ и силы реакции опоры $\vec{P}'$ (равной по модулю весу тела $\vec{P}' = -\vec{P}$) дает центростремительную силу (см. рисунок, представленный ниже), благодаря которой тело совершает обороты вокруг оси вращения Земли: $\vec{Q} = \vec{F}_g + \vec{P}'$, поэтому на основании теоремы косинусов можно записать:

$$P'^2 = F_g^2 + Q^2 - 2F_g Q \cdot \cos \varphi \approx F_g^2 \left(1 - 2 \frac{Q}{F_g} \cos \varphi\right), \text{ так как } Q \ll F_g. \text{ Делая следующе}$$

ее упрощение, находим $P' \approx F_g \left(1 - \frac{Q}{F_g} \cos \varphi\right)$, а так как $Q = m\omega^2 R \cdot \cos \varphi$, $F_g = mg_0$

(m — масса тела; ω — угловая скорость вращения Земли; R — радиус Земли; φ — широта; g_0 — ускорение свободного падения на полюсе), то получаем $|P| = P' \approx m(g_0 - \omega^2 R \cdot \cos^2 \varphi)$.



Определение веса тела в зависимости от географической широты

11. 1. Когда источник окажется в точке O (см. рис. в условии задачи), до наблюдателя P дойдет электромагнитная волна, испущенная в точке U , такой, что $UO = vt$;

$$UP = ct; \cos(\theta) = v/c. \text{ Из формулы (3.35) получаем } \omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta \cdot \cos\theta} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\beta^2}} =$$

$= 5 \cdot 10^{10}$ рад/с. 2. Когда наблюдатель увидит источник в точке O , до него дойдет электромагнитная волна, испущенная источником именно в точке O (источник будет находиться значительно правее этой точки). При $\theta = 90^\circ$ по формуле (3.35) получаем $\omega = \omega_0 \sqrt{1-\beta^2} = 1,8 \cdot 10^{10}$ рад/с. 12. Из формулы Погсона $m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \lg \frac{E_1}{E_2}$

определяем, во сколько раз освещенность, создаваемая звездой с $m_1 = 0^m$, отличается от освещенности, создаваемой звездой с $m_2 = 10^m$. 5. Получаем $E_1/E_2 = 15848,93$. По условию суммарное количество энергии, падающей на Землю от звезд со звездными величинами 0^m и 10^m , 5, одинаково, т.е. $n_1 E_1 = n_2 E_2$, поэтому получаем $n_1 = n_2 / 15848,93 = 546\,000 / 15848,93 \approx 34,45 \approx 35$ звезд. 13. См. предыдущую задачу. $\lg(E_1/E_2) = 2,984$; $(2000 \cdot E_2)/E_1 \approx 2,075$ раза. 14. Из формулы (3.36) получаем, что газ приближается к нам со скоростью $v = \frac{|\Delta\lambda|}{\lambda} c \approx 698$ км/с. 15. Рассмотрим

относительное движение звезд и запишем для него интеграл движения: $v_{\text{отн}}^2 = 2GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{d} \right) = \frac{2GM}{d}$, где M — масса каждой звезды; d — расстояние между

ними. Очевидно, что $v_{\text{отн}} = 2v$ (v — скорость каждого компонента относительно земного наблюдателя). Согласно эффекту Доплера смещение линий в спектре приближающейся звезды $\lambda_1 - \lambda = -\lambda \frac{v}{c}$, а удаляющейся — $\lambda_2 - \lambda = \lambda \frac{v}{c}$, поэтому

максимальное расщепление спектральных линий $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_m = \frac{2v}{c} = \frac{v_{\text{отн}}}{c}$. Получаем

выражение для массы: $M = \frac{d \cdot c^2}{2G} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_m^2$. Остается определить расстояние между

звездами. Выразим относительную скорость через период движения T : $v_{\text{отн}} = \frac{2\pi}{T} d$. Поскольку $T = 2\tau$, получаем формулу для расстояния между звездами:

$d = \frac{c\tau}{\pi} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_m$, что дает значение $d \approx 2,97 \cdot 10^{10}$ м. Подставляя это выражение

в формулу для массы, получаем $M = \frac{c^3 \tau}{2\pi \cdot G} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_m^3 \approx 2,89 \cdot 10^{29}$ кг. 16. При попереч-

ном ($\theta = 90^\circ$) эффекте Доплера выражение для частоты $\nu = \nu_0 \sqrt{1-\beta^2} \approx \nu_0 (1-\beta^2/2)$

или $\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{\beta^2}{2}$, а для длины волны $-\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\beta^2}{2}$. Скорость атомов водорода определяется через кинетическую энергию: $v^2 = \frac{2T}{m_p}$, где $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг — масса протона (1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). В результате получаем $\Delta \lambda = \frac{T \cdot \lambda_0}{m_p \cdot c^2} \approx 0,698$ нм. 17. Формула Погсона для двух компонентов $\lg \frac{E_1}{E_2} = 0,4(m_2 - m_1) = 0,8$, т.е. $E_1/E_2 = 6,3096$;

для двойной звезды $\lg \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \lg \left(\frac{E_1}{E_2} + 1 \right) = 0,4(m_2 - m) = 0,8639$. Отсюда $m = 1^m,84$.

18. См. предыдущую задачу. $\lg \left(\frac{E_2}{E_1} + 1 \right) = 0,4(m_1 - m) = 0,104$; $E_2/E_1 = 0,2706$; $\lg \frac{E_1}{E_2} =$

$= 0,4(m_2 - m_1) = 0,5677$; $m_2 \approx 1^m,74$. 19. Из фотометрии известна формула зависимости освещенности, создаваемой точечным источником, от его силы света: $E = \frac{I \cdot \cos i}{r^2}$, где I — сила света источника, i — угол падения излучения на измерительную площадку (0°), r — расстояние от источника до площадки измерительного прибора. Следовательно, источник, сила света которого 1 кд, создаст освещенность $E_1 = 10^{-6}$ лк (в первом случае), $E_2 = 1$ лк (во втором случае). Сравним эти освещенности с освещенностью, создаваемой звездой 6-й величины: 1) $\lg \frac{E_1}{E_2} =$

$= 0,4(6 - m_1) = 2,097$; $m_1 \approx 0^m,76$; 2) $m_2 \approx -14^m,24$. 20. В любой момент времени t и в любой точке орбиты (при любом радиус-векторе r) планета за малый промежуток времени dt получит поток энергии $dW = \frac{P \cdot S}{4\pi \cdot r^2} dt$. Так как $dt = \frac{dl}{v} = \frac{r \cdot d\theta}{v}$,

а также поскольку из второго закона Кеплера (2.7) $r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const}$ следует $r \cdot v = \text{const} \Rightarrow v = \frac{r_0 \cdot v_0}{r}$, получаем $dt = \frac{r^2 \cdot d\theta}{r_0 \cdot v_0}$. Таким образом, $dW = \frac{P \cdot S}{4\pi \cdot r_0 \cdot v_0} d\theta$.

Интегрируя по $d\theta$ в пределах $0-2\pi$, получаем $W = \frac{P \cdot S}{2 \cdot r_0 \cdot v_0}$. 21. Из формулы Погсона, а также учитывая, что освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника света и расстояние от Солнца до Нептуна $r_H \approx 30$ а.е., получаем звездную величину Солнца, видимого с Нептуна: $m_H \approx -19^m,3$. Таким же образом с помощью формулы Погсона сравниваем освещенности от Солнца и

Сириуса ($m \approx -1^m,46$) на Нептуне: $E_{\odot}/E_s \approx 1,386 \cdot 10^7$. 22. Освещенность абсолютно черного тела, согласно формуле (3.7), определяется яркостью источника (Солнца) и телесным углом, под которым он виден на небесной сфере, поэтому можно записать: $E \sim L_{\odot} \cdot \omega = \frac{L_{\odot} \cdot \pi R_{\odot}^2}{r^2}$. Эта же энергия, умноженная на подсолнечную площадь

тела, излучается, согласно закону Стефана—Больцмана, пропорционально T^4 . Следовательно, $T \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$. 23. Если солнечная постоянная для Земли рассчитывается

как $Q_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r_{\oplus}^2}$ ($L_{\odot}$ — светимость Солнца; $r_{\oplus}$ — среднее расстояние от Земли до

Солнца), то для Меркурия $Q_M = \frac{L_{\odot}}{4\pi r_M^2}$ (r_M — среднее расстояние от Меркурия до

Солнца). Отсюда $Q_M = Q_{\oplus} \left(\frac{r_{\oplus}}{r_M} \right)^2$. Световой поток, падающий на шар радиусом R ,

$\Phi = Q_M \pi R^2$, переизлучается согласно закону Стефана — Больцмана, поэтому

$4\pi R^2 \sigma T^4 = Q_M \pi R^2$. В итоге $T = \sqrt[4]{\frac{Q_{\oplus}}{4\sigma}} \cdot \sqrt{\frac{r_{\oplus}}{r_M}} \approx 447,32$ К. 24. По формуле (3.7) полу-

чаем $E = B \cdot \omega$. Рассчитаем телесный угол, под которым Солнце видно на небе Меркурия в зените: $\omega = \frac{\pi R_{\odot}^2}{r^2}$ ($R_{\odot} = 696\,000$ км — радиус Солнца; $r = 57,91 \cdot 10^6$ км —

расстояние от Солнца до Меркурия). Получаем $E \approx 6,81 \cdot 10^5$ лк. 25. Если освещенность поверхности планеты определяется как $E = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2}$ (см. задачу 23), то ее свети-

мость (фотометрическое понятие, а не астрономическое) $M = kE$ (k — коэффициент отражения поверхности). Тогда отраженный поток, идущий от планеты к Земле,

$\Phi_{\oplus} \sim M \frac{\pi R_{\oplus}^2}{\rho^2}$, освещенность поверхности Земли от этой планеты $E_{\oplus} \sim \frac{M}{\rho^2} \sim \frac{1}{r^2 \rho^2}$.

Используя формулу Погсона, получаем $\lg \frac{E_{\oplus}}{E_{\odot}} = 0,4(m - m_0) = 2 \cdot \lg \frac{r\rho}{r_0\rho_0}$. Оконча-

тельно имеем $m = m_0 + 5 \cdot \lg(r\rho) - 5 \cdot \lg(r_0\rho_0)$. 26. $m = -1^m,14$ (см. предыдущую задачу). 27. Определяем параболическую скорость для кометного ядра массой M :

$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = R \sqrt{\frac{8\pi \cdot G\rho}{3}} = 6,14 \cdot 10^{-2}$ м/с. Теперь получаем значение средней квад-

ратичной скорости молекул циана: $v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3R_0 T}{\mu}} = 673,45$ м/с (R_0 — универсальная

газовая постоянная; T — абсолютная температура, μ — молярная масса циана). Поскольку $v_{\text{кн}} \gg v_2$, все молекулы CN сразу покинут ядро кометы. 28. Моделируя Солнце абсолютно черным телом, запишем выражение для его светимости:

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \cdot \sigma T^4. \text{ Тогда солнечная постоянная } Q = \frac{R_{\odot}^2}{r_{\odot}^2} \sigma T^4 \quad (R_{\odot} \text{ и } T \text{ — радиус и эф-}$$

фективная температура Солнца; $r_{\odot}$ — астрономическая единица). Продифференцировав, получим $\frac{dT}{dQ} = \frac{1}{4} \cdot \frac{T}{Q}$; $\Delta T = \frac{dT}{dQ} \Delta Q = \frac{T}{400} \approx 14,5 \text{ К}$ (здесь учитываем, что

$\Delta Q = 0,01 \cdot Q$). 29. Поскольку $R_{\odot} = r_{\odot} \cdot \operatorname{tg} \varphi$ ($R_{\odot}$ и φ — линейный и видимый радиусы Солнца; $r_{\odot}$ — астрономическая единица), дифференцируя, получаем $\frac{dR}{d\varphi} =$

$$= r \frac{1}{\cos^2 \varphi} = r \cdot (\operatorname{tg}^2 \varphi + 1). \text{ Следовательно, доступное измерению малое изменение}$$

$$\text{радиуса } \Delta R = \frac{dR}{d\varphi} \Delta \varphi = \left(\frac{R^2}{r} + r \right) \Delta \varphi = 72,53 \text{ км, которое произойдет за 2072 года.}$$

30. Рассчитаем потенциальную энергию шарового слоя толщиной dr , находящегося на расстоянии r от центра Солнца, массой $m_{dr} = \rho \cdot 4\pi r^2 \cdot dr$: $dU_{dr} = -G \frac{m_{dr} \cdot m_r}{r}$

($m_r = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$ — масса шара радиусом r внутри Солнца). Получаем $dU_{dr} = -G \times$

$$\times \frac{3M_{\odot}^2}{R_{\odot}^6} r^4 dr. \text{ После интегрирования по радиусу от 0 до } R_{\odot}: U = -\frac{3}{5} G \frac{M_{\odot}^2}{R_{\odot}} =$$

$$= -2,3 \cdot 10^{41} \text{ Дж. Работа } A = |U|. \text{ 31. Определяем, с какой силой притягивается внут-}$$

ренний слой шара толщиной dr , находящийся на расстоянии r от центра, внутренним шаром радиусом r (сила притяжения со стороны внешнего шарового слоя

($R-r$) равна нулю): $dF = G \frac{dm \cdot m}{r^2}$, где $dm = \rho \cdot 4\pi r^2 dr$; $m = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$. Давление, кото-

рое оказывает этот слой на внутренний шар, будет $dP = \frac{dF}{4\pi r^2} = \frac{4\pi}{3} G \rho^2 r \cdot dr$. Инте-

грируя по радиусу в пределах $r - R$, определяем давление, которое оказывает слой

($R-r$) на шар радиусом r : $P = \frac{3}{8\pi} G \frac{M^2}{R^4} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$. Подставляя $r = 0$, $M_{\odot} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$,

$R_{\odot} = 6371 \text{ км}$, получаем гравитационное давление в центре Земли: $P \approx 1,74 \cdot 10^6 \text{ атм}$.

32. $\lg(D'') = \lg(\pi'') + \lg(R) - 2,031$. 33. В подсолнечной точке темп притока энергии

равен $(1 - \rho) \cdot E_0$, где $\rho \approx 0,07$ — альбедо Луны; $E_0 = 1360 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная по-

стоянная. Отток энергии происходит за счет излучения нагретого поверхностного

слоя почвы (в ИК диапазоне), темп которого равен σT_s^4 , где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана — Больцмана; T_s — температура поверхности Луны. Приравнявая темпы нагрева и охлаждения, получаем $\sigma T_s^4 = (1 - \rho) \cdot E_0$, откуда $T_s \approx 386,5 \text{ К}$.

или $113,5$ по Цельсию. 34. На единицу поверхности планеты в подсолнечной точке падает поток $\Phi = (R_*/d)^2 \sigma T_*^4$ (R_* — радиус звезды; d — расстояние от нее до планеты). Из этого потока доля $(1 - A)$, поглощаемая поверхностью планеты, расходуется на ее нагрев. Приравнявая скорости притока и оттока тепла в подсолнечной точке, получаем $(1 - A) \left(\frac{R_*}{d} \right)^2 \sigma T_*^4 = \sigma T_{\text{пл}}^4$, откуда для температуры $T_{\text{пл}}$ в под-

солнечной точке находим $T_{\text{пл}} = (1 - A)^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{R_*}{d}} \cdot T_*$. Значение d определяем, приравнявая центростремительную силу к силе притяжения планеты к звезде.

Получаем $d = \sqrt[3]{\frac{GM}{4\pi^2}} \cdot P^{2/3}$ (P — период обращения планеты). Это можно было бы

записать из третьего закона Кеплера: $P^2 \sim r^3$. Подставляя это выражение для d че-

рез P в формулу для $T_{\text{пл}}$, получаем $T_{\text{пл}} = \left(\frac{3\pi}{G\bar{\rho}_*} \right)^{1/6} (1 - A)^{1/4} \frac{T_*}{P^{1/3}}$. Единственный па-

раметр звезды помимо ее температуры, который входит в эту формулу, — это ее средняя плотность $\bar{\rho}_*$. По условию задачи температура на планете должна быть такой же, как на Луне. Последнюю, очевидно, также можно определить по полученному выражению, в котором $T_* = T_\odot$ и $\bar{\rho}_* = \bar{\rho}_\odot$, а P равно 1 году. Приравнявая температуры на планете и на Луне, для периода обращения планеты (в годах) получа-

ем формулу $P = \sqrt{\frac{\bar{\rho}_\odot}{\bar{\rho}_*}} \left(\frac{T_*}{T_\odot} \right)^3$. Подставив числа, найдем, что для звезды класса A0

($T_* = 10\,000 \text{ К}$, $\bar{\rho}_* = 0,3 \text{ г/см}^3$) период составляет около 10 лет. Так как величина па-

дающего потока пропорциональна косинусу зенитного расстояния звезды z , то зависимость температуры на поверхности планеты, лишенной атмосферы, от z имеет вид $T_{\text{пл}}(z) = T_{\text{пл}}(0) \cdot \sqrt[4]{\cos(z)}$. Выражение для P , полученное выше, дает продол-

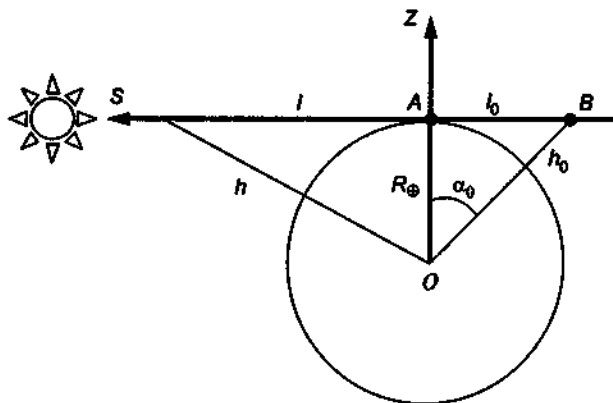
жительность года на планете с тем же температурным режимом, что и у Земли, которая обращается вокруг звезды с известной температурой и средней плотностью. Оказывается, например, что если бы Земля обращалась не вокруг Солнца, а вокруг звезды класса *MSV* ($\bar{\rho}_* = 10 \text{ г/см}^3$, $T_* = 2800 \text{ К}$), то, чтобы на ней были «че-

ловческие условия», продолжительность года должна составлять всего ~ 15 зем-

ных суток. 35. Высота однородной атмосферы Земли равна примерно 8 км. Это означает, что плотность воздуха ρ уменьшается с высотой по закону $\rho = \rho_0 e^{-h/8}$

(h — высота, км). Плотность воздуха снижается в 5 раз на высоте около 13 км.

Если масса атмосферы уменьшится в 5 раз, цвет неба станет темно-синим, примерно таким же, каким мы видим его из окна пассажирского воздушного лайнера после того, как он наберет высоту около 13 км. Если масса атмосферы возрастет в 5 раз, небо днем станет желтовато-оранжевым. Это объясняется тем, что вследствие рассеяния Рэлея оптическая толщина атмосферы обратно пропорциональна λ^4 . Для синих лучей она окажется больше единицы. Это излучение будет значительно ослаблено и до поверхности Земли не дойдет. Восход и закат Солнца, по-видимому, видны не будут. При приближении к горизонту диск Солнца будет становиться все менее ярким и до достижения горизонта скорее всего перестанет быть виден. Ночью звезд на небе будет совсем мало и будут они красновато-желтые. Вблизи горизонта, на зенитных расстояниях $z \geq 80-85^\circ$, их не будет видно, так как оптическая толщина по лучу зрения $\tau / \cos z$ будет ≥ 6 . 36. Максимум яркости неба достигается при оптической толщине атмосферы τ порядка единицы. Действительно, если $\tau < 1$, то чем меньше значение τ , тем большая доля фотонов проходит сквозь атмосферу, не рассеиваясь, следовательно, они не дают вклада в яркость неба. Поэтому при малых значениях τ яркость неба возрастает с увеличением τ . При $\tau > 1$ с увеличением τ быстро возрастает доля фотонов, которые, испытав многократные рассеяния в атмосфере, отражаются ею в космическое пространство и не достигают поверхности Земли. Здесь с увеличением τ яркость неба должна снижаться. Однако точный расчет такого значения τ , при котором для заданного зенитного расстояния Солнца падающий на поверхность Земли поток рассеянного атмосферой излучения максимален, является чрезвычайно сложной задачей. 37. Кажется почти очевидным, что при наблюдении с горы Солнце будет ярче, но это неверно. Для наблюдателя A , находящегося на уровне моря, ослабление солнечного излучения атмосферой будет меньше, чем для наблюдателя B , стоящего на горе (см. рисунок).



Наблюдение восхода Солнца на уровне моря (точка A) и с горы высотой h_0 (точка B)

Приведенный ниже расчет показывает, что разница яркости диска Солнца будет весьма ощутимой: на $\lambda \sim 550$ нм (максимум чувствительности глаза) различие будет по меньшей мере 20-кратным. Если атмосфера является однородным сферическим слоем толщиной $h = 8$ км, то для наблюдателя, находящегося в точке A (на уровне моря), длина пути l горизонтального луча в атмосфере определяется так (см. рисунок): $l^2 = (R_{\oplus} + h)^2 - R_{\oplus}^2 = (2R_{\oplus} + h)h \approx 2hR_{\oplus}$, где $R_{\oplus}$ — радиус Земли. Отсюда $l = \sqrt{2hR_{\oplus}} = 320$ км $= 40 \cdot h$. Из этого следует, что на восходе и на закате

Солнце могут скрывать тучи, находящиеся от нас на расстоянии несколько сотен километров. Определяем, что дополнительный путь l_0 , который солнечные лучи проходят в атмосфере, если наблюдать восход с горы высотой h_0 , $l_0 = \sqrt{2h_0R_{\oplus}}$.

При $h_0 = 4$ км получаем $l_0 = l/\sqrt{2}$. Оптическая толщина безоблачной атмосферы по нормали на длине волны $\lambda \sim 550$ нм составляет $\tau \sim 0,1$. По касательной, как мы только что убедились, она должна быть в 40 раз больше, т.е. ~ 4 . Поэтому в момент восхода солнечное излучение на $\lambda \sim 550$ нм ослабляется атмосферой в $\sim e^4 \approx 54,6$ раза.

На пути от A до B луч ослабевает дополнительно в $e^{4/\sqrt{2}} \approx 17$ раз, так что диск Солнца при наблюдении восхода с высокой горы оказывается гораздо менее ярким, чем при наблюдении с корабля. 38. Вычислим освещенность от ночного неба, пользуясь соотношениями между фотометрическими величинами (Φ — световой поток; I — сила света; $S_{\text{тр}}$ — площадь трубы; Ω — телесный угол):

$$E_{\text{н}} = \frac{\Phi}{S_{\text{тр}}} = \frac{I \cdot \Omega}{S_{\text{тр}}} = \frac{I \cdot S_{\text{тр}}}{S_{\text{тр}} \cdot H^2} = \frac{I}{H^2} = \frac{B \cdot S_{\text{тр}}}{H^2} = \frac{B \cdot \pi D^2}{4H^2} = 1,745 \cdot 10^{-7} \text{ лк.}$$

Если пройдет звезда, то $E = E_{\text{н}} + \Delta E = E_{\text{н}} + E_{\text{зв}}$ и $\frac{E_{\text{н}} + \Delta E}{E_{\text{н}}} = \frac{E_{\text{н}} + E_{\text{зв}}}{E_{\text{н}}} = 1 + \frac{E_{\text{зв}}}{E_{\text{н}}}$. Рассчитаем теперь

освещенность от Веги: $\lg \frac{1}{E_{\text{зв}}} = 0,4 \cdot (0,14 + 13,89) = 5,612$ и $E_{\text{зв}} = 2,44 \cdot 10^{-6}$ лк. Отно-

шение освещенностей $\frac{E_{\text{н}} + E_{\text{зв}}}{E_{\text{н}}} \approx 15$, т.е. при прохождении Веги освещенность

возрастет примерно в 15 раз! 39. Для оценки возможности наблюдения воспользуемся формулой Погсона: $\lg \frac{E_1}{E_2} = 2 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} = 0,4(m_2 - m_1)$, где E_1 , m_1 и r_1 — освещен-

ность от Луны, ее звездная величина для наблюдателя на Земле и расстояние от Земли до Луны; E_2 , m_2 и $r_2 = 1 - 0,4 = 0,6$ а.е. — освещенность от Луны, ее звездная величина для наблюдателя на Меркурии и расстояние от Меркурия до Луны. Подставляя значения, получаем $m_2 \approx -0^{\text{m}},74$, т.е. Луна будет видна с Меркурия. Оценим теперь угловое расстояние между Землей и Луной: $\alpha \approx \arctg r_1/r_2 \approx 15',3$, т.е.

глаз наблюдателя может свободно разрешить этот угол. 40. α Cen — звезда $\sim 0^{\text{m}}$.

Значит, фотонный поток от нее составляет $\sim 10^{10}$ фотонов/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Фотонный поток от Солнца в $10^{0,4 \cdot 26,8} \approx 5,25 \cdot 10^{10}$ раз больше и составляет примерно $5,25 \cdot 10^{20}$ фотонов/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Фотонный поток от звезды 25^m в $10^{0,4 \cdot 25} = 10^{10}$ раз меньше и равен 1 фотон/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). 41. Используя формулу (3.21), получаем $R \approx 109,6 \cdot R_{\odot}$; применяя выражение (3.22), имеем $R \approx 265 \cdot R_{\odot}$. 42. $m = 13^m, 2$; $M = 8^m, 2$. 43. Светимость Золотой Рыбы больше светимости Солнца примерно в 478 630,1 раза. 44. $L_1 \approx 0,002 \cdot L_{\odot}$; $L_2 \approx 0,0004 \cdot L_{\odot}$. 45. $M_1 \approx 11^m, 65$; $M_2 \approx 13^m, 45$. 46. $M \approx 3^m, 85$; $L \approx 2,4 \cdot L_{\odot}$. 47. $m'_v = 0^m$ (звезда будет видна). 48. $M \approx -7^m, 48$; $L \approx 81989 \cdot L_{\odot}$. 49. $m'_v = 15^m, 1$ (Вега не будет видна). 50. $M \approx 15^m, 46$; $L \approx 0,000056 \cdot L_{\odot}$. 51. В 10 раз. 52. $m = 1^m, 12$; $T = 3291,7 \text{ К}$ [по формуле (3.22)]. 53. $r = 17,54 \text{ пк}$; $R \approx 61,36 \cdot R_{\odot}$. 54. $r = 6,31 \text{ пк}$; звезда ярче Солнца. 55. $m_v = 0^m, 43$ (звезда будет видна). 56. По формуле Погсона определяем отношение освещенностей от Солнца и Луны при перпендикулярном падении света на освещаемую площадку: $E_{\odot}/E_{\zeta} = 436\,515,83$. Чтобы получить освещенность от реально расположенного светила, нужно умножить ее на косинус угла падения, что при данном расположении лунной орбиты дает $\frac{E'_{\odot}}{E'_{\zeta}} = \frac{E_{\odot} \cdot \cos(z_{\odot})}{E_{\zeta} \cdot \cos(z_{\zeta})} = \frac{E_{\odot} \cdot \cos(\varphi + \varepsilon)}{E_{\zeta} \cdot \cos(\varphi - \varepsilon - i)}$. Подставляя значения ($\varphi = 53^{\circ}, 5$, $\varepsilon \approx 23^{\circ}, 5$, $i \approx 5^{\circ}$ (наклонение орбиты Луны к плоскости эклиптики)), получаем $E'_{\odot} / E'_{\zeta} = 108\,345,86$. 57. По формуле Погсона определяем соотношение между освещенностями: $\lg \frac{E_1 + E_2 + E_3}{E_3} = 0,4 \cdot (3,5 - 1) = 1$; $E_1 = E_2 = 4,5 \cdot E_3$. Далее по формуле Погсона находим: $m_1 = m_2 = 1,87$. 58. На основании закона Доплера получаем скорость приближения звезды: $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 99,4 \text{ км/с}$, а по формуле Погсона — взаимосвязь между расстояниями и звездными величинами в настоящий момент и через время t , когда звезда будет иметь звездную величину $m' = 6^m$ и станет видна невооруженным глазом: $\lg \frac{r - vt}{r} = 0,2(m' - m)$; $r - vt = 0,01 \cdot r$. В результате получаем: $t \approx 3,69 \cdot 10^{12} \text{ с} \approx 1,17 \cdot 10^5 \text{ лет}$. 59. См. решение предыдущей задачи: $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 78,1 \text{ км/с}$; $t = 10^6 \text{ лет} \approx 3,16 \cdot 10^{13} \text{ с}$; $\lg \frac{r + vt}{r} = 0,2(m' - m)$. Отсюда $m' \approx 6,77$ (звезда видна не будет). 60. По формуле Погсона рассчитаем отношение освещенностей, создаваемых вторым и первым компонентами: $E_2/E_1 \approx 0,237$, а затем по соотношению $\lg \frac{E_1 + E_2}{E_1} = 0,4(m_1 - m)$ находим суммарную звездную величину: $m \approx 2^m, 17$. 61. Све-

товой поток, испускаемый Солнцем: $\Phi_{\odot} = \varepsilon_{\odot} \cdot 4\pi R_{\odot}^2$, освещенность, которую Солнце создаст на поверхности Плутино на расстоянии r : $E_{\text{пл}} = \varepsilon_{\odot} \cdot \frac{R_{\odot}^2}{r^2}$. Следовательно,

поток, падающий на планету: $\Phi_{\text{пл}} = E_{\text{пл}} \cdot \pi \frac{D^2}{4} = \varepsilon_{\odot} \cdot \frac{R_{\odot}^2}{r^2} \cdot \pi \frac{D^2}{4}$, а рассеянный

ею: $\Phi_{\text{рас}} = A \cdot \Phi_{\text{пл}} = A \cdot \varepsilon_{\odot} \cdot \frac{R_{\odot}^2}{r^2} \cdot \pi \frac{D^2}{4}$. Предполагая, что поток от Плутино рассеивается в полусферу по направлению к Земле, определяем освещенность, которую

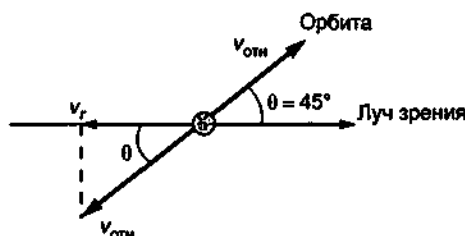
эта планета создаст на Земле в противостоянии (и в перигелии своей орбиты):

$$E_{\oplus} = \frac{\Phi_{\text{рас}}}{2\pi(r_q - r_{\oplus})^2} = \frac{A \cdot \varepsilon_{\odot} \cdot R_{\odot}^2 \cdot D^2}{8 \cdot r_q^2 (r_q - r_{\oplus})^2} \approx 6,78 \cdot 10^{-15} \text{ Вт/м}^2. \text{ Далее по формуле Погсона}$$

получаем: $m = m_{\oplus} + 2,5 \cdot \lg \frac{Q}{E_{\oplus}} \approx 16^m,45$. 62. Прежде всего рассчитаем скорость от-

носительного движения спутника (см. рисунок): $v_{\text{отн}} = \frac{v_r}{\cos \theta} \approx 28,2843 \text{ км/с}$. По-

скольку орбита звезды круговая и компоненты одинаковые, то $m_1 = m_2 = m$. Далее последовательно рассчитываем все необходимые параметры.



Расположение орбиты двойной звезды относительно луча зрения

1. Из интеграла движения (2.14) для круговой орбиты (в скобках указаны единицы измерения): $v_{\text{отн}}^2 = \frac{G}{a(m)} \cdot 2 \cdot m \text{ (кг)}$ или $a(\text{а.е.}) = \frac{2G}{v_{\text{отн}}^2 \cdot 1,496 \cdot 10^{11} \left(\frac{M}{\text{а.е.}} \right)} \cdot m \text{ (кг)}$,

где a — радиус относительной орбиты. На основании третьего закона Кеплера для двойных звезд $2m = m_{\odot} \frac{a^3(\text{а.е.})}{P^2(\text{год})} = m_{\odot} \frac{8G^3}{v_{\text{отн}}^6 \cdot (1,496)^3 \cdot 10^{33} \cdot P^2(\text{год})} m^3$ получаем

выражение для массы компонента:

$$m = \sqrt{\frac{1,496 \cdot 10^{11}}{G} \cdot \frac{v_{\text{отн}}^3 \cdot P(\text{год}) \cdot 1,496 \cdot 10^{11}}{2G}} (m_{\odot})^{-1/2} \approx 5,111 \cdot 10^{30} \text{ кг} \approx 2,57 \cdot m_{\odot}.$$

2. Максимальное собственное движение спутника относительно главной звезды μ возможно, если скорость перпендикулярна лучу зрения. При этом тангенциальная скорость $v_t = v_{\text{отн}}$. Тогда $v_t = v_{\text{отн}} = 4,74 \cdot \frac{\mu}{\pi}$ (км / с); $\pi = 4,74 \cdot \frac{\mu}{v_{\text{отн}}} \approx \approx 0'',0084$.

3. Теперь находим абсолютную звездную величину: $M = m + 5 + 5 \cdot \lg \pi \approx 1,916$. Так как $M_{\odot} = 4^m,8$, то по формуле $\lg \frac{L}{L_{\odot}} = 0,4(M_{\odot} - M)$ получаем $L = 14,24 \cdot L_{\odot}$.

4. Поскольку звезды имеют класс $G2V$, т.е. такой же, как у Солнца, полагаем, что $T \approx T_{\odot}$. Тогда по формуле $R = R_{\odot} \cdot \left(\frac{T_{\odot}}{T_{\text{эф}}} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{L}{L_{\odot}}}$ получаем $R \approx 3,77 \cdot R_{\odot}$.

5. На основании третьего закона Кеплера для двойных звезд $2 \cdot m/m_{\odot} = \frac{a^3(\text{а.е.})}{P^2(\text{год})}$ получаем радиус относительной орбиты: $a \approx 5,7$ а.е. 63. Из равенства

моментов сил получаем соотношение $a_1 \cdot m_1 = a_2 \cdot m_2$, т.е. $a_2 = 50$ а.е. В момент максимального удаления компонентов двойной звезды спутник находится в апоастрее, т.е. расстояние между звездами $Q = a_1 + a_2 = 60$ а.е. Если полуось относительной орбиты обозначить a , то расстояние в периастрее (минимальное расстояние между звездами) будет $q = 2a - Q$. Полуось орбиты получаем из третьего закона Кеплера: $(m_1 + m_2)/m_{\odot} = a^3/P^2$ или $6P^2 = a^3$, т.е. $a \approx 39,15$ а.е. В итоге имеем $q \approx 18,3$ а.е. Расстояния компонентов от центра масс в момент их минимального удаления будут такими: $a'_1/a'_2 = 3,05$ а.е./15,25 а.е. 64. Более 23,1 млн лет. 65. 8,81 св. лет. 66. $E_{\text{сир}}/E_{\text{сн}} \approx 11\,272$. 67. $M \approx +1^m,42$. 68. $M \approx -2^m,70$. 69. По формуле $\lg(r) = 1 + 0,2(m - M)$ находим $r_1 \approx 333$ пк; $r_2 \approx 550$ пк. 70. Необходимо рассчитать показатель цвета $CI = m_p - m_v$ и расставить звезды по такому принципу: чем больше CI , тем звезда более красная.

Звезда	CI	Место	Звезда	CI	Место
Спика	-0,27	1	Арктур	1,12	6-7
Антарес	1,73	8	Ригель	-0,04	2
Альтаир	0,16	3	α Центавра	0,57	4
Канелла	0,67	5	γ Андромеды	1,12	6-7

71. $T_{\text{во}} = 23\,226$ К, $T_{\text{ло}} = 11\,250$ К, $T_{\text{до}} = 5950$ К. 72. Используя формулу (3.21), получаем $R \approx 3,3 \cdot R_{\odot}$; используя выражение (3.22), имеем $R \approx 8,7 \cdot R_{\odot}$. 73. Посколь-

ку $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$, то освещенность, которую создает Арктур, в единицах СИ можно выразить так: $E = 4,466 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$. Определяем видимую звездную величину: $m = m_{\odot} + 2,5 \cdot \lg \frac{Q}{E} \approx -0,59$ ($m_{\odot} = -26^m,8$ — видимая величина Солнца; $Q =$

$= 1360 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная). Абсолютная звездная величина при этом $M = m + 5 + 5 \cdot \lg(\pi) \approx -1^m,075$. В результате температура $T = \frac{5900}{\lg(R/R_{\odot}) + 0,20 \cdot M + 0,02} \approx$

$\approx 4836 \text{ К}$. Используя выражение (3.21), получаем $T \approx 4377 \text{ К}$. 74. Освещенность, которую создает Бетельгейзе, в единицах СИ равна (см. предыдущую задачу):

$E = 5,373 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$. Определяем видимую звездную величину: $m = m_{\odot} + 2,5 \cdot \lg \frac{Q}{E} \approx$

$\approx -0,792$ ($m_{\odot} = -26^m,8$ — видимая величина Солнца; $Q = 1360 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная). Абсолютная звездная величина при этом $M = m + 5 + 5 \cdot \lg(\pi) \approx -5^m,585$. Радиус звезды рассчитываем по формуле (3.24): $\lg(R/R_{\odot}) = \lg d - \lg \pi + 2,031 \approx 2,662$.

В результате $T = \frac{5900}{\lg(R/R_{\odot}) + 0,20 \cdot M + 0,02} \approx 3770 \text{ К}$. Используя уравнение (3.21),

получаем $T \approx 2942 \text{ К}$. 75. Определяем радиус звезды: $\lg(R/R_{\odot}) = \frac{5900}{T} - 0,2 \cdot M -$

$-0,02 \approx -1,724$; $R \approx 0,0189 \cdot R_{\odot}$. Сравнивая массы звезды и Солнца, получаем: $\rho \approx 65 \, 217 \cdot \rho_{\odot}$, а так как $\rho_{\odot} = 1,41 \text{ г/см}^3$, то $\rho \approx 92 \text{ кг/см}^3$. Используя формулу (3.21), имеем $R \approx 0,01444 \cdot R_{\odot}$; $\rho \approx 146135 \cdot \rho_{\odot} \approx 206 \text{ кг/см}^3$. 76. Найдем выраже-

ние для параллакса: $\frac{1}{\pi'} = r' = r \cdot \sin \theta = \frac{1}{\pi} \cdot \sin \theta$; $\pi' = \frac{\pi}{\sin \theta} = \frac{\pi \sqrt{V_i^2 + V_r^2}}{V_i}$. Из условия

постоянства абсолютной звездной величины находим выражение для видимой звездной величины в момент сближения: $m + 5 \lg \pi = m' + 5 \lg \pi'$; $m' = m + 5 \cdot \lg(\sin \theta) =$

$= m + 5 \cdot \lg \frac{V_i}{\sqrt{V_i^2 + V_r^2}}$. Очевидно, что в этот момент $V_r' = 0$; $V_i' = V = \sqrt{V_i^2 + V_r^2}$ (см.

рисунок). А так как $V_i' = 4,74 \cdot \frac{\mu'}{\pi'}$ (км/с), то после подстановки π' и преобразования

получаем: $\mu' = \frac{\pi(V_i^2 + V_r^2)}{4,74 \cdot V_i} = \frac{\mu}{\sin^2 \theta}$. Время сближения получим по соотношению

(см. рисунок к задаче 76) $t = \frac{r \cdot \cos \theta}{V}$ с учетом того, что $V_i = 4,74 \cdot \frac{\mu}{\pi}$ (км/с), $r = \frac{1}{\pi}$ (пк) и

$1 \text{ пак/год} \approx 9,778 \cdot 10^5 \text{ км/с}$: $t \approx \frac{9,778 \cdot 10^5 \cdot V_r}{\pi(V_i^2 + V_r^2)} = \frac{9,778 \cdot 10^5 \cdot V_r \cdot V_i}{4,74 \cdot \mu(V_i^2 + V_r^2)} = \frac{206 \, 265}{\mu} \frac{V_r \cdot V_i}{(V_i^2 + V_r^2)}$

(лет). На рисунке видно, что, если $V_r > 0$, то $t > 0$, и событие произошло в прошлом;

если $V_r < 0$, то $t < 0$, это означает, что звезда наиболее приблизится к Солнцу в будущем. 77. См. решение предыдущей задачи. Угол между лучом зрения и пространственной скоростью $\theta \approx 140^\circ,67 \Rightarrow \pi' \approx 0'',87$; $m' \approx 8'',55$; $\mu' \approx 25'',66$; $V_r' = 0$; $V_t' \approx 139,63$ км/с. Сближение произойдет через $|t| \approx 9808$ лет. 78. Поскольку спектры звезд одинаковы, то их эффективные температуры равны: $T_1 = T_2$. Расстояния от Солнца до звезд (r_1 и r_2) можно считать намного больше расстояния между звездами, поэтому $r_1 \approx r_2$. Следовательно, $M_2 - M_1 = m_2 - m_1 = 10''$; $\lg R_1 - \lg R_2 = 0,2(M_2 - M_1)$ и $R_1 = 100R_2$. В то же время $m_1 = 2m_2$. Таким образом, $\rho_2 = 10^5$ г/см³.

79. По формуле (3.32) получаем: $a = \frac{\alpha''}{\pi''} = 6'',06/0'',076 \approx 79,74$ а.е. $\approx 1,19 \cdot 10^{10}$ км.

Далее определяем абсолютные звездные величины: $M_1 = m_1 + 5 + 5 \cdot \lg(\pi) \approx 1'',404$, $M_2 \approx 2'',204$, а по формуле $\lg \frac{L_1}{L_\odot} = 0,4 \cdot (4,8 - M_1)$ — светимости: $L_1 \approx 22,823 \cdot L_\odot$, $L_2 \approx 10,924 \cdot L_\odot$. Поскольку при равенстве температур (см. предыдущую задачу) верно соотношение $\lg R_1 - \lg R_2 = 0,2 \cdot (M_2 - M_1)$, то получим $R_1 \approx 1,445 \cdot R_2$. Сумму масс рассчитываем по уравнениям (3.31), (3.32): $(m_1 + m_2)/m_\odot = \frac{\alpha^3}{\pi^3 \cdot P^2}$. Получа-

ем: $m_1 + m_2 = 5,414 \cdot m_\odot = 10,774 \cdot 10^{30}$ кг. Из интеграла движения (2.14) следует, что скорость относительного движения определяется по соотношению $V_{\text{отн}}^2 =$

$$\frac{G}{a} (m_1 + m_2) = G \frac{\pi}{\alpha \cdot 1,496 \cdot 10^{11} \text{ (км/а.е.)}} \cdot \frac{\alpha^3}{\pi^3 \cdot P^2} \cdot m_\odot. \text{ Получаем } V_{\text{отн}} \approx 7,76 \text{ км/с.}$$

Поскольку тангенциальная составляющая скорости $V_t = 4,74 \cdot \frac{\mu}{\pi} \approx 12,474$ км/с, пол-

ная пространственная скорость системы $V = \sqrt{V_t^2 + V_r^2} \approx 12,83$ км/с. 80. Из условия

равенства моментов сил $m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$. Поскольку $v_1 = \omega \cdot r_1$ и $v_2 = \omega \cdot r_2$ (ω — угловая скорость движения компонентов относительно центра масс; r_1 и r_2 — расстояния компонентов двойной звезды от центра масс; v_1 и v_2 — скорости компо-

нентов), получаем $m_1/m_2 = r_2/r_1 = v_2/v_1 = k_2/k_1 = 1,21$. 81. Из интеграла движения (2.14) следует, что скорость относительного движения определяется по соотно-

шению $V_{\text{отн}}^2 = \frac{G}{a} (m_1 + m_2)$. Сумму масс рассчитываем по формуле (3.31):

$$(m_1 + m_2)/m_\odot = \frac{a^3}{P^2}. \text{ Получаем } V_{\text{отн}}^2 = G \frac{a^2(365,25)^2}{P^2 \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^3} m_\odot. \text{ Выразив отсюда}$$

радиус орбиты, имеем: $a = V_{\text{отн}} P \frac{1,496 \cdot 10^{11}}{365,25} \sqrt{\frac{1,496 \cdot 10^{11}}{G} (m_\odot)^{-1/2}} \approx 2,66 \cdot 10^{10}$ м =

$= 26,6$ млн км. 82. По формуле связи периода пульсации цефеид и их средней абсолютной звездной величины (3.29) получаем $M_v = -(1,01 + 2,87 \cdot \lg P) = -3^m,105$. Далее по уравнению (3.10) находим $\lg r = 1 + 0,2(m - M) = 2,411$ и $r \approx 258$ пк. 83. По формуле (3.21) получаем $\lg \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{L_1}{L_2} - 2 \cdot \lg \frac{T_1}{T_2}$. Поскольку $\lg \frac{L_1}{L_2} = 0,4 \cdot \Delta m$, то $R_1/R_2 =$

$= 1,52$. 84. Очевидно, что блеск яркой звезды при затмении пропорционален незакрытой площади. Отсюда $\frac{E_{\min}}{E_{\max}} = \frac{R^2 - r^2}{R^2} = k$; $\frac{r}{R} = \sqrt{1 - k}$. 85. Из закона Доплера известно, что $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c}$. Поскольку $\lambda = c \cdot T$ (T — период световой волны), то $\frac{\Delta T}{T} = \frac{V_r}{c}$.

Очевидно, что период колебаний звезды будет изменяться таким же образом, т.е. наблюдаемый период колебаний (звезда удаляется) $P' = P + \Delta P = P \left(1 + \frac{V_r}{c} \right) \approx 3^d 26^s$.

86. Предположим обратное: изменение блеска звезды вызвано приближением к Земле, а не изменением физических характеристик звезды. Тогда из условия постоянности абсолютной звездной величины получим $\Delta m = 5 \cdot \lg \frac{r_1}{r_2}$ и $r_2 = 180$ св. лет.

Расстояние $r_1 - r_2 = 1620$ св. лет звезда за одни сутки не может преодолеть, иначе ей пришлось бы двигаться со скоростью, которая превышает скорость света, т.е. наше предположение не верно. 87. Из формулы связи периода пульсации цефеид и их средней абсолютной звездной величины (3.29) имеем $M_v = -(1,01 + 2,87 \cdot \lg P) \approx -0^m,038$. Далее по уравнению (3.10) получаем $\lg r = 1 + 0,2 \cdot (m - M) \approx 4,028$; $r \approx 10\,654$ пк. 88. Принимая значение постоянной Хаббла $H = 75$ км/(с·Мпк), из закона Хаббла (3.33) находим: $r = \frac{c}{H} \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx 134$ Мпк. 89. $M_v = -(1,01 + 2,87 \cdot \lg P) \approx$

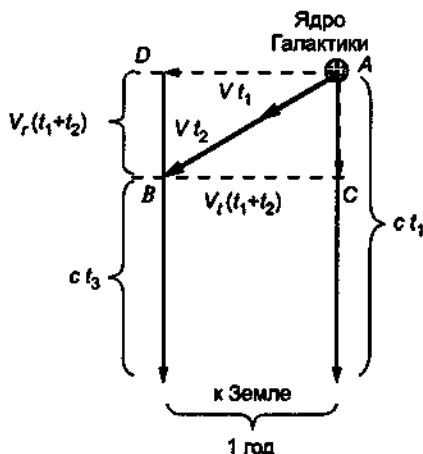
$\approx -4^m,207$; $\lg r = 1 + 0,2(m - M) \approx 5,761$; $r \approx 577\,303$ пк. Линейный диаметр при этом $D = 2r \cdot \lg \frac{d}{2} \approx 10\,076$ пк. 90. Из условия равенства абсолютных звездных

величин получаем $\Delta m = 5 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} = 5 \cdot \lg \left(1 + \frac{\Delta r}{r_1} \right) \approx 0^m,0058$. 91. Принимая значение

постоянной Хаббла $H = 75$ км/(с·Мпк), из закона Хаббла (3.33) находим расстояние до квазара: $r = \frac{c \cdot z}{H} \approx 632$ Мпк. Размер квазара $D = \frac{r \cdot d''}{206\,265''} \approx 3064$ пк.

т.е. примерно в 10 раз меньше диска Галактики. Получаем видимую звездную величину квазара при условии, что он находится в центре нашей Галактики, на расстоянии $r' \approx 8,5$ кпк (расстояние от Солнца до центра Галактики): $\lg \frac{E}{E'} =$

$= 2 \cdot \lg \frac{r'}{r} = 0,4(m' - m)$ или $m' = m + 5 \cdot \lg \frac{r'}{r} \approx -11^m,5$. Это немного больше звездной величины полной Луны ($-12^m,7$). 92. Представленный ниже рисунок поясняет решение задачи. Пусть выброс вещества произошел в ядре Галактики A . Луч света достиг Земли спустя время t_1 (время измеряем в годах), вещество прошло за это время путь $v \cdot t_1$. Спустя год был зарегистрирован другой луч света, который показал смещение выброшенного вещества BC , равное в угловом выражении $9''$. Следовательно, другой луч света был испущен в точке B через интервал времени $(t_1 + t_2)$ после выброса. Луч света шел к Земле из точки B в течение времени t_3 . Таким образом, получаем, что $(t_1 + 1) - t_3 = (t_1 + t_2)$. Если V_r — лучевая скорость вещества, а V_t — тангенциальная, то из рисунка ясно, что $V_r(t_1 + t_2) = c(t_1 - t_3)$. Поскольку $V_r = c \cdot z$, получаем $t_3 = t_1 - \frac{z}{1 - z}$, что дает $t_1 + t_2 = \frac{1}{1 - z} = 2$ года.



Следовательно, учитывая, что от Солнца до центра Галактики примерно 8,5 кпк, получаем $AC = V_r(t_1 + t_2) = c \cdot z(t_1 + t_2) = 1$ св. год $= 9,4605 \cdot 10^{12}$ км; $BC = 8500 \times 9''/206265'' \approx 0,3709$ пк $\approx 1,1444 \cdot 10^{13}$ км. Таким образом, средняя скорость выброшенного вещества $V = \frac{\sqrt{AC^2 + BC^2}}{t_1 + t_2} \approx 235\,258$ км/с. 93. Если считать, что Плутон находится на расстоянии в среднем 39,5 а.е. от Солнца, то освещенность от Солнца на Плуtone в $(39,5)^2 \approx 1560$ раз меньше, чем на Земле. Такому отношению освещенностей соответствует разность звездных величин $2,5 \cdot \lg(1560) \approx 8^m$. На Земле видимая звездная величина Солнца равна $-26^m,8$, на Плуtone она будет $-18^m,8$. Это на 6,1 величины меньше, чем видимая звездная величина Луны на Земле ($-12^m,7$). Таким образом, на Плуtone днем примерно в 275 раз светлее, чем в полнолуние на Земле. 94. Освещенность при полном затмении снижается в 2 раза, потому звездная величина возрастает на $2,5 \cdot \lg 2 \approx 0^m,7526$. 95. Если обозначить

одинаковую для всех звезд освещенность, которую она создаст на Земле, через E , суммарная освещенность, создаваемая всеми N звездами скопления, будет $E_N = N \cdot E$. По формуле Погсона определяем суммарную звездную величину скопления: $m_N = m - 2,5 \cdot \lg \frac{E_N}{E} = m - 2,5 \cdot \lg N$ (m — звездная величина каждой из составляющих его звезд).

В частности, при $N = 2$ имеем $m_2 = m - 0^m,75$ (см. предыдущую задачу), при $N = 10$ получаем $m_{10} = m - 2^m,5$. 96. Пусть N_m — количество звезд ярче звездной величины m , r_m — расстояние до самых слабых из них (видимая звездная величина m зависит только от расстояния до звезды r , так как светимость звезд по условию считается одинаковой). Объем пространства, занятый звездами ярче m -й величины, и их число $N_m \sim r_m^3$. Освещенность от звезды m -й величины $E_m \sim r_m^{-2}$.

Отсюда получаем $\frac{N_m}{N_6} = \left(\frac{E_6}{E_m} \right)^{3/2}$. Перейдем от освещенностей к звездным величинам

согласно формуле Погсона. Поскольку $\frac{E_6}{E_m} = 10^{0,4(m-6)}$, получаем $\frac{N_m}{N_6} = 10^{0,6(m-6)}$.

Однако $10^{0,6} \approx 3,981 \approx 4$, так что $N_m \approx 6000 \cdot 4^{m-6} \approx 1,5 \cdot 4^m$. Любопытно, что и при $m = 0$ эта формула тоже дает осмысленный результат. Расхождение с наблюдениями возникает при высоких значениях m . Согласно такой оценке, при возрастании звездной величины на единицу количество звезд увеличивается в 3,981 раза. По данным, полученным в результате прямого подсчета, этот показатель меньше: около 3. Из полученной выше зависимости между N_m и E_m следует, что $\lg N_m = -\frac{3}{2} \cdot \lg E_m + \text{const}$. 97. Поскольку Европа и Юпитер находятся примерно на

одинаковом расстоянии от Земли, их различие в блеске определяется только разными отражательными свойствами и размерами тел. Так как поверхность Европы покрыта льдом, можно считать, что ее альбедо $A_E = 1$. Получаем $m_E - m_J =$

$$= 2,5 \cdot \lg \left[\frac{A_J}{A_E} \left(\frac{R_J}{R_E} \right)^2 \right] \approx 7^m,6. \text{ Тогда } m_E \approx 7^m,6 - 2^m,5 = 5^m,1. \text{ 98. По формуле Погсона}$$

получаем $\Delta m = 2,5 \cdot \lg \left(\frac{r + \Delta r}{r} \right)^2 = \frac{5}{\lg 10} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right)$. Учитывая, что $\ln(1+x) \approx x$ при

$|x| \ll 1$, находим $\Delta m \approx \frac{5}{\lg 10} \cdot \frac{\Delta r}{r} \approx 2,17 \cdot \frac{\Delta r}{r}$. 99. Абсолютная звездная величина

Солнца $M_v = +4^m,8$. Невооруженным глазом видны звезды до 6-й звездной величины. По формуле Погсона находим $2,5 \cdot \lg \frac{E_r}{E_{10}} = 5 \cdot \lg \frac{10}{r} = M_v - 6^m$; $\lg r = \frac{1}{5} \times$

$\times(6+5-4,8)=1,24$, откуда $r \approx 17,4$ пк. 100. Поскольку $M_{\odot} = +4^m,8$, получаем видимую звездную величину Солнца из туманности Андромеды: $m = M_{\odot} - 5 + 5 \cdot \lg r \approx 29^m$.

Солнце было бы недоступно крупнейшим наземным телескопам ($\leq 28^m$), но теоретически было бы на пределе возможности обнаружения для хаббловского космического телескопа. Практически увидеть Солнце было бы невозможно, так как его излучение сливалось бы со светом от тысяч соседних звезд. 101. Из соотношений светимость—масса $(L_{bol}/L_{\odot}) \approx (m/m_{\odot})^{3,9}$ и светимость—радиус $(L_{bol}/L_{\odot}) \approx (R/R_{\odot})^{5,2}$ для звезд главной последовательности имеем $(m/m_{\odot})^{3,9} \approx (R/R_{\odot})^{5,2} \Rightarrow (m/m_{\odot})^{0,75} \approx R/R_{\odot}$. В то же время $m/m_{\odot} = (R/R_{\odot})^3 \cdot (\rho/\rho_{\odot})$. Получаем $m/m_{\odot} \approx (m/m_{\odot})^{2,25} \times (\rho/\rho_{\odot}) \Rightarrow (\rho/\rho_{\odot}) \approx (m/m_{\odot})^{-1,25}$. При $m \approx 15 m_{\odot} \Rightarrow (\rho/\rho_{\odot}) \approx 0,034$, т.е., учитывая, что $\rho_{\odot} = 1,41$ г/см³, $\rho \approx 0,048$ г/см³. 102. Представляя звезду как абсолютно черное тело, имеем $L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$. Логарифмируя и дифференцируя последнее выражение, получаем $d(\ln L) = 2d(\ln R) + 4d(\ln T_{eff})$ или $\frac{dL}{L} = 2\frac{dR}{R} + 4\frac{dT_{eff}}{T_{eff}}$. Для малых увеличений радиуса и температуры последнее выражение можно замеснить приближенным: $\frac{\Delta L}{L} \approx 2\frac{\Delta R}{R} + 4\frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}}$. Подставляя из условия задачи $\frac{\Delta R}{R} = -\varepsilon$ и $\frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}} = +\varepsilon$,

имеем $\frac{\Delta L}{L} = 2\varepsilon$, т.е. при $\varepsilon = 2\%$ светимость звезды возрастет примерно на 4%.

103. По условию $R_1 = R_2$, поэтому $L \sim T_{eff}^4$. Тогда $M_1 - M_2 = -2,5 \cdot \lg \frac{L_1}{L_2} = -10 \cdot \lg \frac{T_1}{T_2}$.

Если $T_1 = 1,1 \cdot T_2$, то $M_1 - M_2 \approx -0,414$. 104. По условию $R_1 = R_2$, поэтому $L \sim T_{eff}^4$.

Логарифмируя и затем дифференцируя это выражение, получаем $\frac{\Delta L}{L} = 4\frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}}$,

т.е. если светимости двух звезд различаются на 4%, их температуры различаются на 1%. На основании закона смещения Вина $\lambda_{max} \cdot T_{eff} = \text{const}$ получим $\frac{\Delta \lambda_{max}}{\lambda_{max}} = -\frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}}$, так что при увеличении температуры на 1% длина волны максимума в распределении энергии уменьшится на 1%. Изменения интенсивности излучения в максимуме спектра получаем из закона Планка (3.18) $\varepsilon_{\lambda, T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$ с учетом закона смещения Вина: $\varepsilon_{\lambda_{max}, T} \sim \lambda_{max}^{-5}$. Следовательно,

$\frac{\Delta \varepsilon_{\lambda_{max}, T}}{\varepsilon_{\lambda_{max}, T}} = -5 \frac{\Delta \lambda_{max}}{\lambda_{max}} = 5 \frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}}$, т.е. интенсивность в максимуме при увеличении тем-

температуры на 1 % повысится на 5 %. Поскольку интенсивность излучения на определенной длине волны λ_0 в области спектра, где справедливо приближение Рэлея — Джинса, можно выразить формулой $\epsilon_{\lambda_0, T} \approx \frac{2\pi \cdot c}{\lambda_0^4} kT_{\text{эф}}$, т.е. $\epsilon_{\lambda_0, T} \sim T_{\text{эф}}$.

то $\frac{\Delta \epsilon_{\lambda_0, T}}{\epsilon_{\lambda_0, T}} = \frac{\Delta T_{\text{эф}}}{T_{\text{эф}}}$. Следовательно, интенсивность излучения в «области Рэлея —

Джинса» при увеличении температуры на 1 % повысится на 1 %. **105.** Поскольку фотон, обладающий квантовыми свойствами, с энергией $h\nu$ несет импульс $h\nu/c$ в направлении своего полета, то при отражении от фольги (коэффициент отражения считаем равным 1) он передает ей импульс $2h\nu/c$. В то же время световое давление — это световой импульс, передаваемый за 1 с единице площади поверхности. Отсюда получаем выражение для давления: $P = \frac{2L}{c \cdot 4\pi \cdot r^2}$ (L — свети-

мость звезды; r — расстояние до нее). Чтобы фольга с сидящим на ней комаром пренебрежимо малой массы улетела к другим звездам, световое давление должно превышать силу притяжения, приходящуюся на единицу площади. В расчете на 1 м² поверхности фольги толщиной H , которая изготовлена из материала плотностью ρ , сила притяжения $f = G \frac{\rho \cdot H}{r^2} m$ (m — масса звезды). Чтобы фольга могла служить фотонным парусом, на котором можно улететь от звезды в бесконечность, должно выполняться условие $\frac{2L}{c \cdot 4\pi \cdot r^2} > G \frac{\rho \cdot H}{r^2} m$. Откуда сле-

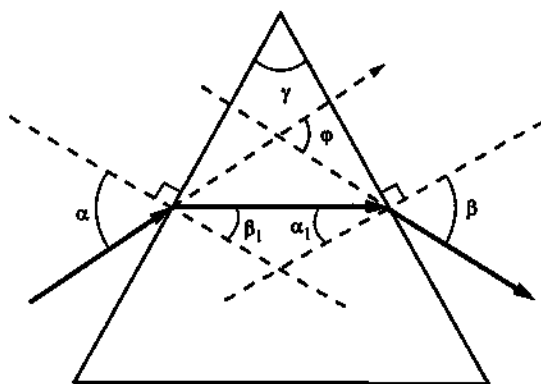
дует $H < \frac{L}{2\pi \cdot G \cdot c \cdot \rho} m^{-1}$. Здесь мы неявно предполагаем, что первоначально фоль-

га покоится относительно звезды. Фольга алюминиевая, так что можно принять $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$. Для звезды класса *O5V* (см. диаграмму Герцшпрунга — Рассела) в среднем имеем $m \approx 40 m_{\odot} \approx 40 \cdot 1,99 \cdot 10^{30} \text{ кг} = 7,96 \cdot 10^{31} \text{ кг}$; $L \approx 5 \cdot 10^5 \cdot L_{\odot} \approx 5 \cdot 10^5 \cdot 3,826 \cdot 10^{26} \text{ Вт} = 1,913 \cdot 10^{32} \text{ Вт}$. Подставив значения, получим, что $H < 7,1 \text{ мм}$. Как видим, в качестве «фольги» можно было использовать металлический лист.

3.2. Астрофизические приборы

1. 11 дюймов = 279,4 мм. Поскольку энергии, воспринимаемые ПЗС-матрицей, в первом и во втором случаях можно считать одинаковыми, то $E_1 D_1^2 t_1 = E_2 D_2^2 t_2$ (E_1, E_2 — освещенности, создаваемые первой и второй звездами; D_1, D_2 — диаметры телескопов; t_1, t_2 — время экспозиций). Далее из формулы Погсона $m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \lg \frac{E_1}{E_2}$ на-

ходим $m_2 = 15''$, 8. $\Delta\varphi \approx 0'',155$; $m \approx 16,875$. 3. Если средний видимый диаметр Луны принять $31'05''$, тогда необходимое увеличение $\Gamma = 31'05''/40'' \approx 46,6$. 4. $d = 2F \cdot \operatorname{tg}(\varphi_\epsilon/2) = 2,29$ см. 5. Поскольку светосила $A = D/F = 1/5$, то $F = 625$ см. Следовательно (см. предыдущую задачу), $d = 2F \cdot \operatorname{tg}(\varphi/2) = 0,7575$ мм. 6. Пусть R — воображаемый радиус небесной сферы. Тогда по суточной параллели звезда за сутки совершает путь $L = 2\pi R \cdot \cos\delta$, а за t секунд такого движения она пройдет путь $l = 2\pi \cdot t \cdot R \cdot \cos\delta / (24 \cdot 60 \cdot 60)$. В угловой мере (в дуге большого круга) это составит: $\varphi = l/R = 2\pi \cdot t \cdot \cos\delta / (24 \cdot 60 \cdot 60)$ радиан, что и является полем зрения телескопа d . Выразим его в угловых секундах: $d = (15 \cdot t \cdot \cos\delta)''$. 7. Определяем угол при смещении микрометра на один шаг: $\operatorname{tg}\varphi \approx \varphi \approx h/F = 7,69 \cdot 10^{-5}$ рад $= 15'',9$. 8. Угол, который проходит звезда вследствие суточного движения, для телескопа с F_1 (см. предыдущую задачу) $\varphi_1 \approx h/F_1$. Этот угол пройден звездой за время t_1 (см. задачу б): $\varphi_1'' = (15 \cdot t_1 \cdot \cos\delta)''$. При использовании другого телескопа эти величины будут $\varphi_2 \approx h/F_2$ и $\varphi_2'' = (15 \cdot t_2 \cdot \cos\delta)''$. Следовательно, $\varphi_1 F_1 = \varphi_2 F_2$; $t_1 F_1 = t_2 F_2$ и $t_2 = 5$ с. 9. Определяем фокусные расстояния телескопов: $F_1 = 64$ см; $F_2 = 320$ см. Чем больше светосила телескопа, тем больше угол его поля зрения, но меньше увеличение при том же окуляре. Таким образом, первый астрограф больше подходит для панорамных съемок, второй — для детальных, т.е. для задач 1, 3, 6 больше подойдет первый астрограф, а для 2, 4, 5 — второй. 10. Ход лучей в призме показан на рисунке, представленном ниже.



Ход луча света в преломляющей призме

Угол отклонения на рисунке обозначен φ . С помощью рисунка легко установить, что $\varphi = \alpha + \beta - \gamma$, а угол преломления $\gamma = \alpha_1 + \beta_1$. На основании закона Снеллиуса можно записать: $\sin\beta_1 = \sin\alpha/n$; $\sin\beta = n \cdot \sin\alpha_1$, где n — показатель преломления. По этим формулам легко рассчитать β_1 , α_1 , β и φ . Получаем для красного света:

$n_k = 1,6$; $\beta_1 = 23^\circ,95$; $\alpha_1 = 29^\circ,05$; $\beta = 50^\circ,98$; $\varphi = 38^\circ 29' 1'',88$; для фиолетового света: $n_\phi = 1,64$; $\beta_1 = 23^\circ,33$; $\alpha_1 = 29^\circ,67$; $\beta = 54^\circ,28$; $\varphi = 41^\circ 46' 33'',74$. 11. 1. Условие главных максимумов для дифракционной решетки: $d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda$ ($d = 1/N = 4 \cdot 10^{-6}$ м — период решетки; φ — угол дифракции; k — порядок спектра). Различие углов дифракции близких длин волн можно определить, продифференцировав указанную формулу: $d \cdot \cos \varphi \cdot \Delta \varphi = k \cdot \Delta \lambda$. Расстояние на фотопластинке между компонентами дублета $\Delta l_k = F \cdot \Delta \varphi = F \frac{k \cdot \Delta \lambda}{d \cdot \cos \varphi}$. Определив углы дифракции для указанных поряд-

ков ($\varphi_1 \approx 4^\circ,45$; и $\varphi_2 = 8^\circ,92$), находим расстояния на фотопластинке: $\Delta l_1 \approx 6,02$ мкм; $\Delta l_2 \approx 12,15$ мкм. 2. Разрешающую способность, которая необходима для разрешения дублета, определяем так: $R_0 = \lambda/\Delta \lambda = 310,154/0,03 = 10\,338,5$. В первом порядке разрешающая способность $R = k \cdot N = k \cdot n \cdot L = 6250$ (дублет разрешен не будет), во втором порядке $R = 12\,500$ (дублет разрешается). 12. Согласно формуле

Погсона определяем освещенность, создаваемую звездой A0: $\lg \frac{E_0}{E_m} = 0,4(m - m_0) =$

$= 0,4 \cdot (10 + 13,89) = 9,556$, или $E_m = 2,78 \cdot 10^{-10}$ лк. Световой поток, падающий на объектив телескопа, определяется как $\Phi_m = E_m \cdot S$ ($S = \pi D^2/4$ — площадь объекти-

ва) и равен: $\Phi_m = 3,41 \cdot 10^{-10}$ лм. Сила фототока $I = \Phi_m \cdot 1200 \frac{\text{мА}}{\text{лм}} \cdot 0,85 \approx 3,5 \cdot 10^{-7}$ мА.

13. При обнаружении камерой препятствия на пути марсохода передатчик сообщит об этом на Землю, Центр управления в ответ пошлет сигнал двигателю аппарата. Сигнал должен поступить до того, как марсоход достигнет препятствия. Поскольку расстояние 1 а.е. свет проходит за ~ 500 с, в период соединения Марса на преодоление расстояния ~ 5 а.е. (путь сигнала туда и обратно) уходит 2500 с. В это время безопасная скорость марсохода не превышает $10/2500$ м/с = 4 мм/с = 24 см/мин. В период противостояний, когда путь сигнала туда и обратно составляет ~ 1 а.е., скорость можно существенно увеличить: $10/500$ м/с = 20 мм/с = 1,2 м/мин. В среднем расстояние между Землей и Марсом $\sim 1,5$ а.е., скорость будет в этом случае не более $10/1500$ м/с ≈ 7 мм/с = 40 см/мин. 14. Расстояние от Земли до Луны равно примерно 400 000 км, разрешение глаза $\sim 1' = 60/206\,265$ рад. Поэтому наименьший линейный размер образований на Луне, различимых невооруженным глазом, составляет $(60/206\,265) \cdot 400\,000 \approx 116$ км. Наибольшие кратеры имеют чуть больший размер и близки к пределу разрешения. 15. Определяем радиус R тела, которое на гелиоцентрическом расстоянии $r = 40$ а.е. (середина пояса Койпера) имсет звездную величину $m = 28^m$. Освещенность от тела на Земле (будем считать, что расстояние от Земли до Солнца намного меньше расстояния до тела)

$E \approx \frac{L}{2\pi r^2} = \frac{A}{2} \left(\frac{R}{r} \right)^2 E'_\odot$, где $L = \pi R^2 \cdot E'_\odot \cdot A$ — «светимость» обращенного к нам по-

лушария тела; A — альбедо тела; $E'_{\odot}$ — освещенность от Солнца на поверхности тела. Освещенности от Солнца на Земле $E_{\odot}$ и на теле пояса Койпера $E'_{\odot}$ относятся как $\frac{E_{\odot}}{E'_{\odot}} = \left(\frac{r}{a}\right)^2$, где $a = 1$ а.е., поэтому $\frac{E}{E_{\odot}} = \frac{E \cdot E'_{\odot}}{E'_{\odot} \cdot E_{\odot}} = \frac{A}{2} \cdot \frac{R^2 a^2}{r^4}$. Обратите внимание, что $E \sim r^{-4}$. С другой стороны, $\frac{E}{E_{\odot}} = 10^{0.4(m_{\odot} - m)}$, где $m_{\odot} = -26^m,8$ — видимая

звездная величина Солнца; m — видимая звездная величина тела ($m = 28^m$ — предел, доступный телескопу Хаббла). Из двух последних выражений получаем $R = \frac{r^2}{a} \sqrt{\frac{2}{A}} \cdot 10^{0.2(m_{\odot} - m)}$. Подставляя величины, находим $R \approx 8,3$ км. Обратите внима-

ние, что $R \sim r^2$, так что на ближнем и дальнем краях пояса Койпера значения R различаются в $(5/3)^2 \approx 2,8$ раза. 16. Площадь зеркала телескопа Кека $S = 78,54 \text{ м}^2$, поэтому с Веги каждую секунду на это зеркало падает $\sim 8 \cdot 10^{11}$ фотонов. Со звезды 30^m телескоп Кека получает в $10^{0.4 \cdot 30} \approx 10^{12}$ раз меньше фотонов, чем с Веги, или примерно 1 фотон в секунду. 17. По формуле $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$ получаем $a_2 = \frac{F \cdot a_1}{a_1 - F} =$

$$= \frac{a_1 \cdot \frac{R}{2}}{a_1 - \frac{R}{2}}; c = \frac{a_1 \cdot \frac{R}{2}}{a_1 - \frac{R}{2}} - l \approx 10,06 \text{ см. Уменьшение при этом } \Gamma = \frac{a_2}{a_1} \approx 0,00125.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Некоторые физические и астрономические постоянные

Постоянная	Значение	Единица измерения
Скорость света в вакууме	299 792 458	м/с
Постоянная гравитации	$6,6726 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Постоянная Планка	$6,624 \cdot 10^{-34}$	Дж·с
Постоянная Больцмана	$1,381 \cdot 10^{-23}$	Дж/К
Постоянная Стефана — Больцмана	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Число Авогадро	$6,02 \cdot 10^{23}$	1/моль
Универсальная газовая постоянная	8,31	Дж/(К·моль)
Единица энергии 1 эВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$	Дж
Масса протона	$1,67 \cdot 10^{-27}$	кг
Масса электрона	$9,11 \cdot 10^{-31}$	кг
Отношение масс протон/электрон	1836	
Заряд протона	$1,6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Потенциал ионизации водорода	13,6	В
Астрономическая единица	$1,49598 \cdot 10^{11}$	м
Световой год	$9,4605 \cdot 10^{15}$	м
Парсек	$3,0857 \cdot 10^{16}$	м
Тропический год	365,2422	ср. солн. сут
Количество секунд в году	$3,16 \cdot 10^7$	с
Экваториальный радиус Земли	6378	км
Сжатие Земли	1/298	
Наклон эклиптики к экватору	$23^\circ 26'$	
Постоянная аберрации	20,496	угл. с
Годичная прецессия по долготе	50,26	угл. с
Масса Солнца	$1,99 \cdot 10^{30}$	кг

Окончание таблицы

Постоянная	Значение	Единица измерения
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$	кг
Отношение масс Солнце/Земля	334 400	
Отношение масс Земля/Луна	81,3	

Элементы планетных орбит

Планета	Большая полуось орбиты		Сидерический период обращения		Синодический период обращения, сут
	а. е.	10^6 км	тропический год	сутки	
Меркурий	0,387 099	57,909	0,240 85	87,969	115,88
Венера	0,723 332	108,209	0,615 21	224,700	583,92
Земля	1,000 000	149,598	1,000 04	365,257	—
Марс	1,523 662	227,937	1,880 89	686,980	779,94
Юпитер	5,203 363	778,412	11,862 56	4332,71	398,88
Сатурн	9,537 070	1426,726	29,458 52	10759,50	378,09
Уран	19,191 263	2871,974	84,013	30 685	369,66
Нептун	30,068 963	4498,257	164,795	60 190	367,49
Плутон	39,481 687	5906,361	248,602	90 800	366,74

Планета	Среднее суточное движение	Эксцентриситет орбиты	Наклонение к эклиптике, град.	Долгота, град.	
				восходящего узла	перигелия
Меркурий	14 732,1626	0,205 631	7,004 87	48,331 67	77,456 45
Венера	5767,6903	0,006 773	3,394 71	76,680 69	131,532 98
Земля	3548,1866	0,016 710	0,000 05	-11,260 647	102,947 19
Марс	1886,5178	0,093 412	1,850 61	49,578 54	336,040 84
Юпитер	299,1200	0,048 393	1,305 30	100,556 15	14,753 85
Сатурн	120,4517	0,054 151	2,484 46	113,715 04	92,431 94

Окончание таблицы

Планета	Среднее суточное движение	Эксцентриси- тет орбиты	Наклонение к эклиптике, град.	Долгота, град.	
				восходящего узла	перигелия
Уран	42,236	0,047 168	0,769 86	74,229 88	170,964 24
Нептун	32,532	0,008 5856	1,769 17	131,721 69	44,971 35
Плутон	14,273	0,248 808	17,141 75	110,303 41	224,066 76

Физические характеристики планет

Планета	Экваториальный радиус		Сжа- тие у полю- сов	Масса		Плот- ность, г/см ³	Гравита- ционное ускоре- ние на эквато- ре, см/с ²	Парабо- личе- ская ско- рость, км/с
	км	в радиу- сах Зем- ли		10 ²⁷ , г	в массах Земли			
Меркурий	2439	0,382	0,0	0,330	0,052	5,43	370	4,25
Венера	6051	0,249	0,0	4,87	0,814	5,25	887	10,36
Земля	6378	1	0,0034	5,98	1	5,50	980	11,18
Марс	3397	0,533	0,0052	0,642	0,107	3,92	371	5,02
Юпитер	71 398	11,194	0,062	1900	317,7	1,32	2486	59,6
Сатурн	60 330	9,459	0,103	569	95,2	0,68	1041	35,4
Уран	26 220	4,111	0,06	86,9	14,5	1,22	844	21,0
Нептун	24 760	3,882	0,02	102	17,1	1,65	1120	24,0
Плутон	1178± 28	0,185± 0,004	?	0,0130± 0,0024	0,00217 ±0,0038	1,9±0,5	63±15	1,21± 0,13

Планета	Сидериче- ский период вращения	Центро- бежное ускорение на эквато- ре, см/с ²	Наклон экватора к плоско- сти орби- ты	Визуаль- ная звездная величина	Визуаль- ное сфе- рическое альbedo	Температура, К	
						эффе- ктивная	поверх- ности
Мерку- рий	58 ^d ,65	0,00	7°	-0 ^m ,20	0,058	439	439
Венера	243 ^d	0,00	2°,6	-3,81	0,78	229	735

Окончание таблицы

Планета	Сидерический период вращения	Центробежное ускорение на экваторе, см/с ²	Наклон экватора к плоскости орбиты	Визуальная звездная величина	Визуальное сферическое альbedo	Температура, К	
						эффективная	поверхности
Земля	23 ^h 56 ^m 4 ^s ,1	3,4	23°26′	—	0,36	248	289
Марс	24 ^h 37 ^m 22 ^s ,6	1,7	24°56′	-2,01	0,14	210	214
Юпитер	9 ^h 50 ^m ,5	224,5	3°07′	-2,55	0,54	124,4	—
Сатурн	10 ^h 12 ^m	175,5	26°45′	+0,67	0,54	95,0	—
Уран	17 ^h 14 ^m ,4	8,3	82°	+5,52	0,60	59,1	—
Нептун	16 ^h ,11	30,2	29°	+7,84	0,50	59,3	—
Плутон	6 ^d ,4	0,01	?	+15,1	0,3	46±12	46±12

Созвездия, их названия и обозначения

Название		Родительный падеж	Обозначение	Положение
русское	латинское			
Андромеда	Andromeda	Andromedae	And	N
Близнецы	Gemini	Geminorum	Gem	Z
Большая Медведица	Ursa Major	Ursae Majoris	UMa	N
Большой Пес	Canis Major	Canis Majoris	CMa	
Весы	Libra	Librae	Lib	Z
Водолей	Aquarius	Aquarii	Aqr	Z
Возничий	Auriga	Aurigae	Aur	N
Волк	Lupus	Lupi	Lup	S
Волопас	Bootes	Bootis	Boo	
Волосы Вероники	Coma Berenices	Comae Berenices	Com	
Ворон	Corvus	Corvi	Crv	
Геркулес	Hercules	Herculis	Her	

Продолжение таблицы

Название		Родительский падеж	Обозначение	Положение
русское	латинское			
Гидра	Hydra	Hydrae	Hy	
Голубь	Columba	Columbae	Col	<i>S</i>
Гонимые Псы	Canes Venatici	Canum Venaticorum	CVn	<i>N</i>
Дева	Virgo	Virginis	Vir	<i>Z</i>
Дельфин	Delphinus	Delphini	Del	
Дракон	Draco	Draconis	Dra	<i>N</i>
Единорог	Monoceros	Monocerotis	Mon	
Жертвенник	Ara	Arae	Ara	<i>S</i>
Живописец	Pictor	Pictoris	Pic	<i>S</i>
Жираф	Camelopardalis	Camelopardalis	Cam	<i>N</i>
Журавль	Grus	Gruis	Gru	<i>S</i>
Заяц	Lepus	Lepporis	Lep	
Змееносец	Ophiuchus	Ophiuchi	Oph	
Змея	Serpens	Serpentis	Ser	
Золотая Рыба	Dorado	Doradus	Dor	<i>S</i>
Индеец	Indus	Indi	Ind	<i>S</i>
Кассиопея	Cassiopeia	Cassiopeiae	Cas	<i>N</i>
Кентавр	Centaurus	Centauri	Cen	<i>S</i>
Киль	Carina	Carinae	Car	<i>S</i>
Кит	Cetus	Ceti	Cet	
Козерог	Capricornus	Capricorni	Cap	<i>Z</i>
Компас	Pyxis	Pyxidis	Pyx	
Корма	Puppis	Puppis	Pup	
Лебедь	Cygnus	Cygni	Cyg	<i>N</i>
Лев	Leo	Leonis	Leo	<i>Z</i>

Продолжение таблицы

Название		Родительный падеж	Обозначение	Положение
русское	латинское			
Летучая Рыба	Volans	Volantis	Vol	<i>S</i>
Лира	Lyra	Lyrae	Lyr	<i>N</i>
Лисичка	Vulpecula	Vulpeculae	Vul	
Малая Медведица	Ursa Minor	Ursae Minoris	UMi	<i>N</i>
Малый Конь	Equuleus	Equuley	Equ	
Малый Лев	Leo Minor	Leonis Minoris	LMi	
Малый Пес	Canis Minor	Canis Minoris	CMi	
Микроскоп	Microscopium	Microscopii	Mic	<i>S</i>
Муха	Musca	Muscae	Mus	<i>S</i>
Насос	Antlia	Antliae	Ant	<i>S</i>
Наугольник	Norma	Normae	Nor	<i>S</i>
Овен	Aries	Arietis	Ari	<i>Z</i>
Октант	Octans	Octantis	Oct	<i>S</i>
Ореол	Aquila	Aquiliae	Aql	
Орион	Orion	Orionis	Ori	
Павлин	Pavo	Pavonis	Pav	<i>S</i>
Паруса	Vela	Velorum	Vel	<i>S</i>
Перас	Pegasus	Pegasi	Peg	
Персей	Perseus	Persei	Per	<i>N</i>
Печь	Fornax	Fornacis	For	
Райская Птица	Apus	Apodis	Aps	<i>S</i>
Рак	Cancer	Cancri	Cnc	<i>N</i>
Резец	Caelum	Caeli	Cae	<i>S</i>
Рыбы	Pisces	Piscium	Psc	<i>Z</i>
Рысь	Lynx	Lynncis	Lyn	<i>N</i>
Северная Корона	Corona Borealis	Coronae Borealis	CrB	
Секстант	Sextans	Sextantis	Sex	

Окончание таблицы

Название		Родительный падеж	Обозначение	Положение
русское	латинское			
Сетка	Reticulum	Reticuli	Ret	<i>S</i>
Скорпион	Scorpius	Scorpii	Sco	<i>Z</i>
Скульптор	Sculptor	Sculptoris	Sci	
Столовая Гора	Mensa	Mensae	Men	<i>S</i>
Стрела	Sagitta	Sagittae	Sge	
Стрелец	Sagittarius	Sagittarii	Sgr	<i>Z</i>
Телескоп	Telescopium	Telescopii	Tel	<i>S</i>
Телец	Taurus	Tauri	Tau	<i>Z</i>
Треугольник	Triangulum	Trianguli	Tri	
Туكان	Tucana	Tucanae	Tuc	<i>S</i>
Феникс	Phoenix	Phoenicis	Phe	<i>S</i>
Хамелеон	Chameleon	Chameleontis	Cha	<i>S</i>
Цефей	Cepheus	Cephei	Cep	<i>N</i>
Циркуль	Circinus	Circini	Cir	<i>S</i>
Часы	Horologium	Horologii	Hor	<i>S</i>
Чаша	Crater	Crateris	Crt	
Щит	Scutum	Scuti	Sct	
Эридан	Eridanus	Eridani	Eri	
Южная Гидра	Hydrus	Hydri	Hyi	<i>S</i>
Южная Корона	Corona Australis	Coronae Australis	CrA	<i>S</i>
Южная Рыба	Piscis Austrinus	Piscis Austrini	PsA	
Южный Крест	CruX	Crucis	Cru	<i>S</i>
Южный Треугольник	Triangulum Australe	Trianguli Australis	TrA	<i>S</i>
Ящерица	Lacerta	Lacertae	Lac	<i>N</i>

50 САМЫХ БЛИЗКИХ ЗВЕЗД

Звезда	α_{1950}	δ_{1950}	V	S_p	$\pi'' \times 1000$	r , пк	μ , Г	V_r , км/с	M_V	$L_V (\odot = 1)$
Солнце	—	—	$-26^m,73$	G2V	—	—	—	—	$+4^m,83$	1
Проксима (α Cen C)	$14^h 26^m,3$	$-62^\circ 28'$	$+11,05^v$	M5eV	762	1,32	$3'',85$	-16	$+15,45^v$	0,000 056
α Cen A	14 36,2	-60 38	0,32	G2V	754	1,34	3,86	-22v	$+4,76$	1,06
α Cen B	14 36,2	-60 38	1,72	K4V	754	1,34	3,86	-22	6,16	0,293
Барнарда	17 55,4	+04 33	9,54	M5V	552	1,81	10,31	-108	13,25	0,000 427
Вольф 359	10 54,1	+07 19	$13,53^v$	M8eV	431	2,33	4,71	+13	$16,68^v$	0,000 018
+36°2147	11 00,5	+36 18	7,50	M2V	402	2,50	4,78	-86	10,49	0,0053
α CMA A (Сирине)	6 42,9	-16 39	-1,46	AIVm	377	2,66	1,33	-8v	1,46	22,2
α CMA B	6 42,9	-16 39	8,67	DA5	377	2,66	1,33	—	11,55	0,002 04
L 726-8A	1 36,4	-18 13	12,45	M5, 6eV	365	2,73	3,36	+29	15,27	0,000 067
L 726-8B	1 36,4	-18 13	$12,95^v$	dM6e	365	2,73	3,36	+29	$15,8^v$	0,000 041
Росс 154	18 46,7	-23 53	$10,6^v$	dM4e	345	2,90	0,72	-4	$13,3^v$	0,000 41
Росс 248	23 39,4	+43 55	12,29	dM6e	317	3,16	1,59	-81	14,80	0,000 102
ϵ Eri	3 30,6	-09 38	3,73	K2V	305	3,30	0,98	+16	6,13	0,030
L 789-6	22 35,8	-15 36	12,18	dM7e	303	3,30	3,26	-60	14,60	0,00 012
Росс 128	11 45,1	+01 06	11,10	M4V	301	3,32	1,37	-13	13,50	0,00 034
61 Cyg A	21 04,7	+38 30	5,22	K3, 5V	292	3,40	5,21	-64	7,58	0,080

Продолжение таблицы

Звезда	α_{1950}	δ_{1950}	V	S_p	$\pi'' \times 1000$	r , пк	μ , Г	V_r , км/с	M_V	$L_V(\odot = 1)$
61 Cyg B	21 04,7	+38 30	6,03	K4, 7V	292	3,40	5,21	-64	8,39	0,038
ϵ Ind	21 59,6	-57 00	4,68	K3V	291	3,44	4,69	-40	7,00	0,135
α CMi A	7 36,7	+05 21	0,37	F5IV-V	287	3,49	1,25	-3v	2,64	7,5
α CMi B	7 36,7	+05 21	10,37	DF	287	3,49	1,25	—	13,0	0,000 54
+59°1915A	18 42,2	+59 33	8,90	M3, 0V	283	3,53	2,30	+0	11,15	0,0030
+59°1915 B	18 42,2	+59 33	9,69	dM5	283	3,53	2,28	+10	11,94	0,001 43
+43°44 A	0 15,5	+43 44	8,07	M1V	282	3,55	2,90	+13v	10,32	0,0064
+53°44 B	0 15,5	+43 44	11,04	M6V	282	3,55	2,90	+20	13,29v	0,000 41
-36°15693	23 02,6	-36 08	7,36	M2V	279	3,58	6,90	+10	9,59v	0,0124
τ Cet	1 41,7	-16 12	3,50	G8pV1	273	3,62	1,91	-16	5,72	0,442
+5°1668 CMi	7 24,7	+05 23	9,82	dM5	268	3,72	3,73	+26	11,98	0,0014
L 725-32	1 10,0	-17°17'	11m,6	dM2e	261	2,83	11,36	—	13m,4	0,00037
-39°14192	21 14,3	-39 04	6,67	M0V	260	3,84	3,46	+21	8,75	0,027
Каптейна	5 09,7	-45 00	8,81	sdM0	256	3,90	8,81	+245	10,85	0,0039
Крюгер 60 A	22 26,2	+57 27	9,85	M3V	253	3,95	0,86	-26	11,87	0,0014
Крюгер 60 B	22 26,2	+57 27	11,3v	M4eV	253	3,95	0,86	-26	13,3v	0,00041
Росс 614 A	6 26,8	-02 46	11,17	dM7e	250	4,00	0,99	+24	13,16	0,00046
Росс 614 B	6 26,8	-02 46	14,8	(M)	250	4,00	0,99	+24	16,8	0,000016

Окончание таблицы

Звезда	α_{1950}	δ_{1950}	V	S_p	$\pi'' \times 1000$	r , пк	μ , Г	V_T , км/с	M_V	$L_V (\odot = 1)$
-12°4523	16 27,5	-12 32	10,12	dM5	249	4,01	1,18	-13v	12,06	0,000128
Маанена 2	0 46,4	+05 09	12,37	DG	236	4,24	2,97	+54	14,26	0,00017
Вольф 424 А	12 30,9	+09 18	13,16	dM6e	230	4,35	1,75	-5	14,98	0,000087
Вольф 424 В	12 30,9	+09 18	13,4	dM7e	230	4,35	1,75	-5	15,2	0,000071
-37°15492	0 02,5	-37 36	8,63	M4V	225	4,43	6,09	+23	10,39	0,0060
+50°1725	10 08,3	+49 42	6,59	K7V	219	4,55	1,45	-26	8,32	0,040
-46°11540	17 24,9	-46 51	9,36	M4	216	4,63	1,10	—	11,03	0,0033
-49°13575	21 30,2	-49 13	8,67	M1V	214	4,68	0,81	+8	10,32	0,0064
-44°11909	17 33,5	-44 17	11,2	M5	213	4,70	1,16	—	12,8	0,00064
L 1159-16	1 57	+12 50	12,27v	M8	212	4,72	2,08	—	13,91v	0,00023
+68°946	17 36,7	+68 23	9,15	M3, 5V	209	4,78	1,32	-22	10,79	0,0041
-15°6290	22 50,6	-14 31	10,17	dM5	207	4,83	1,15	+9	11,77	0,0017
L 145-141	11 43,0	-64 33	11,44	DA	206	4,85	0,68	—	13,01	0,00053
+15°2620	13 43,2	+15 10	8,50	M4V	205	4,86	2,30	+15	10,02	0,00084
σ Eri A и B	4 13,0	-07 44	4,42	K1V	205	4,86	4,08	-42	6,0	0,343

Спутники планет

Планета (количество известных спутников)	Спутник	Среднее расстояние от центра планеты, 10^3 км	Сидерический период обращения, сут	Наклонение орбиты, град.*	Эксцентриситет орбиты	Размеры спутника (радиус или полуоси), км	Масса, г	Плотность, г/см ³	Визуальная звездная величина	Визуальное сферическое альbedo	Год открытия
Земля (1)	Луна	384,4	27,321661	5,1E	0,0549	1738	$7,34 \cdot 10^{25}$	3,34	-12,7	0,068	
Марс (2)	Фобос Деймос	9,4 23,5	0,318910 1,262441	1,8P 1,4P	0,019 0,003	$14 \times 11 \times 10$ $8 \times 6 \times 6$	$1,08 \cdot 10^{19}$	1,95	11,5 12,5	0,03 0,03	1877 1877
Юпитер (16)	XVI Метис	128,0	0,295	(0)P	(0)	20					1979
	XV Адра- стея	129,0	0,298	(0)P	(0)	$12 \times 10 \times 8$					1979
	Амальтея	181,3	0,498	0,45P	0,003	$135 \times 85 \times 7$			13,7	0,04	1982
	Теба	221,4	0,671	(0,9)P	0,013	55×45					1979
	Ио	421,6	1,769	0,04P	0,004	1815	$8,94 \cdot 10^{25}$	3,57	4,8	0,43	1610
	Европа	670,9	3,551	0,47P	0,009	1569	$4,80 \cdot 10^{25}$	2,97	5,2	0,40	1610
	Ганимед	1070	7,155	0,21B	0,002	2631	$1,48 \cdot 10^{26}$	1,94	4,5	0,11	1610

Продолжение таблицы

Планета (количество известных спутников)	Спутник	Среднее расстояние от центра планеты, 10^3 км	Сидерический период обращения, сут	Наклонение орбиты, град.*	Эксцентриситет орбиты	Размеры спутника (радиус или полуоси), км	Масса, г	Плотность, $г/см^3$	Визуальная звездная величина	Визуальное сферическое альbedo	Год открытия
Юпитер (16)	Каллисто	1880	16689	0,51В	0,007	2400	$1,08 \cdot 10^{26}$	1,86	5,5	0,13	1610
	Леда	11110	240	26,7В	0,146	(8)			20		1974
	Гималия	11470	251	27,6РВ	0,158	(92)			14,8		1904
	Лиситея	11710	260	29,0Р	0,130	(18)			18,4		1938
	Элара	11740	260	24,8В	0,207	(38)			16,8		1904
	Ананке	20700	617	147В	0,17	(15)			18,9		1951
	Карме	22350	692	164В	0,21	(20)			18,0		1938
	Пасифе	23300	735	145В	0,38	(25)			17,1		1938
	Синопе	23700	758	153В	0,28	(18)			18,4		1914
	Атлас	136,7	0,602	0,3Р	0,002	$20 \times 7 \times 10$			19,1	0,17	1980
Сатурн (17)	Прометей	139,4	0,613	0Р	0,004	$70 \times 50 \times 37$			15,8	0,31	1980
	Пандора	141,7	0,629	0,1Р	0,004	$55 \times 45 \times 33$			16,1	0,30	1980
	Эпиметей	151,4	0,69	0,1Р		$110 \times 95 \times 80$			15,7	0,25	1966

Продолжение таблицы

Планета (число извест- ных спутни- ков)	Спутник	Сред- нее рас- стояние от цен- тра плано- еты, 10^3 км	Сидериче- ский период обращения, сут	Накло- нение орбиты, град. *	Экс- центри- ситет орбиты	Размеры спутника (радиус или полуоси), км	Масса, г	Плот- ность, г/см ³	Визу- альная звезд- ная ве- личина	Визу- альное сфериче- ское альbedo	Год от- крытия
Сатурн (17)	Янус	151,5	0,69	0,3P	0,002	70×58×50			15,7	0,25	1966
	Мимас	158,5	1,370	1,5P	0,02	197	$4,6 \cdot 10^{22}$	1,4	12,9	0,30	1789
	Энцелад	238,0	0,942	0,0P	0	251	$8 \cdot 10^{22}$	1,2	11,8	0,50	1789
	Тетия	294,7	1,888	1,1P	0	530	$7,6 \cdot 10^{23}$	1,2	10,3	0,44	1884
	Телесто	294,7	1,888			$15 \times 10 \times 8$			18,7	0,45	1980
	Калипсо	294,7	1,888			$12 \times 11 \times 11$			19,0	0,34	1980
	Диона	377,4	2,737	0,0P	0,002	560	$1,05 \cdot 10^{24}$	1,4	10,4	0,36	1984
	Елена	377,4	2,737	0,2P	0,005	$17 \times 16 \times 15$			18,4	0,28	1980
	Рейя	572,0	4,518	0,4P	0,001	765	$2,49 \cdot 10^{24}$	1,2	9,7	0,37	1672
	Титал	1221,9	15,945	0,3P	0,029	2575	$1,34 \cdot 10^{26}$	1,9	8,4	0,24	1655
	Гиперион	1481,1	21,277	0,4P	0,104	$205 \times 130 \times 110$			14,4	0,13	1848
	Япет	3561,9	79,331	(14,7P)	0,028	730	$1,88 \cdot 10^{24}$	1,2	10-12	0,1-0,4	1671
	Феба	12954	550,4	175P	0,163	110			16,4	0,4	1898

Продолжение таблицы

Планета (количество известных спутников)	Спутник	Среднее расстояние от центра планеты, 10^3 км	Сидерический период обращения, сут	Наклонение орбиты, град.*	Эксцентриситет орбиты	Размеры спутника (радиус или полуоси), км	Масса, г	Плотность, г/см ³	Визуальная звездная величина	Визуальное сферическое альbedo	Год открытия
Уран (14)	Корделия	49,8				(25)					1986
	Офелия	53,8				(25)					1986
	Бианка	59,2				(25)					1986
	Крессида	61,8				(30)					1986
	Дездемона	62,7				(30)					1986
	Джульетта	64,4				(40)					1986
	Порция	66,1	0,51			(40)					1986
	Розалинда	70,0	0,56			(30)					1986
	Белинда	75,3	0,62			(30)					1986
	Пэк	86,0	0,76			77					1985
	Миранда	128,8	1,41	4,22P	0,027	236	$6,3 \cdot 10^{22}$	1,14	16,5	0,14	1948
	Ариэль	190,2	2,52	0,31P	0,033	579	$1,3 \cdot 10^{24}$	1,60	14,4	0,16	1851
	Умбриэль	265,1	4,14	0,36P	0,005	585	$1,3 \cdot 10^{24}$	1,55	15,3	0,07	1851
	Титания	434,1	8,71	0,14P	0,002	789	$3,5 \cdot 10^{24}$	1,70	14,0	0,11	1787
	Оберон	581,9	13,46	0,10P	0,001	761	$3,0 \cdot 10^{24}$	1,62	14,2	0,11	1787

Окончание таблицы

Планета (количество известных спутников)	Спутник	Среднее расстояние от центра планеты, 10^3 км	Сидерический период обращения, сут	Наклонение орбиты, град.*	Эксцентриситет орбиты	Размеры спутника (радиус или полуоси), км	Масса, г	Плотность, г/см ³	Визуальная звездная величина	Визуальное сферическое альbedo	Год открытия
Нептун (8)	Наяда	48,2	0,30	4,5E		29					1989
	Таласса	50,0	0,31	<1E		40					1989
	Деспина	52,5	0,33	<1E		74				0,04	1989
	Галатей	62,0	0,43	<1E		79				0,04	1989
	Ларисса	73,6	0,55	<1E		96				0,04	1981
	Протеус	117,6	1,12	<1E		208				0,04	1989
	Тритон	355,3	5,88	157E	0,001	1353	$2,1 \cdot 10^{25}$	2,06	13,6	0,83	1846
	Нереида	5510	360,13	28E	0,75	170			18,7	0,22	1949
Плутон (1)	Харон	19640	6,39	96,56P	0,0001	593	$8,8 \cdot 10^{23}$	1,0	17	0,26	1978

* E — к плоскости эклиптики; P — к плоскости экватора планеты; B — к плоскости орбиты планеты.

Названия и параметры наиболее ярких звезд ($m < 3^m$, 0)

№ п/п	Звезда (туманность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимоло- гия	Значение названия	m	M	Свети- мость	Расстоя- ние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
1	Алара	ε Б. Пса	Араб.	Неизвестно	1,50	-8,50	208930	3260	1
2	Акамар	θ Эридана	Араб.	Конеч реки (п)	2,91 ν ?	0,15	72	116	28
3	Акраб (Эля- краб)	β Скорпиона	Араб.	Клешня (п)	2,59 ν ?	-4,40	4786	815	4±8
4	Акрукс*	α Южного Кре- ста	Лат.	A[lfα] Стрх	0,79	-4,69	6252	408	8
5	Аламак (Альмак)	γ Андромеды	Араб.	Сандалия (п)	2,10	-4,41	4830	652	5
6	Алголь / Ра- сэльгул	β Персея	Араб.	Чудовище (рис.) / Голова ведьмы (п)	2,12 ν	-0,04	86	88	37
7	Алгораб	δ Ворона	Араб.	Ворон (п; крыло)	2,94 ν ?	-0,78	171	181	18±5
8	Алиот	ε Б. Медведицы	Араб.	Вороной конь (?) Залив(?)	1,77 ν	-3,71	2535	408	8±10
9	Альгейба (Альгиеба)	γ Льва	Араб.	Лоб (п)	1,98 ν	-1,63	373	172	19±6
10	Альгениб	γ Пегаса	Араб.	Крыло (п)	2,84 ν	-2,93	1236	466	7
11	Альгенуби	ε Льва	Араб.	Северная (п)	2,98	-5,51	13305	1630	2±7

Продолжение таблицы

№ п/п	Звезда (туманность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимоло- гия	Значение названия	m	M	Свети- мость	Расстоя- ние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
12	Альдебаран	α Тельца	Араб.	Идущая следом [Плеяд] (пн)	0,86v?	-0,73	163	68	48
13	Альдерамин	α Цефея	Араб.	Правая рука (п)	2,45	1,45	22	52	63±5
14	Альнилам	ε Ориона	Араб.	Нитка (п; жемчуга)	1,69	-6,80	43651	1630	2
15	Альнитак	ζ Ориона	Араб.	Пояс (п; великана)	1,77	-1,52	337	148	22
16	Альсабик	η Змееносца	Араб.	Обгоняющая [Плеяды] (пн)	2,42	0,78	41	69	47±7
17	Альгаир (Атаир)	α Орла	Араб.	Орел [летащий]	0,76	2,24	11	16	198±4
18	Альфард	α Гидры	Араб.	Одинокая (пн)	1,97v?	-1,88	470	192	17±4
19	Альферац (Сирах)	α Андромеды	Араб.	Кобыла (п) (пуп (п))	2,06	-1,04	217	136	24
20	Альхена	γ Блиźнецов	Араб.	Шестой дом (астр.)	1,92	-0,62	147	105	31
21	Альциона	25 η Тельца (Плеяды)	Греч.	Мифологический персонаж	2,87	-3,64	2377	652	5±4
22	Ангарес	α Скорпиона	Греч.	Вместо Ареса (Марса) (астр.)	0,91v	-2,70	1000	172	19±6
23	Арктур	α Волопаса	Греч.	Страж медведя	- 0,05v?	- 0,28	107	36	90

Продолжение таблицы

№ п/п	Звезда (туманность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимоло- гия	Значение названия	<i>m</i>	<i>M</i>	Свети- мость	Расстоя- ние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
24	Арнеб	α Зайца	Араб.	Заяц (π)	2,57	-5,92	19409	1630	2
25	Аскела (Асцелла)	ζ Стрельца	Лат.	Подмышка (π)	2,59	-0,90	191	163	20
26	Ахернар*	α Эридана	Араб.	Конец реки (π)	0,47	-2,00	525	102	32
27	Беллатрикс	γ Ориона	Лат.	Воительница (астр.)	1,64 ν ?	-1,28	270	125	26
28	{Алькаид} Бенетнаш	η Б. Медведицы	Араб.	{Предводитель} плакальщиц	1,86 ν ?	-5,13	9376	815	4 $\pm$ 12
29	Бетельгейзе	α Ориона	Араб.	Рука, подмышка (π)	0,42 ν	-6,09	22699	652	5
30	Вега	α Лиры	Араб.	Падающий [орел] ($\pi\pi$)	0,03 ν ?	0,48	53	26	123 $\pm$ 5
31	Виндемиат- рикс	ϵ Девы	Лат.	Винодельница (хоз.)	2,84 ν ?	0,62	47	91	36 $\pm$ 7
32	Гамаль (Ха- маль)	α Овна	Араб.	Ягненок (π)	2,00 ν ?	0,17	71	76	43
33	Гемма / Аль- фекка	α Сев. Короны	Лат./ Араб.	Жемчужина (γ) / Разбивающая (π)	2,24 ν	0,41	57	76	43 $\pm$ 6
34	Гиалды (расс. скоп.)	Телец	Греч.	Дождливые (сез.)	0,8	—	—	130	—
35	Гомейза	β М. Пса	Араб.	Проливающий слезы (хоз.)	2,89 ν ?	-0,83	179	181	18 $\pm$ 6

Продолжение таблицы

№ п/п	Звезда (туманность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимоло- гия	Значение названия	m	M	Свети- мость	Расстоя- ние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
36	Денеб	α Лебедя	Араб.	Хвост (п)	1,25v?	-5,74	16444	815	4
37	Денебола	β Льва	Араб.	Хвост льва (п)	2,14v?	1,54	20	43	76 $\pm$ 5
38	Денеб Кай- тос (Дифда)	β Кита	Араб.	Хвост кита (п) (Ля- гушка (?))	2,02v?	0,80	40	57	5 $\pm$ 6
39	Денеб Окаб	ξ Орла	Араб.	Хвост орла (п)	2,99v?	0,78	40	90	36 $\pm$ 7
40	Джанах	γ Ворона	Араб.	Крыло (п)	2,58v?	-0,52	134	136	24
41	Дирах	μ Близнецов	Араб.	Локоть (п; льва)	2,87	-0,52	134	155	21
42	Дубхе	α Б. Медведицы	Араб.	Медведь (п; спина)	1,79v?	-0,75	166	105	31 $\pm$ 5
43	Зосма (Цозма)	δ Льва	Греч.	Пояс (?)	2,56v?	0,57	49	82	40 $\pm$ 5
44	Зубен Эльге- нуби / Киффа Аустралис	α Весов	Араб./ Араб.+ Лат.	Северная клешня / Чашка южная (п)	2,75v?	1,20	28	67	49 $\pm$ 7
45	Зубен Эль- шамали / Киффа Бореалис	β Весов	Араб./ Араб.+ Лат.	Северная клешня / Чашка северная (п)	2,61	-0,68	156	148	22
46	Йед Приор	δ Змееносца	Араб.+ Лат.	Рука, идущая впереди (пн)	2,75	0,06	79	112	29 $\pm$ 5

Продолжение таблицы

№ п/п	Звезда (туманность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимоло- гия	Значение названия	<i>m</i>	<i>M</i>	Свети- мость	Расстоя- ние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
47	Капопус*	α Киля	Лат.	Капоп (египетский город?) (?)	-0,75	-4,47	5105	181	18
48	Капелла	α Возничего	Лат.	Козочка (рис.)	0,08v?	-0,61	146	45	73
49	Кастор	α Близнецов	Греч.	Мифологический персонаж	1,58	0,87	37	45	72±4
50	Каус Ауст- ралис	ε Стрельца	Араб.+ Лат.	Изгиб южный (п)	1,85	-2,27	673	217	15±10
51	Каус Мери- дионалис	δ Стрельца	Араб.+ Лат.	Изгиб срединный (п)	2,70	0,66	45	84	39±11
52	Каф (Шаф)	β Кассиопеи	Араб.	Рука	2,27v	-1,71	402	204	16±11
53	Кор Кароли (Cor Caroli) / Хара	α Гончих Псов	Лат.	Сердце Карла II	2,84v	-0,35	115	142	23±6
54	Корнефорос	β Геркулеса	Греч.	?	2,74v?	-1,11	231	192	17±5
55	Кохаб	β М. Медведи- цы	Араб.	Звезда [севера] (пи)	2,08v?	-0,46	127	105	31±5
56	Лезат (Лезах)	ν Скорпиона	Араб.	Пятно (п; туманное)	2,68	-2,32	705	326	10
57	Маркаб (Меркаб)	α Пегаса	Араб.	Плечо (п)	2,48v?	-0,13	94	109	30±5

Продолжение таблицы

№ п/п	Звезда (туманность, скопление)	Обозначение ме- стоположения	Этимоло- гия	Значение названия	m	M	Свети- мость	Расстоя- ние, св. лет	" × 1000
58	Маркеб*	κ Парусов	Араб.	Корабль? (п)	2,50	-3,27	1690	466	7±11
59	Менкаб (Менкар)	α Кита	Араб.	Нос (п)	2,53 ^v ?	-5,08	8954	1084	3
60	Менкалинан	β Возничего	Араб.	Плечо (п)	1,90 ^v	-0,26	106	88	37
61	Мерак	β Б. Медведицы	Араб.	Брюхо (п)	2,37 ^v	0,49	53	78	42±6
62	Металлах* / Атрия*	α Юж. Тре- угольника	?/Лат.	? / A[ifa] Tri[angulum] A[ustralis]	1,91	-1,19	249	136	24±11
63	Минтака	δ Ориона	Араб.	Пояс (пн; Ориона)	2,24 ^v	-4,75	6607	815	4
64	Мира (Кита)	ο Кита	Лат.	Удивительная (я)	2,00 ^v	-2,43	780	251	13
65	Мирах	β Андромеды	Араб.	Передник (п)	2,05	0,22	68	76	43
66	Мирзам (Мирцам)	β Б. Пса	Араб.	Привязь (п)	1,97 ^v	-2,30	692	233	14
67	Мирфак (Марфик)	α Персея	Араб.	Локоть [Плеяд] (п)	1,80 ^v ?	-0,89	189	112	29
68	Мифрид	η Волопаса	Араб.	Единственная (пн)	2,68	2,72	6,8	32	102
69	Мицар	ζ Б. Медведицы	Араб.	Пах (п)	2,06 ^v ?	-0,10	91	88	37±6
70	Пеллаг	σ Стрельца	Лат.	Быстрый поток (пн?)	2,03	-1,36	291	155	21

Продолжение таблицы

№ п/п	Звезда (гуманность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимология	Значение названия	<i>m</i>	<i>M</i>	Светимость	Расстояние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
71	Плеяды (расс. скопл.)	M 45; Телец	Греч.	Родовое имя мифологических персонажей	1,4	—	—	420	—
72	Поллукс	ρ Близнецов	Лат.	Мифологический персонаж	1,14 ν ?	0,98	34	35	93 $\pm$ 5
73	Полярная	α М. Медведицы	Рус.	—*— (пш)	2,02 ν	—5,59	14322	1087	3
74	Поррима	γ Девы	Лат.	Имя римской богини	2,74 ν ?	2,76	6,5	32	101
75	Процион / Эльгомайза	α М. Пса	Греч./ Араб.	Раньше Пса (пш) / Проливающий слезы (сез.)	0,37 ν ?	2,67	7,1	11	288 $\pm$ 4
76	Рас Альхаг	α Змееносца	Араб.	Голова закладника (п)	2,07 ν ?	0,81	39	58	56
77	Растабан	β Дракона	Араб.	Голова дракона (п)	2,78	—2,45	794	362	9 $\pm$ 6
78	Регул	α Льва	Лат.	Царек (?)	1,35 ν ?	—0,70	158	84	39 $\pm$ 7
79	Ригель	β Ориона	Араб.	Нога (п)	0,13	—7,48	81658	1087	3
80	Сабик	η Змееносца	Араб.	Идущий впереди (пш)	2,42	0,78	41	69	47 $\pm$ 7
81	Садаксууд (Сад Эльзуд)	β Водолея	Араб.	Счастье счастий (астр.)	2,87	—4,74	6546	1087	3

Продолжение таблицы

№ п/п	Звезда (туманность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимоло- гия	Значение названия (астр.)	m	M	Свети- мость	Расстоя- ние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
82	Садальме- лик	α Водолея	Араб.	Счастье государства (астр.)	2,93	-4,68	6194	1087	3 ± 5
83	Садр	γ Лебеда	Араб.	Грудь (п)	2,23 γ ?	-3,88	2965	543	6
84	Сириус	α Б. Пса	Греч.?	Жгучий? (сез.)	-1,46	1,41	23	8,7	375
85	Солнце	—	Славян. Индо- евр.	Светящее (я)	-26,78	4,80	1	8 m 19'	—
86	Спика	α Девы	Лат.	Колос (рис.)	0,97 γ	-2,42	773	156	21 ± 8
87	Толиман* / Проксима*	α Центавра	Араб./ Лат.	Страусы / Ближайшая	0,06	4,44	1,4	4,3	751 ± 11
88	Унук Эль- хайа	α Змеи	Араб.	Шея змеи (п)	2,64	0,95	35	71	46 ± 6
89	Факт	α Голубя	Араб.	Кружащий голубь (п)	2,64 γ ?	-0,65	151	148	22
90	Фекда (Фад)	γ Б. Медведицы	Араб.	Бедро (п)	2,44 γ ?	-1,05	219	163	20 ± 6
91	Фомальгаут	α Юж. Рыбы	Араб.	Рот рыбы (п)	1,16 γ ?	1,95	14	23	144 ± 7
92	Форамен* (новоперем.)	η Кили	Лат.	Дыра (п)	-0,80 γ (max)/ 7,5	-10,80	1737800	3260	1
93	Хадар*	β Центавра	?	?	0,59	-3,39	1888	204	16 ± 11

Окончание таблицы

№ п/п	Звезда (ту-машность, скопление)	Обозначение местоположения	Этимология	Значение названия	<i>m</i>	<i>M</i>	Светимость	Расстояние, св. лет	$\pi'' \times 1000$
94	Хан	ζ Змееносца	Китай.	?	2,56v?	-3,55	2188	543	6
95	Цельбальрай	β Змееносца	Араб.	Пес пастуха (п)	2,77	-0,42	122	142	23±5
96	Шаула	λ Скорпиона	Араб.	Жало (п)	1,63	-2,97	1282	272	12
97	Шеат (Шит)	β Пегаса	Араб.	Бедро (п)	2,42v	-1,70	398	217	15±5
98	Шедар (Шедир)	α Кассиопеи	Араб.	Грудь (п)	2,23v?	-3,00	1318	362	9
99	Шератан	β Овна	Араб.	Два знака (астр.)	2,65v?	1,65	18	52	63
100	Эль Натх (Альнат, Нат, Натх)	β Тельца	Араб.	Рог (п)	1,65	-1,96	506	172	19
101	Эниф	ε Пегаса	Араб.	Нос (п)	2,39v?	-4,60	5754	815	4
102	Этамин	γ Дракона	Араб.	Дракон (п)	2,22v?	-1,63	373	192	17±6

Условия обозначения: астр. — из-за астрологических представлений; п — по положению звезды в конфигурации созвездия, например Жало (п) — звезда находится в том месте, где в созвездии Скорпиона представляли жало; если из первоначального названия звезды выпало слово, необходимое для понимания названия, оно приводится в скобках, например Ворон (п; крыло); в ряде случаев восстановить утраченное слово не удается: Заяц (п); пп — название дано по положению звезды на небе относительно других звезд и созвездий; рис. — название дано по положению звезды на традиционном изображении созвездия, например Сника — «колос», так как на картах неба Деву изображали с колосом в руке; сез. — название объясняется тем, что определенное положение звезды на небе (обычно восход или заход) совпадало с наступлением какого-то погодного сезона; хоз. — то же самое, связанное с сельскохозяйственными работами; я — название дано из-за яркости или цвета; знаком * отмечены звезды, которые видны в южном полушарии Земли.

Крупнейшие действующие оптические телескопы мира

Keck (<http://www2.keck.hawaii.edu:3636/>).

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: $19^{\circ}50'N, 155^{\circ}28'W$, высота над уровнем моря 4123 м. Апертура 10 м, зеркало состоит из 36 сегментов.

Keck II (<http://www.astro.caltech.edu/mirror/keck/index.html>)

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: $19^{\circ}50'N, 155^{\circ}28'W$, высота над уровнем моря 4123 м. Апертура 10 м. Наиболее совершенный оптический интерферометр.

Hobby-Eberly (<http://www.as.utexas.edu/mcdonald/het/het.html>).

Расположен в Mt. Fowlkes, Texas, координаты: $30^{\circ}40'N, 104^{\circ}1'W$, высота над уровнем моря 2072 м. Апертура 9,2 м. Сферическое сегментированное зеркало: фиксированная высота над горизонтом; используется только для спектроскопии.

Subaru (<http://www.naoj.org/>).

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: $19^{\circ}50'N, 155^{\circ}28'W$, высота над уровнем моря 4100 м. Апертура 8,3 м. Национальная астрономическая обсерватория Японии (<http://www.nao.ac.jp/>).

Antu (<http://www.eso.org/outreach/info-events/ut1fl/>),

Kueyen (<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-1999/pr-06-99.html>),

Melipal (<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2000/pr-01-00.html>),

Yepun (<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2000/pr-18-00.html>).

Расположены в Cerro Paranal, Chile, координаты: $24^{\circ}38'S, 70^{\circ}24'W$, высота над уровнем моря 2635 м. Апертура 8,2 м. Действуют независимо, в будущем станут модулями Сверхбольшого Телескопа (<http://www.eso.org/paranal/>).

Gemini North (<http://www.noao.edu/usgp/usgp.html>)

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: $19^{\circ}50'N, 155^{\circ}28'W$, высота над уровнем моря 4100 м. Апертура 8,0 м. Идентичен Gemini South.

Gemini South (<http://www.gemini.edu/>)

Расположен в Cerro Pachon, Chile, координаты: $30^{\circ}20'S, 70^{\circ}59'W$, высота над уровнем моря 2737 м. Апертура 8,0 м. Идентичен Gemini North.

MMT (<http://sculptor.as.arizona.edu/foltz/www/mmt.html>)

Расположен в Mt. Hopkins, Arizona, координаты: $31^{\circ}41'N, 110^{\circ}53'W$, высота над уровнем моря 2600 м. Апертура 6,5 м.

Walter Baade (<http://www.ociw.edu/magellan/>)

Расположен в La Serena, Chile, координаты: $29^{\circ}00.2'S, 4^{\circ}42'48''W$, высота над уровнем моря 2282 м. Апертура 6,5. Более известен как Magellan I; Las Campanas Obs. (<http://www.ociw.edu/lco/>); двойник нового MMT (<http://www.seds.org/billa/#mmt2>); см. также Magellan II (<http://www.seds.org/billa/#mag2>)

Большой телескоп азимутальный (БТА) (<http://www.sao.ru/>)

Расположен в Нижнем Архызе, Россия, координаты: 43°39'N, 41°26'E, высота над уровнем моря 2070 м. Апертура 6,0 м. Специальная астрофизическая обсерватория.

Hale (<http://www.astro.caltech.edu/observatories/palomar/>)

Расположен в Palomar Mountain, California, координаты: 33°21'N, 116°52'W, высота над уровнем моря 1900 м. Апертура 5,0 м.

William Herschel (http://www.ing.iac.es/PR/wht_info/)

Расположен в La Palma, Canary Islands, Spain, координаты: 28°46'N, 17°53'W, высота над уровнем моря 2400 м. Апертура 4,2 м.

Victor Blanco (<http://www.ctio.noao.edu/telescopes/4m/base4m.html>)

Расположен в Cerro Tololo, Chile, координаты: 30°10'S, 70°49'W, высота над уровнем моря 2200 м. Апертура 4,0 м. Межамериканская обсерватория Cerro Tololo (<http://www.ctio.noao.edu/ctio.html>).

Anglo-Australian (<http://www.aao.gov.au/>)

Расположен в Coonabarabran, NSW, Australia, координаты: 31°17'S, 149°04'E. Апертура 3,9 м. Межамериканская обсерватория Cerro Tololo (<http://www.ctio.noao.edu/ctio.html>).

Mayall (<http://www.noao.edu/kpno/kpno.html>)

Расположен в Kitt Peak, Arizona, координаты: 31°57'N, 111°37'W, высота над уровнем моря 2100 м. Апертура 3,8 м. Национальная оптическая астрономическая обсерватория (<http://www.noao.edu/>).

UKIRT (<http://www.jach.hawaii.edu/JACpublic/UKIRT/home.html>)

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: 19°50'N, 155°28'W, высота над уровнем моря 4200 м. Апертура 3,8 м. Предназначен для ИК диапазона.

AEOS (<http://ulua.mhpscc.af.mil/amos.html>)

Расположен в Maui, Hawaii, координаты: 20°42'30"N, 156°15'29"W, высота над уровнем моря 3058 м. Апертура 3,7 м. Используется в основном для военных целей.

«360» (<http://www.ls.eso.org/lasilla/Telescopes/360cat/html/tel360.html>)

Расположен в Cerro La Silla, Chile, координаты: 29°15'S, 70°44'W, высота над уровнем моря 2400 м. Апертура 3,6 м. European Southern Obs. (<http://www.eso.org/welcome.html>).

Canada-France-Hawaii (<http://www.cfht.hawaii.edu/>)

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: 19°50'N, 155°28'W, высота над уровнем моря 4200 м.

Telescopio Nazionale Galileo (<http://www.tng.iac.es/>)

Расположен в La Palma, Canary Islands, Spain, координаты: 28°45'N, 17°53'W, высота над уровнем моря 2387 м. Апертура 3,6 м. Принадлежит Италии.

MPI-CANA (http://www.mpla-hd.mpg.de/Public/index_en.html)

Расположен в Calar Alto, Spain, координаты: 37°13'N, 2°33'W, высота над уровнем моря 2200 м. Апертура 3,5 м.

New Technology (<http://www.ls.eso.org/lasilla/Telescopes/NEWNTT/>)

Расположен в Cerro La Silla, Chile, координаты: 29°15'S, 70°44'W, высота над уровнем моря 2400 м. Апертура 3,5 м. European Southern Obs. (<http://www.eso.org/welcome.html>).

ARC (<http://www.apo.nmsu.edu/site/Bruce/AS98Manuscript.html>)

Расположен в Apache Point, New Mexico, координаты: 32°47'N, 105°49'W, высота над уровнем моря 2788 м. Апертура 3,5 м. Используется в основном дистанционное управление.

WIYN (<http://www.noao.edu/wiyn/wiyn.html>)

Расположен в Kitt Peak, Arizona, координаты: 31°57'N, 111°37'W, высота над уровнем моря 2100 м. Апертура 3,5 м. Wisconsin, Indiana, Yale, NOAO (<http://www.noao.edu/>).

Starfire (<http://www.de.afrl.af.mil/pa/factsheets/35meter.html>)

Расположен в Kirtland AFB, New Mexico, высота над уровнем моря 1900 м. Апертура 3,5 м. Используется в основном для военных целей.

Shane (<http://www.irving.org/xplore/lick/contents.html>)

Расположен в Mount Hamilton, California, координаты: 37°21'N, 121°38'W, высота над уровнем моря 1300 м. Апертура 3,0 м. Lick Observatory (<http://www.ucolick.org/>).

NASA IRTF (<http://irtf.ifa.hawaii.edu/>)

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: 19°50'N, 155°28'W, высота над уровнем моря 4160 м. Апертура 3,0 м. Используется для инфракрасного диапазона.

NODO (<http://www.sunspot.noao.edu/Nodo/>)

Расположен в New Mexico, координаты: 32°59'N, 105°44'W, высота над уровнем моря 2758 м. Апертура 3,0 м. Жидкое зеркало.

Harlan Smith (<http://vc.as.utexas.edu/tour/tour.html#107>)

Расположен в Mt. Locke, Texas, координаты: 30°40'N, 104°1'W, высота над уровнем моря 2100 м. Апертура 2,7 м. McDonald Obs (<http://www.as.utexas.edu/mcdonald/mcdonald.html>).

БАО (<http://bao.sci.am/telescopes.html>)

Расположен в Быуракане, Армения, координаты: 40°20'N, 44°17'E, высота над уровнем моря 1405 м. Апертура 2,6 м. Быураканская астрофизическая обсерватория (<http://bao.sci.am/>).

Шайн (<http://www.crao.crimea.ua/craoinfo/stella.html>)

Расположен в Крыму, Украина, координаты: 44°44'N, 34°E, высота над уровнем моря 600 м. Крымская астрофизическая обсерватория (<http://www.crao.crimea.ua/>).

Hooker (<http://www.mtwilson.edu/>)

Расположен в Mt. Wilson, California, координаты: 34°13'N, 118°4'W, высота над уровнем моря 1700 м. Апертура 2,5 м. Построен в 1917 г.

Isaac Newton (http://www.ing.iac.es/PR/int_info/)

Расположен в La Palma, Canary Islands, Spain, координаты: 28°45'N, 17°53'W, высота над уровнем моря 2382 м. Апертура 2,5 м. Observatorio del Roque de los Muchachos (<http://ing.iac.es/>).

Nordic Optical (<http://www.not.iac.es/>)

Расположен в La Palma, Canary Islands, Spain, координаты: 28°45'N, 17°53'W, высота над уровнем моря 2382 м. Апертура 2,5 м.

du Pont (<http://www.ociw.edu/>)

Расположен в La Serena, Chile, координаты: 29°00.2'S, 4°42'48"W, высота над уровнем моря 2282 м. Апертура 2,5 м. Las Campanas Obs. (<http://www.ociw.edu/lco/>).

Sloan Digital Sky Survey (<http://www.sdss.org/sdss.html>)

Расположен в Apache Point, New Mexico, координаты: 32°47'N, 105°49'W, высота над уровнем моря 2788 м. Апертура 2,5 м. Детектор с очень широким полем зрения.

CHARA (<http://www.chara.gsu.edu/CHARA/array.html>)

Расположен в Mt. Wilson, California, координаты: 34°13'N, 118°4'W, высота над уровнем моря 1700 м. Апертура 2,45 м. Интерферометр, использующий шесть одномометровых базовых телескопов.

Hiltner (<http://www.astro.lsa.umich.edu/obs/mdm/technical/hiltner.html>)

Расположен в Kitt Peak, Arizona, координаты: 31°57'N, 111°37'W, высота над уровнем моря 2100 м. Апертура 2,4 м. MDM Observatory (<http://www.astro.lsa.umich.edu/obs/mdm/>).

Hubble Space Telescope (<http://www.stsci.edu/>)

Расположен на низкой земной орбите, высота которой изменяется (примерно 600 км).

WIRO (<http://faraday.uwyo.edu/wiro/>)

Расположен в Jelm Mtn., Wyoming, координаты: 41°03'N, 106°00'W, высота над уровнем моря 2900 м. Апертура 2,3 м. Используется для инфракрасного диапазона.

ANU (<http://msowwww.anu.edu.au/>)

Расположен в Coonabarabran, NSW, Australia, координаты: 31°17'S, 149°04'E. Апертура 2,3 м. Siding Spring Obs.

Bok (<http://chinadoll.as.arizona.edu/~schmidt/90inch.html>)

Расположен в Kitt Peak, Arizona, координаты: 31°57'N, 111°37'W, высота над уровнем моря 2100 м. Апертура 2,3 м. Steward Obs.

Vainu Bappu (<http://www.iiap.ernet.in/~vbo/>)

Расположен в Kavalur, India, координаты: 12°34'N, 78°50'E, высота над уровнем моря 700 м. Апертура 2,3 м. Indian Institute of Astrophysics (<http://www.iiap.ernet.in/>).

ESO-MPI (<http://www.ls.eso.org/lasilla/Telescopes/2p2T/E2p2M/>)

Расположен в Cerro La Silla, Chile, координаты: 29°15'S, 70°44'W, высота над уровнем моря 2335 м. Апертура 2,2 м.

MPI-CAHA (http://www.mpia-hd.mpg.de/Public/index_en.html)

Расположен в Calar Alto, Spain, координаты: 37°13'N, 2°33'W, высота над уровнем моря 2200 м. Апертура 2,2 м.

UH (<http://www.ifa.hawaii.edu/88inch/88inch.html>)

Расположен в Mauna Kea, Hawaii, координаты: 19°50'N, 155°28'W, высота над уровнем моря 4200 м. Апертура 2,2 м.

Наиболее масштабные исследования с помощью телескопов*

Апертура, м	Название	Комментарии
100	OWL (http://www.eso.org/projects/owl/)	OverWhelmingly Large Telescope
50	Swedish 50 m Optical Telescope (http://nastol.astro.lu.se/~torben/50m/50m.html)	
30-50	MaxAT (http://www.gemini.edu/science/maxat/)	
30	CELT (http://www.ucolick.org/~celt/)	California Extremely Large Telescope
30	XLT (http://www.hia.nrc.ca/STAFF/cbt/XLT/)	Замена для CFHT (http://www.seds.org/billa/#cfht)
30	GSMТ (http://www.aura-nio.noao.edu/)	Giant Segmented Mirror Telescope

* Другие см. http://www.aura-nio.noao.edu/other/other_concepts.html

Крупнейшие строящиеся оптические телескопы мира

Very Large Telescope (<http://www.eso.org/projects/vlt/>)

Строится в Cerro Paranal, Chile. Апертура 16,4 (4-8,2) м. Все четыре модуля действуют; будет собран как интерферометр.

Keck Interferometer (<http://huey.jpl.nasa.gov/keck/>)

Строится в Mauna Kea, Hawaii. Апертура 14,6 (2-10) м. Будет состоять из Keck I, Keck II и нескольких меньших телескопов.

Large Binocular Telescope (<http://lbtwww.arcetri.astro.it/>)

Строится в Mt. Graham, Arizona. Апертура 11,8 (2-8,4) м. Два 8,4-метровых зеркала; разрешение 23 м.

Gran Telescopio Canarias (<http://www.gtc.iac.es/>)

Строится в La Palma, Canary Islands, Spain. Апертура 10,4 м. Сегментированное зеркало, изготовленное на основе технологии Кека.

SALT (<http://www.salt.ac.za/>)

Строится в Южно-Африканской астрономической обсерватории. Апертура 9,2 м на основе дизайна HET (<http://www.seds.org/billa/#het>).

Landon Clay (<http://www.ociw.edu/magellan/>)

Строится в La Serena, Chile. Апертура 6,5 м. Известен также как Magellan II; Las Campanas Obs. (<http://www.ociw.edu/lco/>); двойник Walter Baade (<http://www.seds.org/billa/#magellan>).

LZT (<http://www.astro.ubc.ca/LMT/lzt/index.html>)

Строится в British Columbia, Canada. Апертура 6,0 м. Жидкое зеркало.

SOAR (<http://www.soartelescope.org/>)

Строится в Cerro Pachon, Chile. Апертура 4,2 м. Brazil/USA; CTIO (<http://www.ctio.noao.edu/ctio.html>).

LAMOST (<http://www.lamost.org/>)

Строится в Xinglong Station, China. Апертура 4,2 м. Beijing Astronomical Observatory (<http://www.bao.ac.cn/bao/>).

SOFIA (<http://sofia.arc.nasa.gov/>)

Стратосферного базирования. Апертура 2,5 м. Будет использоваться для инфракрасного диапазона и размещаться на борту самолета.

Aristarchos (<http://www.astro.noa.gr/ngt-2.3m/ngt-main.htm>)

Строится в Mt. Helmos, Greece. Апертура 2,3 м. National Observatory of Athens (<http://www.astro.noa.gr/>).

Другие интересные проекты

Апертура, м	Название	Местонахождение	Комментарии
42	LAMA (http://www.astro.ubc.ca/LMT/lama/index.html)	Chile	Матрица жидких зеркал
12–15	Cornell Atacama Telescope (http://www.astro.cornell.edu/atacama/atacama.html)	Atacama, Chile	Оптимизирован для ИК, возле ALMA (http://www.cso.org/projects/alma/index.html)
8,0	Dark Matter Telescope (http://www.dmtelescope.org/)		Телескоп широкого поля зрения

Продолжение таблицы

Апертура, м	Название	Местонахождение	Комментарии
6,0?	NGST (http://ngst.gsfc.nasa.gov/index.html)	На орбите L2 Halo	Изменен в связи со снижением стоимости (планировался вначале 8-метровый аппарат)
4,0	Vista (http://www.vista.ac.uk/)	Cerro Paranal, Chile	Телескоп широкого поля зрения
2,6	VST (http://oacosf.na.astro.it/vst/)	Cerro Paranal, Chile	То же
3×2,4	Magdalena Ridge Observatory (http://www.physics.nmt.edu/research/MRO.html)	Socorro, New Mexico	Оптический интерферометр, см. http://ganymedc.nmsu.edu/holtz/mro/index.html , http://www.nmt.edu/red/mro/homepage.html)
2,5	The MLO 100 inch (http://mintaka.sdsu.edu/facilities/Facilities.html)	Mt. Laguna, CA	
2,0	Indian Astronomical Observatory (http://www.iiap.ernet.in/iao/iao.html)	Hanle, India (http://www.iiap.ernet.in/iao/site.html)	Высота над уровнем моря 4500 м
1,86	Dominion Astrophysical Observatory (http://www.hia.nrc.ca/facilities/dao/dao.html)	Victoria, Canada	Был крупнейшим телескопом в мире (недолго)
1,8	The Leviathan of Parsonstown (http://ireland.iol.ie/~mcgibbon/index.html)	Birr, Ireland (http://www.birrcastle.com/)	Восстановленный телескоп лорда Rosse

Окончание таблицы

Апертура, м	Название	Местонахождение	Комментарии
1,0	Yerkes Observatory (http://astro.uchicago.edu/yerkes/)	Williams Bay, Wisconsin	Крупнейший в мире рефрактор

Некоторые полезные ссылки в интернете

Directory of Astronomical Instruments and Projects, <http://www.futureframe.de/astro/instr/index.html>

AstroWeb, http://www.stsci.edu/astroweb/yp_telescope.html

Optical Telescopes, http://www.webbsociety.org/observe/ob_optical.html

Orbiting Astronomical Telescopes, <http://www.seds.org/~spider/oaos/oaos.html>

Amateur Observatories, <http://www.seds.org/billa/obs/obslist.html>

Observatories with public viewing programs, <http://home.pacbell.net/peairs/observe.html>

Bill Arnett; last updated: 2001 Nov 5, <http://www.seds.org/billa/arnett.html>

Крупнейший астрономический каталог с данными о более чем 88 млн объектов небесной сферы, см. <http://www.sdss.org/DR2> (версия для неспециалистов <http://skyserver.sdss.org>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин П.И. Курс общей астрономии: Учеб. пособие для вузов / П.И. Бакулин, Э.В. Кононович, В.И. Мороз. М., 1983.
2. Волинский Б.А. Астрономия: Учеб. пособие для пед. вузов / Б.А. Волинский; Под ред. проф. Р.В. Куницкого. М., 1971.
3. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии: Учеб. пособие для вузов / Б.А. Воронцов-Вельяминов. М., 1977.
4. Дагаев М.М. Лабораторный практикум по курсу общей астрономии: Учеб. пособие для пед. вузов / М.М. Дагаев. М., 1972.
5. Дагаев М.М. Сборник задач по астрономии / М.М. Дагаев. М., 1980.
6. Астрономия: Учеб. пособие для пед. вузов / М.М. Дагаев, В.Г. Демин, И.А. Климишин, В.М. Чаругин. М., 1983.
7. Кононович Э.В. Общий курс астрономии: Учеб. пособие для вузов / Э.В. Кононович, В.И. Мороз. М., 2001.
8. Курышев В.И. Практикум по астрономии: Учеб. пособие для пед. вузов / В.И. Курышев. М., 1986.
9. Мур П. Астрономия с Патриком Муром / П. Мур. М., 1999.
10. Иванов В.В. Парадоксальная Вселенная: 250 задач по астрономии / В.В. Иванов, А.В. Кривов, П.А. Денисенков. Спб., 1997.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. СФЕРИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

1.1. Небесная сфера. Системы небесных координат. Преобразование координат....3	
Вопросы и задания для самопроверки	10
Примеры решения задач	10
Задачи для самостоятельного решения.....	12
1.2. Измерение времени. Системы счета времени.....	15
Вопросы и задания для самопроверки	19
Примеры решения задач	19
Задачи для самостоятельного решения.....	20
1.3. Подвижная карта звездного неба	22
Вопросы и задания для самопроверки	23
Примеры решения задач	23
Задачи для самостоятельного решения.....	24
1.4. Факторы, влияющие на положение светил на небесной сфере.....	25
Вопросы и задания для самопроверки	32
Примеры решения задач	33
Задачи для самостоятельного решения.....	34
1.5. Задачи практической астрономии	34
Вопросы и задания для самопроверки	38
Примеры решения задач	38
Задачи для самостоятельного решения.....	40

ГЛАВА 2. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

2.1. Видимые и действительные движения планет.....	42
Вопросы и задания для самопроверки	52
Примеры решения задач	53
Задачи для самостоятельного решения.....	53
2.2. Движение Земли и Луны.....	58
Вопросы и задания для самопроверки	61
Примеры решения задач	61
Задачи для самостоятельного решения.....	62
2.3. Движение искусственных тел.....	64
Вопросы и задания для самопроверки	66
Примеры решения задач	67
Задачи для самостоятельного решения.....	68

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ АСТРОФИЗИКИ

3.1. Астрофизика планет и звезд	70
3.1.1. Земля — планета Солнечной системы	70
3.1.2. Другие планеты Солнечной системы	79
3.1.3. Астрофизика Солнца и других звезд	83
3.1.4. Крупномасштабные звездные системы	108
3.1.5. Вопросы космогонии и космологии	114
Вопросы и задания для самопроверки	125
Примеры решения задач	126
Задачи для самостоятельного решения	127
3.2. Астрофизические приборы	136
Вопросы и задания для самопроверки	137
Примеры решения задач	137
Задачи для самостоятельного решения	139

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

1.1. Небесная сфера. Системы небесных координат. Преобразование координат	141
1.2. Измерение времени. Системы счета времени	142
1.3. Подвижная карта звездного неба	145
1.4. Факторы, влияющие на положение светил на небесной сфере	146
1.5. Задачи практической астрономии	147
2.1. Видимые и действительные движения планет	149
2.2. Движение Земли и Луны	158
2.3. Движение искусственных тел	163
3.1. Астрофизика планет и звезд	166
3.2. Астрофизические приборы	185

ПРИЛОЖЕНИЕ

Некоторые физические и астрономические постоянные	189
Элементы планетных орбит	190
Физические характеристики планет	191
Созвездия, их названия и обозначения	192
50 самых близких звезд	196
Спутники планет	199
Названия и параметры наиболее ярких звезд	204
Крупнейшие действующие оптические телескопы мира	213

Наиболее масштабные исследования с помощью телескопов	217
Крупнейшие строящиеся оптические телескопы мира	217
Другие интересные проекты	218
Некоторые полезные ссылки в интернете	220

ЛИТЕРАТУРА	221
-------------------------	------------

Учебное издание

Клищенко Анатолий Петрович
Шупляк Вячеслав Иванович

АСТРОНОМИЯ

Учебное пособие

Ведущий редактор *А.В. Жвалецкий*
 Редактор *Т.И. Иванова*
 Художник обложки *С.В. Ковалевский*
 Компьютерная верстка *В.И. Киселёв*
 Корректор *К.А. Степанова*

Подписано в печать с готовых диапозитивов 02.07.2004. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,2. Уч.-изд. л. 15,79.

Тираж 3010 экз. Заказ № 1800.

ООО «Новое знание». ИД № 05902 от 24.09.2001. 107076, Москва, Колодезный пер., д. 2в.

Телефон (095) 234-58-53. E-mail: ru@wnk.biz

При участии ООО «Новое знание». ЛИ № 02330/0056937 от 30.04.2004.

Минск, ул. Академическая, д. 28, к. 112. Почтовый адрес: 220050, Минск-50, а/я 79.

Телефон/факс: (10-375-17) 211-50-38. E-mail: nk@wnk.biz

<http://wnk.biz>

Республиканское унитарное предприятие «Издательство «Белорусский Дом печати».

220013, Минск, пр. Ф. Скорины, 79.

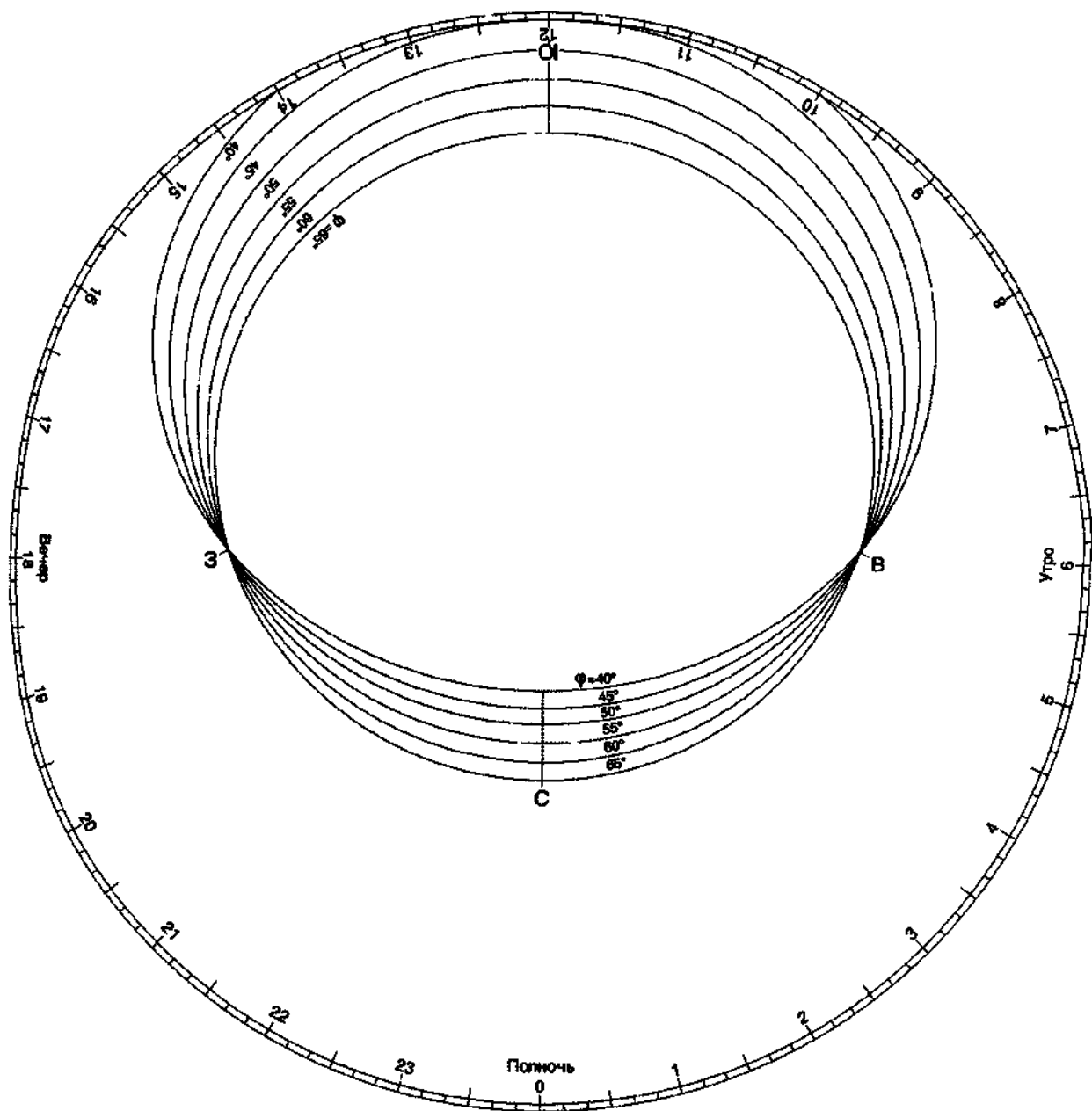


Рис. 1.8. Накладной круг для подвижной карты звездного неба

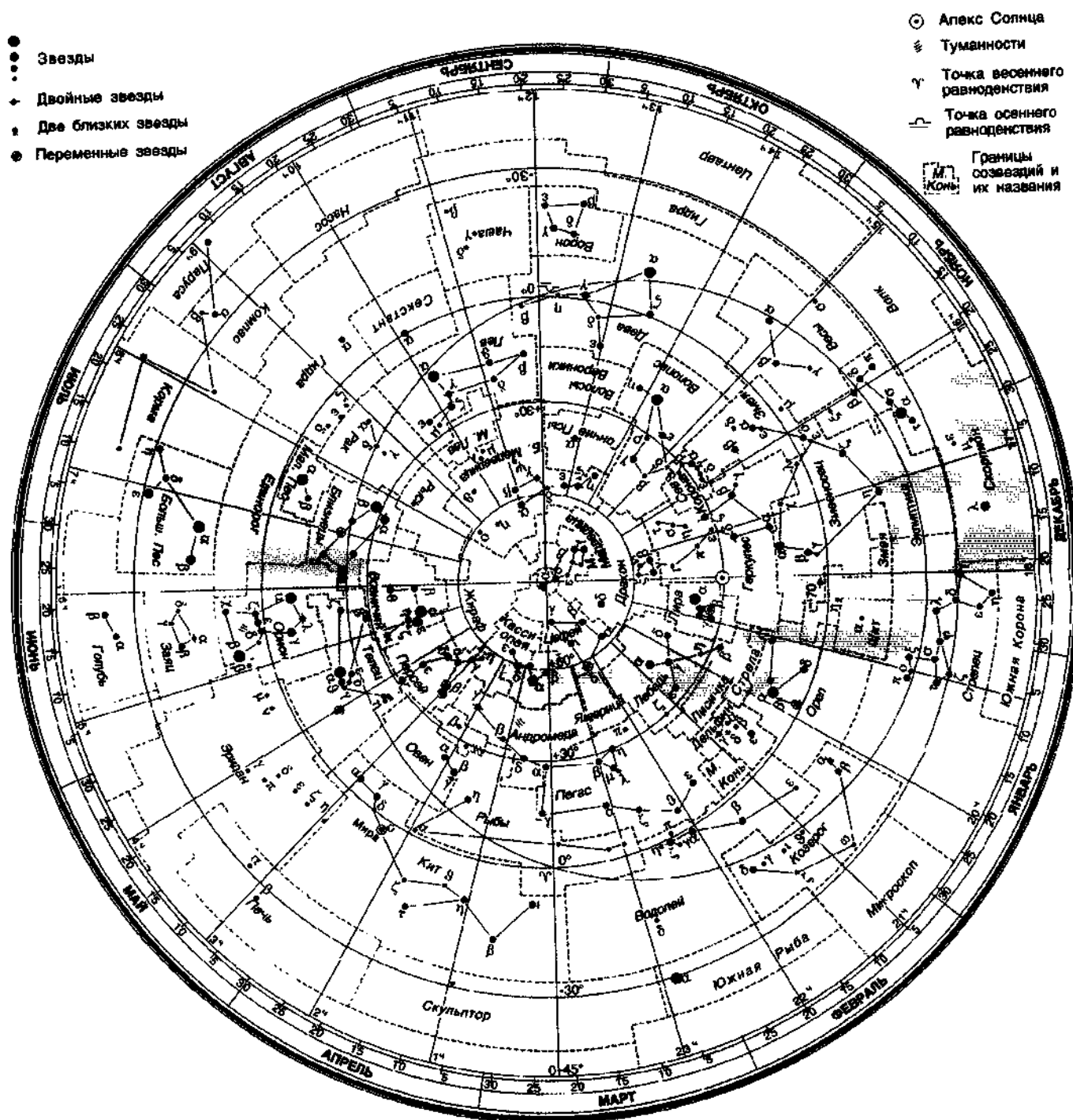


Рис. 1.7. Подвижная карта звездного неба