



О.С. Угольников

АСТРОНОМИЯ

АСТРОНОМИЯ

Задачник

10.11

БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ



О.С. Угольников

АСТРОНОМИЯ

Задачник

10•11 классы

Учебное пособие
для общеобразовательных
организаций

**БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ**

Москва
«Просвещение»
2018

УДК 373:52
ББК 22.6я72
У26

12+

Серия «Сферы 1—11» основана в 2017 году

Угольников О.С.

У26 Астрономия. Задачник. 10—11 классы : учеб. пособие для общеобразоват. организаций : базовый уровень / О.С. Угольников. — М. : Просвещение, 2018. — 79 с. : ил. — (Сферы 1—11). — ISBN 978-5-09-058069-4.

Задачник является составной частью учебно-методического комплекса «Астрономия» для 10—11 классов линии «Сферы 1—11». Пособие адресовано учащимся. В нём содержатся задачи по всем темам учебника 10—11 классов. Порядок задач соответствует структуре учебника. Они разделены по уровню сложности на три группы. Задачник поможет отработать навыки решения задач.

УДК 373:52
ББК 22.6я72

ISBN 978-5-09-058069-4

© Издательство «Просвещение», 2018
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2018
Все права защищены

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
I.	Введение в астрономию	4
II.	Астрометрия	7
III.	Небесная механика	18
IV.	Строение Солнечной системы	26
V.	Астрофизика и звёздная астрономия	35
VI.	Млечный Путь — наша Галактика	45
VII.	Галактики	53
VIII.	Строение и эволюция Вселенной	58
IX.	Современные проблемы астрономии	62
	Ответы к задачам	68
	Приложение	76

ВВЕДЕНИЕ

Задачник является составной частью единого комплекса «Астрономия. 10—11 классы». С его помощью вы сможете лучше усвоить и отработать весь материал нового курса астрономии, введённого в школьное образование в 2017 году. Представленный материал разделён по уровню сложности на три группы. Задачи первого уровня нацелены на проверку знаний, полученных на занятиях и при изучении учебной литературы. Для решения задач второго уровня сложности необходимо применение физико-математического и логического материала. Задания третьего уровня — наиболее сложные. Для их решения необходимы свободное владение материалом и аналитические способности, важные для будущего исследователя в разных областях науки. Часть заданий связана с анализом карт звёздного неба и фотографий небесных объектов. Задания охватывают широкий спектр астрономических вопросов: от приземного космоса до космологии — науки о развитии всей Вселенной как единого целого.

I. ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ

- 1.1.** Назовите самую яркую звезду земного неба.
- 1.2.** Наша Галактика состоит из 100 миллиардов звёзд, формирующих 20% её массы. Оцените общую массу Галактики в килограммах.
- 1.3.** Определите радиус Галактики Млечный Путь в километрах.
- 1.4.** Сигнал с посланием о нашей цивилизации отправили в сторону шарового скопления М13. Когда можно ожидать ответ?
- 1.5.** Из вещества Солнца сделали проволоку диаметром 1 мм, не изменяя её среднюю плотность. Дотянется ли эта проволока из центра до края Галактики?
- 1.6.** Космический аппарат вылетел из Солнечной системы со скоростью 10 км/с. Сколько времени он будет лететь до звезды Проксима Центавра?
- 1.7.** Расстояние до Луны — 1,3 световых секунды, а её угловой диаметр при наблюдении с Земли равен $0,5^\circ$. Во сколько раз Луна меньше Земли по радиусу?
- 1.8.** Масса галактики М87 равна $3 \cdot 10^{12}$ масс Солнца, угловой диаметр $7'$, расстояние до неё 55 миллионов световых лет. Найдите среднюю плотность галактики.
- 1.9.** С помощью интерферометра из больших оптических телескопов на Гавайских островах проводятся наблюдения Марса с расстояния 1 а.е. Детали какого наименьшего размера на Марсе можно будет изучить?
- 1.10.** Во сколько раз звёздное скопление Плеяды в небе Земли светит слабее Солнца?
- 1.11.** Когда-нибудь Солнце станет белым карликом. Каким будет его радиус?

1.12. Почему телескоп имени Хаббла с зеркалом диаметром 2 метра иногда обеспечивает лучшее разрешение, чем наземные телескопы с диаметром зеркала 6—8 метров?

1.13. В центре Галактики находится сверхмассивная чёрная дыра радиусом около 10 млн километров. Можно ли изучить структуру её окрестностей с помощью радиоинтерферометра с космическим телескопом «Радиоастрон»? С помощью одного оптического телескопа диаметром объектива 1 м?

1.14. Опишите преимущества оптического телескопа на Луне по сравнению с земными и орбитальными телескопами.

1.15. Концентрация звёзд в шаровом скоплении равна 10 пк^{-3} . Сколько звёзд там можно увидеть глазом на ночном небе? Считать, что все звёзды похожи на Солнце.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Для выражения межзвёздных расстояний астрономы используют две внесистемные единицы: световой год (расстояние, которое свет проходит за год) и парсек (расстояние, с которого радиус орбиты Земли виден под углом $1''$). Выразите обе единицы в метрах, а также парсек в световых годах. Скорость света равна $300\,000 \text{ км/с}$, расстояние от Земли до Солнца — $149\,600\,000 \text{ км}$.

Дано:

$$c = 300\,000 \text{ км/с}$$

$$R = 149\,600\,000 \text{ км}$$

$$L_1 = ?$$

$$L_2 = ?$$

$$\frac{L_2}{L_1} = ?$$

СИ:

$$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

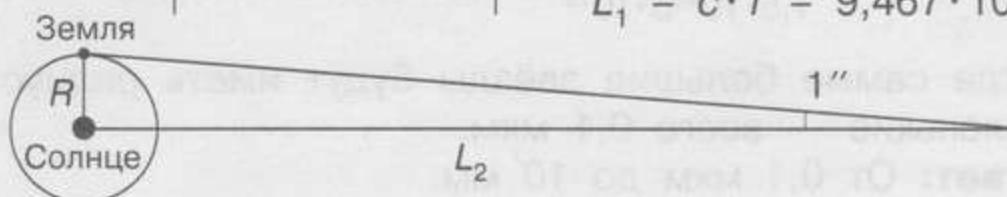
$$1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

Решение: Земной год T состоит примерно из 365,25 суток, в сутках 24 часа, в часе 60 минут, в минуте 60 секунд. Определим продолжительность года в секундах:

$$T = (365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60) \text{ с} = 3,156 \cdot 10^7 \text{ с.}$$

Световой год есть произведение скорости света и продолжительности года:

$$L_1 = c \cdot T = 9,467 \cdot 10^{15} \text{ м.}$$



В соответствии с определением парсека мы можем найти его величину:

$$L_2 = \frac{R}{\sin 1''} = R \cdot 206\,265 = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м.}$$

Остаётся выразить парсек в световых годах: $\frac{L_2}{L_1} = 3,26$.

Ответ: В одном световом годе $9,467 \cdot 10^{15}$ м, в одном парсеке $3,086 \cdot 10^{16}$ м или 3,26 светового года.

Задача 2. Определите «самое большое число Вселенной» — число атомов в ней, если известно, что во Вселенной около 10^{11} галактик типа нашей Галактики Млечный Путь. Считать, что большинство атомов — это водород, содержащийся в звёздах.

Дано:

Масса Солнца $M_0 = 2 \cdot 10^{30}$ кг

Число звёзд в Галактике

$$N_1 = 10^{11}$$

Число галактик во Вселенной

$$N_2 = 10^{11}$$

N — ?

Решение: Масса всех звёзд во Вселенной: $M = M_0 \cdot N_1 \cdot N_2 = 2 \cdot 10^{52}$ кг. Число атомов получается делением этой массы на массу протона (ядра водорода):

$$N = \frac{M}{m_p} \sim 10^{79}.$$

Ответ: 10^{79} . Задача решена в упрощённом виде. Реальное число атомов во Вселенной ещё в 10—100 раз больше.

Задача 3. Представьте себе, что радиус звёздного диска нашей Галактики изображён размером в радиус Земли. Какого размера станут звёзды в этом масштабе?

Решение: Радиус звёздного диска Галактики составляет около 15 кпк, в то время как радиус Земли около 6400 км. Вспомним, что 1 парсек включает в себя примерно 200 000 а.е. или $3 \cdot 10^{13}$ км. Самые большие звёзды имеют размер около 1000 радиусов Солнца, в то время как маленькие звёзды — белые карлики — величиной с Землю, т.е. около 0,01 радиуса Солнца. Посчитаем, какого они станут размера. Солнце будет иметь радиус

$$\frac{6,4 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 10^{13}} \cdot 7 \cdot 10^5 \text{ км} \approx 10^{-8} \text{ км} = 10 \text{ мкм.}$$

Тогда самые большие звёзды будут иметь радиус 10 мм, а самые маленькие — всего 0,1 мкм.

Ответ: От 0,1 мкм до 10 мм.

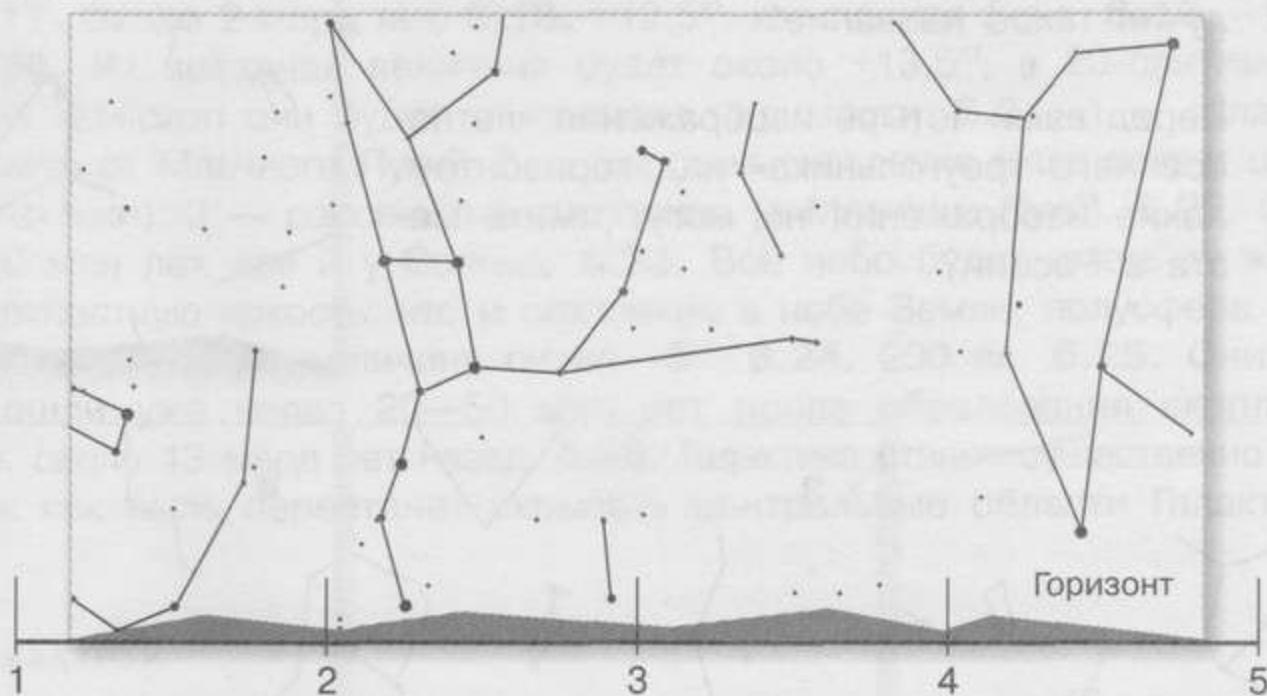
II. АСТРОМЕТРИЯ

2.1. Известно, что звезда 2^m светит в $10^{0,4} = 2,512$ раз слабее звезды 1^m , звезда 3^m — в 2,512 раз слабее звезды 2^m и т.д. Во сколько раз самые тусклые звёзды, заметные глазом (6^m), светят слабее звёзд 1^m ?

2.2. Одна двойная звезда состоит из двух звёзд 2^m , а другая — из одной звезды 1^m и одной звезды 3^m . Какая из этих пар ярче?

2.3. Звезда α Центавра А похожа на Солнце, находится в 4,3 светового года от нас и имеет звёздную величину 0^m . Какова была бы звёздная величина этой звезды, находишься она в центре нашей планетной системы вместо Солнца?

2.4. Какая из пяти точек горизонта, помеченных на рисунке, — точка севера?

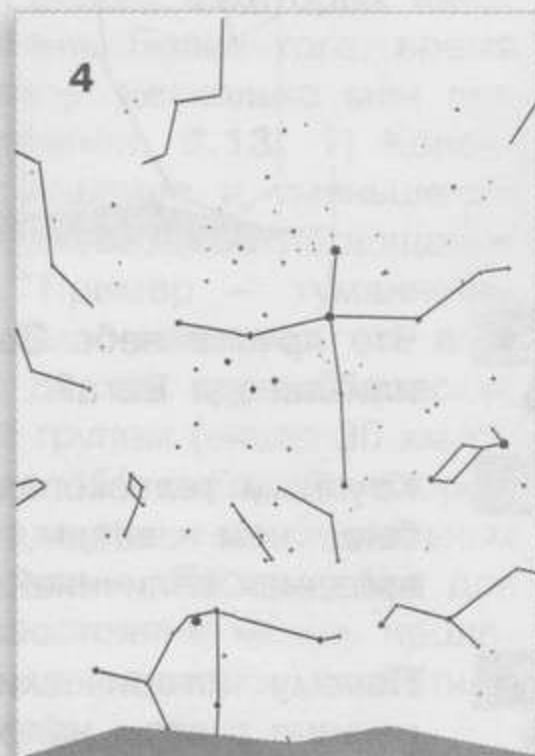
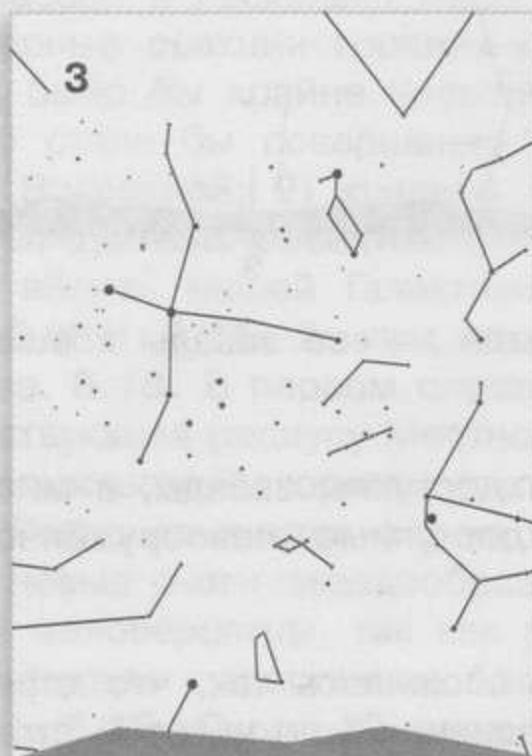
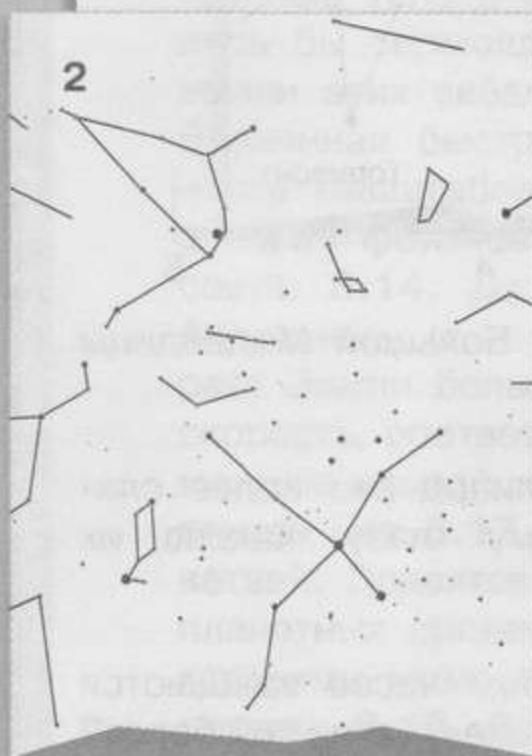
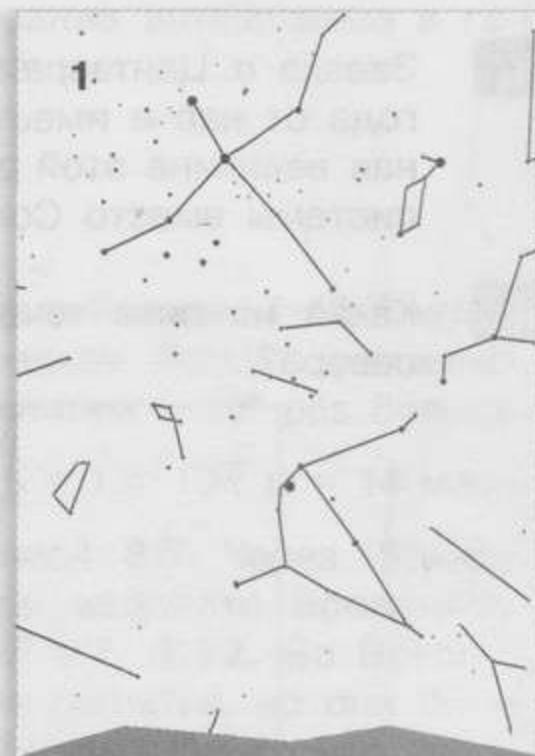


2.5. Что ярче в небе Земли — все звёзды ковша Большой Медведицы или звезда Вега?

2.6. Крупным телескопам доступны звёзды, в миллиард раз более слабые, чем звёзды, доступные невооружённому глазу. Какова их звёздная величина?

2.7. Почему исторически сложилось так, что стрелки часов вращаются именно в этом направлении («по часовой стрелке»), а не наоборот?

- 2.8.** Сколько точек небесной сферы не изменяют своего положения относительно земного горизонта?
- 2.9.** Где на Земле можно увидеть лунное затмение в зените?
- 2.10.** Могут ли звёзды одного созвездия за несколько часов изменить положение относительно горизонта? А одна относительно другой?
- 2.11.** Солнце в июле перемещается по созвездию Близнецов. Когда это созвездие лучше всего видно на ночном небе?
- 2.12.** Почему «летне-осенний треугольник», состоящий из звёзд Вега (α Лиры), Денеб (α Лебеда) и Альтаир (α Орла), получил такое название?
- 2.13.** Перед вами четыре изображения «летне-осеннего треугольника» над горизонтом. Какие изображения не могут иметь места в России?



- 2.14.** Однажды вы увидели в созвездии Тельца яркий объект, похожий на звезду, которого нет на звёздной карте. Что это может быть?
- 2.15.** В день летнего солнцестояния (21 июня) склонение Солнца достигает $+23,4^\circ$. Исходя из этого, определите широты Северного и Южного тропика, Северного и Южного полярного круга.
- 2.16.** Две звезды одновременно оказались в верхней кульминации по разные стороны от зенита на высоте 80° . Найдите разность склонений звёзд.
- 2.17.** Светило видно в точке неба с азимутом $A = 90^\circ$ и высотой $h = 0^\circ$. Каково склонение светила?
- 2.18.** Звезда α Центавра имеет склонение $\delta = -61^\circ$. Можно ли её увидеть в Сочи (43° с.ш.)? В Хургаде (24° с.ш.)?
- 2.19.** Для каких звёзд верно, что их азимут в Москве всё время возрастает со временем от -180° до $+180^\circ$?
- 2.20.** Экваториальные координаты некоторой точки неба равны $\alpha = 0$, $\delta = 0$. Что это за точка?
- 2.21.** Некоторое светило видно в Санкт-Петербурге (60° с.ш.) в зените. Зайдёт ли оно там за горизонт?
- 2.22.** Верно ли, что если звезда находится на небесном меридиане, то она в этот момент в верхней или нижней кульминации? Верно ли обратное утверждение, что если звезда в верхней или нижней кульминации, то она в этот момент находится на небесном меридиане?
- 2.23.** Можно ли сориентироваться на местности по звёздам, если северная часть неба закрыта тучами и Полярная звезда не видна?
- 2.24.** Координаты звёзд равны $\alpha_1 = 2$ ч, $\delta_1 = 0$; $\alpha_2 = 8$ ч, $\delta_2 = 0$. Каково угловое расстояние между ними на небе?
- 2.25.** Какая часть небесной полусферы над горизонтом в Краснодаре (45° с.ш.) оказывается южнее небесного экватора?

- 2.26.** Некоторое светило в Петербурге (60° с.ш.) в верхней кульминации оказывается вдвое выше над горизонтом, чем в нижней кульминации. Найдите склонение светила.
- 2.27.** Где лето в среднем более жаркое — в Северном или Южном полушарии Земли? А где оно более длинное?
- 2.28.** Март. Яркая планета видна в созвездии Льва. Что это за планета?
- 2.29.** В 2004 и 2012 годах произошли прохождения Венеры по диску Солнца. С какой стороны Венера вступала на диск Солнца, если наблюдать из Северного полушария Земли?
- 2.30.** Юпитер был виден в верхней кульминации ночью 21 июня, а Сатурн — ночью 22 декабря. Какая из этих планет поднялась выше над горизонтом в Москве?
- 2.31.** В какой день и на каких широтах Солнце «печёт» сильнее всего?
- 2.32.** Луна находится в фазе первой четверти. В какое время суток её лучше всего наблюдать?
- 2.33.** Когда Луна в полнолуние выше поднимается над горизонтом в Северном полушарии — летом или зимой?
- 2.34.** Луна находится в фазе последней четверти. В какой сезон года она поднимается выше всего в северных широтах?
- 2.35.** Почему синодический и сидерический периоды обращения Луны различаются? Какой из них совпадает с периодом осевого вращения Луны?
- 2.36.** Можно ли пользоваться правилом букв «Р» и «С» для определения растущей и стареющей Луны на всей поверхности Земли?
- 2.37.** В каких широтах серп растущей и убывающей Луны ориентирован одинаково относительно горизонта?
- 2.38.** Перед вами несколько фотографий Луны (фото 1). Укажите, какая из них сделана не с Земли.

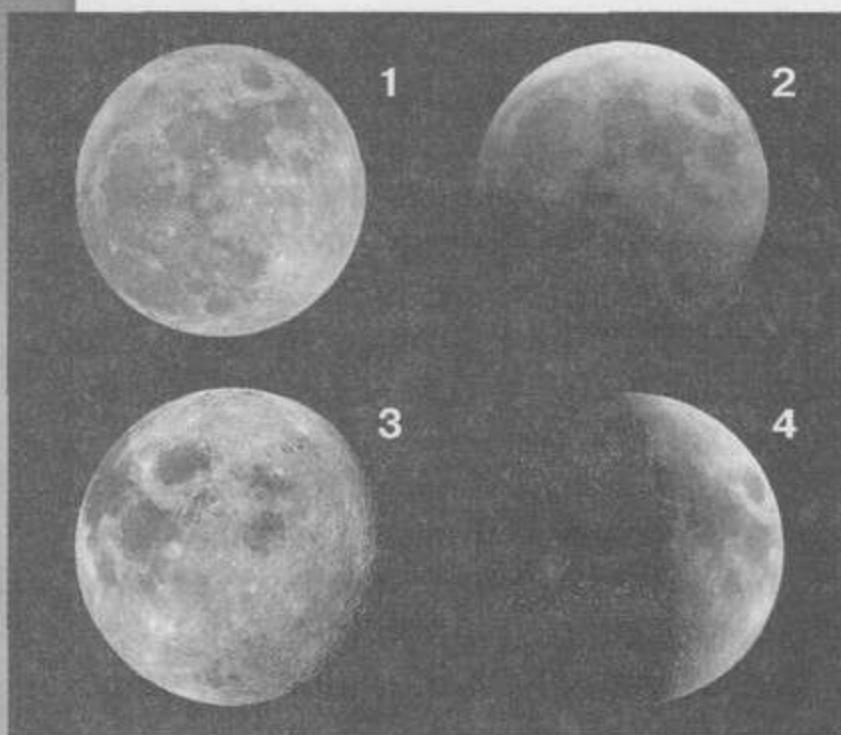


Фото 1

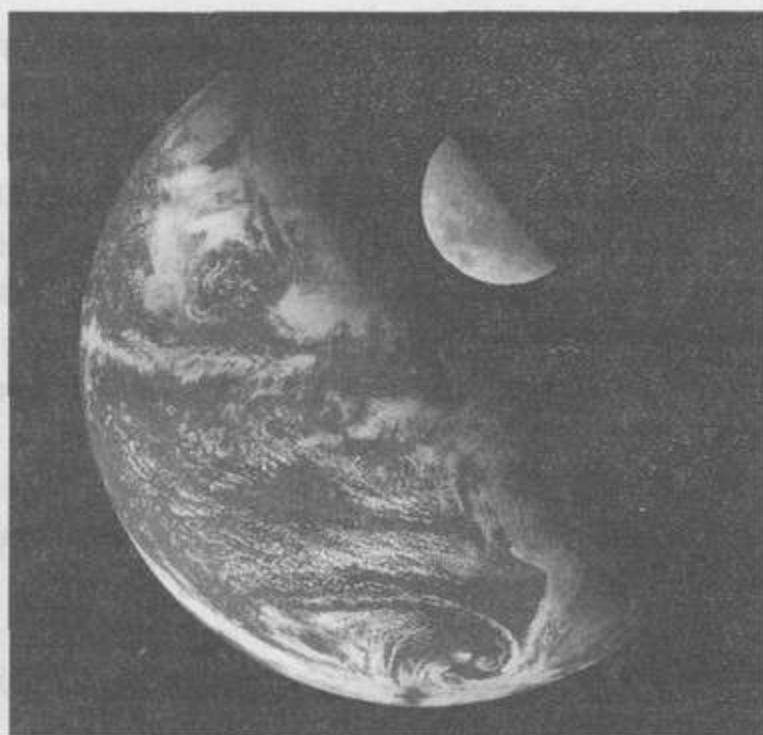


Фото 2

- 2.39.** На одном из информационных интернет-сайтов заметка о предстоящем астрономическом явлении была проиллюстрирована данной фотографией (фото 2). Откуда могла быть сделана фотография и какая фаза была в этот момент у Луны для наблюдателей на Земле?
- 2.40.** При какой фазе Луны происходят солнечные затмения? лунные затмения?
- 2.41.** Почему затмения Солнца и Луны не происходят каждый лунный месяц?
- 2.42.** Лунное затмение наступило в зимнюю полночь в Москве. Будет ли оно видно в Новосибирске?
- 2.43.** Лунное затмение наблюдается на восходе Луны. Какое сейчас время суток?
- 2.44.** Почему область видимости полного солнечного затмения на Земле выглядит как тонкая полоса?
- 2.45.** Диаметр тени Луны вблизи Земли не превышает 250 км. Исходя из этого, определите максимальную длительность полного солнечного затмения в одном пункте Земли.

2.46. Почему Луна во время затмений окрашивается в красный цвет? Какие известные вам явления имеют с этим общую причину?

2.47. В XIX веке астрономы заметили, что после мощных вулканических извержений на Земле вид Луны во время полных лунных затмений менялся. Как он менялся и почему?

2.48. Бывают ли кольцеобразные лунные затмения?

2.49. Какие солнечные затмения случаются чаще — полные или кольцеобразные?

2.50. Какие затмения — частные солнечные или теньевые лунные — чаще видны из одной точки Земли?

2.51. Укажите, на каких фотографиях запечатлено солнечное затмение (фото 3).

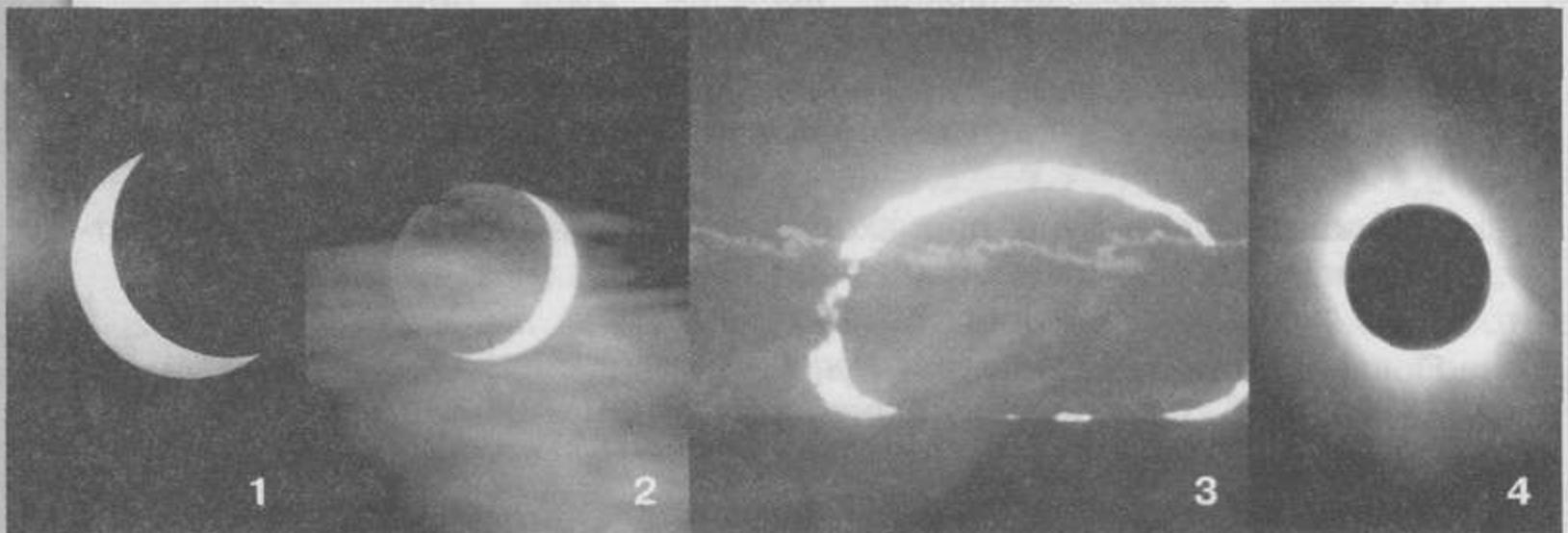


Фото 3

2.52. Укажите, на каких из шести фотографий запечатлено лунное затмение, а на каких затмения нет (фото 4).

2.53. В какой день года истинное солнечное время и звёздное время практически совпадают?

2.54. 22 декабря — самый короткий световой день в Москве. Когда в Москве раньше темнеет — 12 декабря или 1 января?

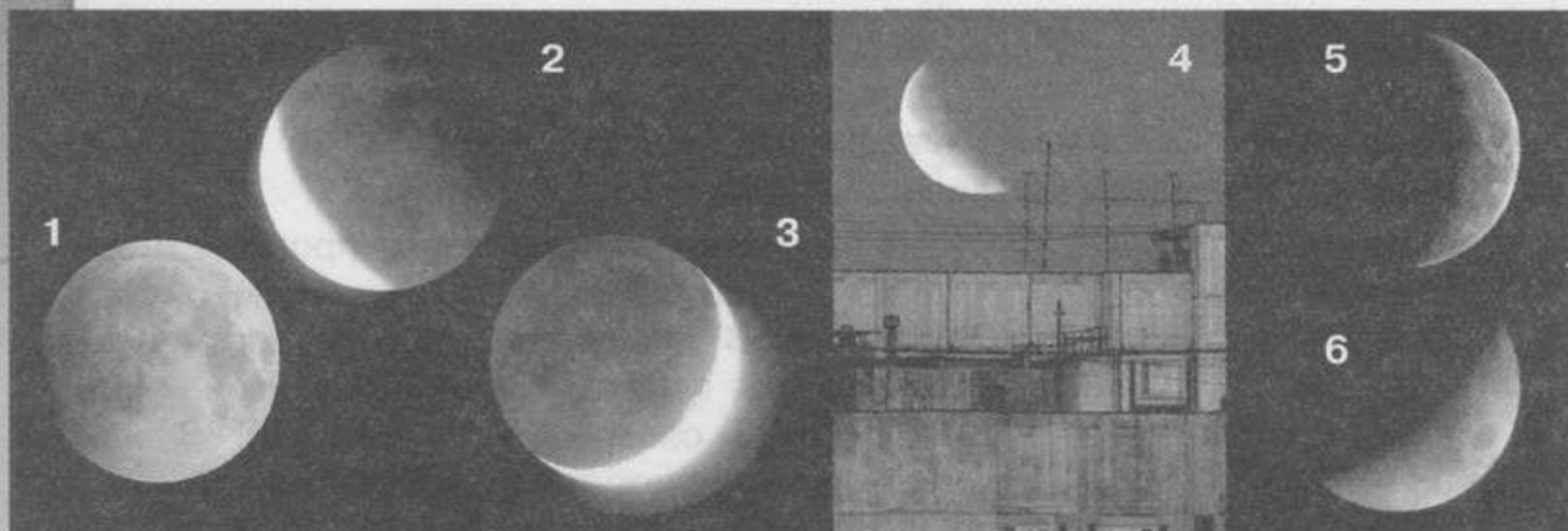


Фото 4

2.55.

Если бы Земля вращалась вокруг Солнца равномерно по окружности, совпадало бы истинное солнечное время со средним солнечным временем?

2.56.

На какой долготе среднее солнечное время совпадает с московским временем?

2.57.

Звезда взошла над горизонтом в $00^{\text{h}}01^{\text{m}}$ по московскому времени. Когда произойдет её следующий восход?

2.58.

Звезда Вега оказалась в верхней кульминации в $00^{\text{h}}00^{\text{m}}$ 1 июля. В какой день она окажется в верхней кульминации в $20^{\text{h}}00^{\text{m}}$?

2.59.

Звезда кульминировала в $00^{\text{h}}00^{\text{m}}$, а зашла в $07^{\text{h}}00^{\text{m}}$. В какое время произойдет её ближайший восход?

2.60.

Вы находитесь на 60-й параллели. Сегодня звезда взошла в $16^{\text{h}}00^{\text{m}}$, а зашла в $23^{\text{h}}00^{\text{m}}$ по московскому времени. Куда вам нужно отправиться завтра, чтобы наблюдать восход и заход этой звезды в то же время?

2.61.

Сколько звёздных суток в одном невисокосном календарном году?

2.62.

Какой год в среднем длиннее — юлианский или григорианский? На сколько?

2.63.

В каком веке «старый Новый год» будут встречать в ночь на 1 февраля?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Склонение звезды равно $+45^\circ$. Найдите её высоту в верхней и нижней кульминации в Москве (56° с.ш.).

Дано:

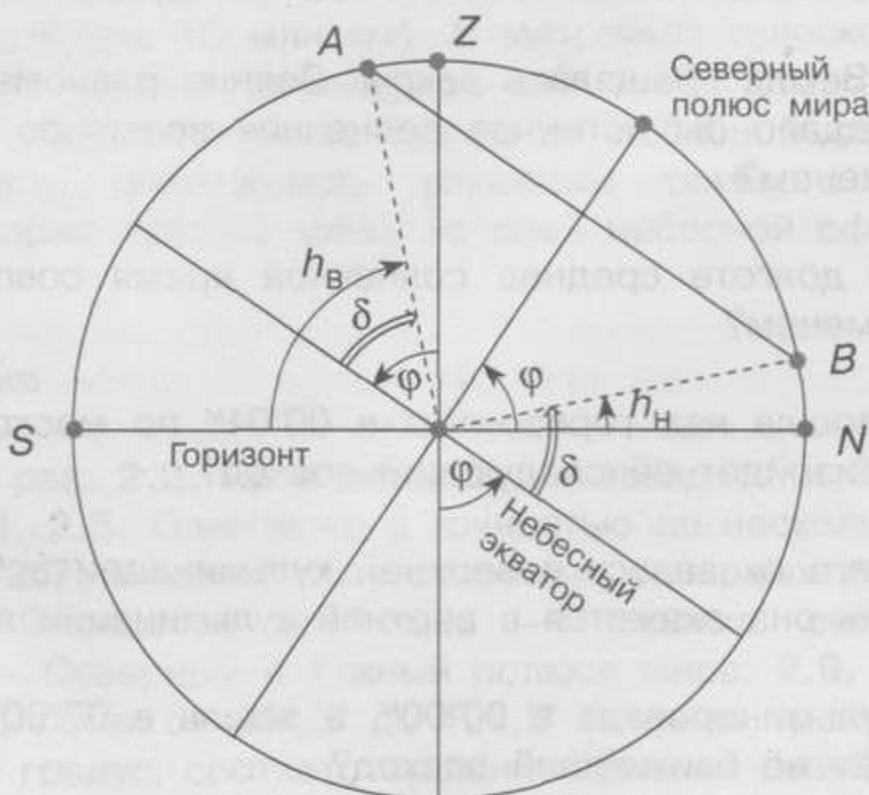
Широта $\varphi = +56^\circ$

Склонение звезды $\delta = +45^\circ$

h_B — ?

h_H — ?

Решение: Изобразим проекцию небесной сферы на плоскость меридиана. В плоскости рисунка тогда окажутся зенит Z , Северный полюс мира, точки севера (N) и юга (S). В ней также окажутся точки верхней и нижней кульминации звезды (A и B).



Наблюдатель находится в точке O . Высота Северного полюса мира равна широте места φ , и он располагается над северным горизонтом. Проекция небесного экватора перпендикулярна направлению от точки O к Северному полюсу мира. Самая высокая точка небесного экватора будет находиться на высоте $(90^\circ - \varphi)$ над точкой юга.

Склонение звезды δ есть угол между направлением на неё и плоскостью экватора. Суточный путь звезды проецируется на плоскость рисунка в виде отрезка AB . Чтобы определить высоты точек A и B над горизонтом, найдём их угловые расстояния от зенита, т.е. углы ZOA и ZOB . Из рисунка видно, что

$$\angle ZOA = |\delta - \varphi|; \quad \angle ZOB = 180^\circ - |\delta + \varphi|.$$

Если величина под знаком модуля положительна, то соответствующая кульминация происходит к северу от зенита, если она отрицательна, то к югу от зенита. Отсюда мы можем получить выражения для высоты светила в верхней и нижней кульминации:

$$h_{\text{В}} = 90^\circ - \angle ZOA = 90^\circ - |\delta - \varphi|.$$

$$h_{\text{Н}} = 90^\circ - \angle ZOB = -90^\circ + |\delta + \varphi|.$$

Полученные формулы универсальны, их можно использовать для любых светил в Северном и Южном полушариях Земли, т.е. для любых значений широты и склонения. Подставляя численные значения, получаем, что верхняя кульминация звезды со склонением $+45^\circ$ в Москве произойдет на высоте 79° над южным горизонтом, нижняя кульминация — на высоте 11° над северным горизонтом. Эта звезда в Москве незаходящая.

Ответ: 79° ; 11° .

Задача 2. В некоторой точке Земли звезды Дубге и Мерак (α и β Большой Медведицы) одновременно появились над горизонтом. Чему (примерно) равна широта точки наблюдения?

Решение: Звезды Дубге и Мерак — крайние западные звезды ковша Большой Медведицы. Эти звезды — основа самого известного и легкого способа поиска Полярной звезды, так как линия, проведенная от Мерака к Дубге и продолженная далее, проходит очень близко от Полярной звезды.



По условию задачи звёзды Дубге и Мерак одновременно появляются над горизонтом. Следовательно, соединяющая их линия совпадает с горизонтом, и Полярная звезда также наблюдается на горизонте. Это может иметь место только вблизи экватора, на широте 0° .

Ответ: Экватор, 0° .

Задача 3. Что ярче при наблюдении глазом — одна звезда 1^m , три звезды 2^m или пять звёзд 3^m ?

Решение: В соответствии с определением звёздной величины звезда 1^m в 2,512 раза ярче звезды 2^m , которая, в свою очередь, в 2,512 раза ярче звезды 3^m . Если обозначить яркость одной звезды 3^m как j , то яркость одной звезды первой величины, трёх звёзд второй величины и пяти звёзд третьей величины составит соответственно:

$$J_1 = j \cdot 2,512 \cdot 2,512 \approx j \cdot 6,310;$$

$$J_2 = j \cdot 2,512 \cdot 3 = j \cdot 7,536;$$

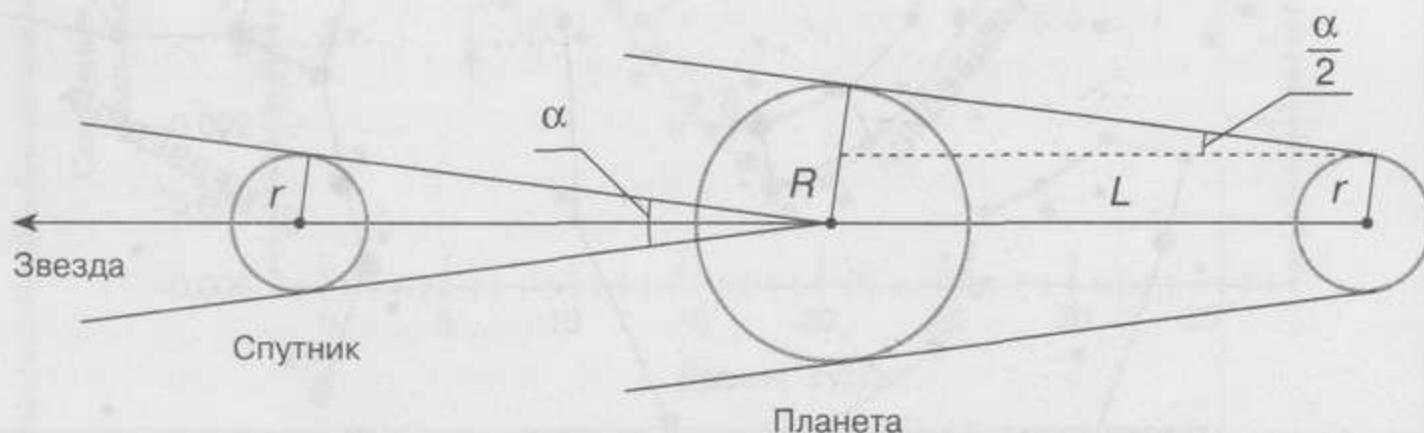
$$J_3 = j \cdot 5.$$

Выходит, что ярче светят три звезды второй величины.

Ответ: Ярче три звезды второй величины.

Задача 4. У некоторой планеты, обращающейся вокруг далёкой звезды по круговой орбите, есть спутник, его орбита также круговая. Во время затмений звезды спутником при наблюдении с планеты видимые размеры звезды и спутника совпадают (как у Луны и Солнца на Земле), а когда спутник входит в тень планеты, его угловые размеры совпадают с угловыми размерами тени. Найдите соотношение геометрических размеров планеты и спутника, считая их существенно меньшими их взаимного расстояния, а само расстояние — существенно меньшим расстояния до звезды.

Решение: Изобразим положение планеты и спутника во время затмений центральной звезды и спутника, наблюдаемых с планеты:



Тень спутника представляет собой конус с углом раствора α , равным угловому диаметру звезды и спутника при наблюдении из центра планеты (размеры планеты считаем существенно меньшими расстояния до спутника). Обозначив радиус спутника через r , а его расстояние от планеты — через L , получаем связывающее их выражение:

$$r = L \frac{\alpha}{2}.$$

Расстояние до звезды существенно больше радиуса орбиты спутника, тень самой планеты представляет собой конус с таким же углом раствора. Из условия равенства размеров тени планеты и спутника получаем

$$R - r = L \frac{\alpha}{2}.$$

Отсюда $R = 2r$, планета вдвое больше своего спутника по радиусу.

Ответ: $R = 2r$.

Задача 5. В некотором пункте Земли в ночь на 1 января звёздное время совпало с московским временем. Какова географическая долгота этого пункта? Уравнением времени пренебrecь.

Дано:

$$S = T_M$$

$\lambda = ?$

Решение: За 10 дней до наступления Нового года, 21—22 декабря, происходит зимнее солнцестояние. Прямое восхождение Солнца в это время составляет 18 часов, а звёздное время в солнечную полночь — 6 часов. Если пренебrecь уравнением времени, то каждый день прямое восхождение Солнца увеличивается на 4 минуты. В новогоднюю ночь оно будет равно 18 часов 40 минут. Звёздное время в солнечную полночь S_0 составит 6 часов 40 минут. Понятия истинного и среднего солнечного времени мы не вводим, так как пренебrecаем уравнением времени и данные временные шкалы совпадают. Обозначим местное солнечное время в указанном в условии пункте через T . Тогда звёздное время будет равно

$$S = S_0 + T.$$

Время T связано со Всемирным временем UT соотношением

$$T = UT + \lambda,$$

где λ — географическая долгота пункта. Московское время (в часах) равно

$$T_M = UT + 3.$$

По условию задачи величины S и T_M совпадают. Отсюда

$$S_0 + T = T - \lambda + 3,$$

$$\lambda = 3 - S_0.$$

Долгота места равна $-3^{\text{ч}} 40^{\text{м}}$ или 55° западной долготы.

Ответ: 55° з.д.

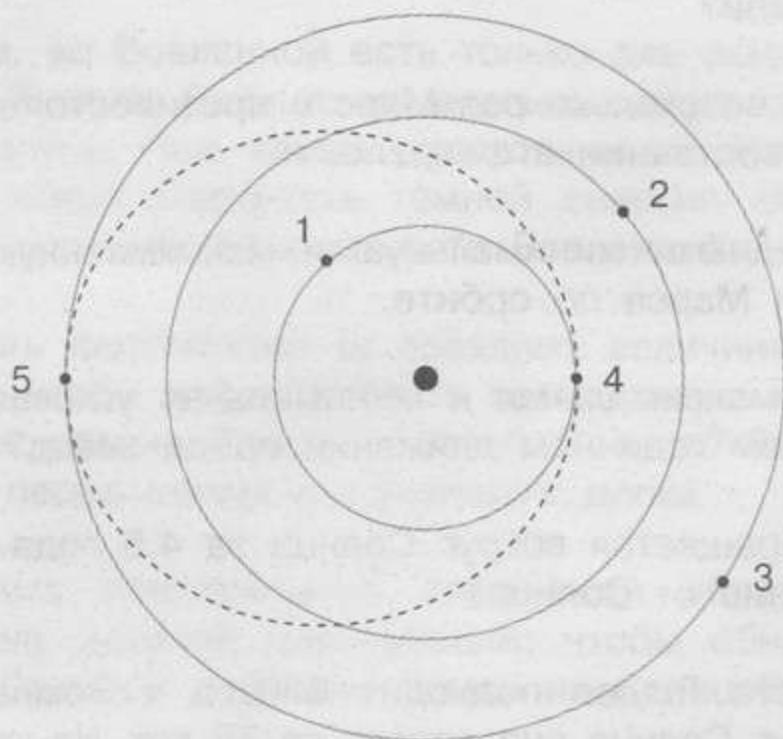
III. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

- 3.1.** Во сколько раз Юпитер ближе к Земле в противостоянии, чем в соединении? Орбиты планет считать круговыми.
- 3.2.** Венера оказалась в наибольшей восточной элонгации в декабре. В каком созвездии она при этом видна?
- 3.3.** У каких планет в системе Птолемея центры эпициклов всегда находятся на линии, соединяющей Солнце и Землю? Почему?
- 3.4.** Меркурий находится в наибольшей западной элонгации. В какой стороне неба его можно увидеть невооружённым глазом и в какое время суток?
- 3.5.** Венера видна на небе рядом с растущей Луной. Какая у Венеры элонгация — западная или восточная?
- 3.6.** На какой максимальной высоте над горизонтом можно найти Меркурий невооружённым глазом? Считать, что Меркурий становится видимым на сумеречном небе при погружении Солнца под горизонт, равном 6° .
- 3.7.** Описывают ли внутренние планеты петли в своём видимом движении среди звёзд? Если да, то вблизи какой конфигурации?
- 3.8.** У какой планеты легче пронаблюдать петлеобразное движение среди звёзд — у Венеры или Марса? Орбиту Марса считать круговой.
- 3.9.** Марс описал петлю по созвездию Рыб. В какой сезон года это происходило?
- 3.10.** На какое максимальное угловое расстояние от Солнца может уйти Земля при наблюдении с Марса? Орбиту Марса считать круговой.
- 3.11.** Звезда удалена от Солнца на расстояние 10 световых лет точно в направлении точки летнего солнцестояния. Найдите её максимальное геоцентрическое прямое восхождение α . В какой сезон года оно достигается?

- 3.12.** Параллакс звезды, измеренный на Марсе, составил $0,1''$. Найдите расстояние до звезды в парсеках и световых годах.
- 3.13.** Большая полуось орбиты Марса равна $1,52$ а.е., эксцентриситет $0,09$. Найдите минимальное расстояние между Марсом и Землей в «великом противостоянии». Орбиту Земли считать круговой.
- 3.14.** Почему «великие противостояния» Марса случаются только летом и в начале осени?
- 3.15.** Определите, во сколько раз Марс в противостоянии в августе ярче, чем в противостоянии в феврале.
- 3.16.** Найдите среднюю, минимальную и максимальную скорость движения Земли и Марса по орбите.
- 3.17.** Чему равна максимальная и минимальная угловая скорость Солнца в его видимом годичном движении среди звезд?
- 3.18.** Астероид обращается вокруг Солнца за $4,5$ года. Каково его среднее расстояние от Солнца?
- 3.19.** Иногда комета Галлея подходит близко к Земле. При этом один оборот вокруг Солнца она делает за 75 лет. На какое максимальное расстояние от Солнца она может удалиться?
- 3.20.** Расстояние от Юпитера до его спутника Ио на 10% больше расстояния между Землей и Луной. Определите орбитальный период Ио.
- 3.21.** Какой единственный естественный спутник планеты Солнечной системы при наблюдении с этой планеты восходит на западе и заходит на востоке?
- 3.22.** Какая планета в 2011 году завершила один оборот с момента своего открытия и оказалась в той же точке неба?
- 3.23.** Некоторое тело движется в перигелии в три раза быстрее, чем в афелии. Найдите эксцентриситет его орбиты.
- 3.24.** Некоторая планета движется по орбите со скоростью, примерно втрое меньшей скорости Земли. Что это за планета?

3.25. Космический аппарат, располагаясь на круговой околосолнечной орбите, включил двигатели и увеличил свою скорость в полтора раза. Какой стала его новая орбита?

3.26. На рисунке показаны 5 тел, обращающихся вокруг единого центра притяжения, и их орбиты. Тела 4 и 5 движутся по эллиптической орбите, показанной пунктиром. Расположите тела 1, 2, 3, 4 и 5 в порядке увеличения их мгновенной линейной скорости.



3.27. Люди будущего решили разделить Землю на 1000 одинаковых тел с той же средней плотностью. Каким будет минимальное время облёта такого тела по орбите?

3.28. Хороший футболист может придать мячу скорость 30 м/с. На астероидах какого размера можно играть в футбол? Плотность астероидов считать равной плотности Земли.

3.29. Самолёт летит на высоте 10 км вдоль земного экватора с запада на восток со скоростью 800 км/ч. Искусственный спутник Земли обращается вокруг нашей планеты по круговой орбите так, что всё время находится над самолётом. Найти расстояние между спутником и самолётом.

3.30. Звезда — белый карлик имеет массу, равную массе Солнца, и минимальное время облёта по орбите 10 секунд. Найдите плотность этой звезды.

- 3.31.** Общая теория относительности предсказала существование «чёрных дыр» — объектов, покинуть которые не может даже свет. Определите радиус чёрной дыры с массой, равной массе Солнца.
- 3.32.** Перед вторым космонавтом в истории человечества Германом Титовым стояла задача провести в космосе более суток (25 часов). Какое максимальное количество оборотов вокруг Земли он мог сделать?
- 3.33.** Как соотносятся скорости в перигеуме и афогеуме эллиптической орбиты с круговыми скоростями, соответствующими расстояниям перигеума и афогеума?
- 3.34.** Рассчитайте радиусы стационарных орбит вокруг планет Солнечной системы (орбит с периодом, равным периоду осевого вращения планеты). Около каких планет могут существовать такие орбиты?
- 3.35.** Полёт космического аппарата с Земли к некоторой планете по оптимальной траектории занял 6 лет. Что это за планета?
- 3.36.** Космическая экспедиция перелетает с Земли на Марс и обратно с Марса на Землю по оптимальной траектории. Какое минимальное время экспедиции придётся провести на Марсе? Орбиту Марса считать круговой.
- 3.37.** Аппарат совершил перелёт с Земли к некоторой малой планете в главном поясе астероидов по оптимальной траектории и, пролетев мимо неё, по той же орбите вернулся на Землю. Найдите расстояние малой планеты от Солнца.
- 3.38.** Сколько времени длился бы перелёт от Земли к Луне у американских аппаратов «Аполлон», если бы он происходил по энергетически оптимальной траектории?
- 3.39.** Искусственные спутники Земли движутся по орбитам на высотах не менее 150 км. Определите максимальную угловую скорость спутника в небе Земли.
- 3.40.** Какую планету Солнечной системы можно облететь быстрее всего, не включая при этом двигатели?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. В июле 1969 года американские астронавты Нил Армстронг и Эдвин Олдрин совершили посадку на поверхность Луны и провели на ней 21 час 36 минут. Сколько раз они могли выходить на прямую связь (без участия Земли) с третьим членом экипажа Джоном Коллинзом и какова могла быть максимальная длительность каждого сеанса? Коллинз находился в командном модуле, обращающемся вокруг Луны по круговой орбите, проходящей над местом прилунения Армстронга и Олдрина на высоте 111 км. Орбитальное и осевое вращение Луны не учитывать.

Дано:

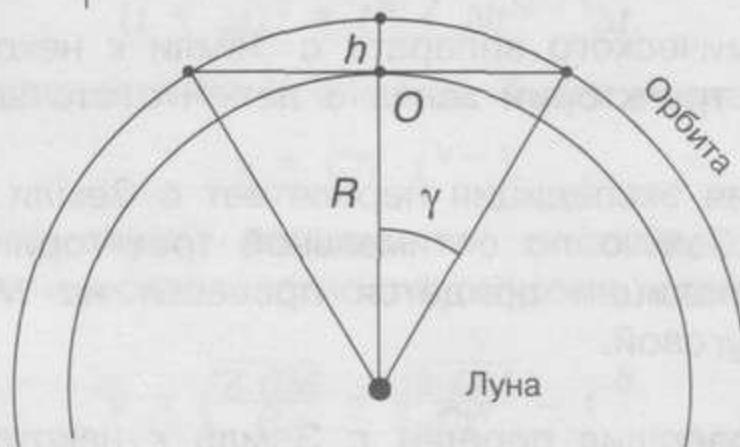
$$T = 21 \text{ ч } 36 \text{ мин}$$

$$h = 111 \text{ км}$$

$$N = ?$$

$$\tau = ?$$

Решение: Изобразим Луну и орбиту командного модуля, проходящую над местом посадки (точка O). Обозначим радиус Луны через R , а высоту модуля над поверхностью Луны — через h .



Определим, при каком угловом перемещении по орбите γ (относительно положения над местом посадки) командный модуль окажется на лунном горизонте:

$$\gamma = \arccos \frac{R}{R+h} = 20^\circ.$$

Получается, что прямую связь с Джоном Коллинзом можно было поддерживать, пока командный модуль располагался внутри 40° — дуги своей орбиты, что составляет $\frac{1}{9}$ часть её полной длины. Найдём теперь орбитальный период командного модуля, учитывая, что его орбита круговая и он движется с первой космической скоростью для данного расстояния от центра Луны:

$$t = 2\pi \frac{(R+h)}{v_1} = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}}.$$

Здесь M — масса Луны. Численная подстановка даёт результат: 1,98 часа. За время T , которое Нил Армстронг и Эдвин Олдрин провели на Луне (21,6 часа), командный модуль почти завершил $N = \frac{T}{t} = 11$ оборотов. Именно столько сеансов прямой связи можно было организовать за данный период. Продолжительность каждого сеанса τ могла составлять $\frac{1}{9}$ орбитального периода t , т.е. 13,2 минуты.

Ответ: 11 сеансов; 13,2 мин.

Задача 2. Рассчитайте третью космическую скорость — минимальную скорость старта космического корабля с Земли, чтобы он мог без последующих затрат энергии навсегда покинуть Солнечную систему.

Решение: Вторая космическая скорость, необходимая для того, чтобы с расстояния $R = 1$ а.е. преодолеть притяжение Солнца с массой M и улететь за пределы Солнечной системы, равна

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

и составляет 42,1 км/с. Но Земля сама движется по орбите со скоростью 29,8 км/с, и при запуске аппарата в направлении движения Земли его скорость относительно Земли может быть равна всего $u = 12,3$ км/с. Но такой скоростью должна быть уже после преодоления земного притяжения. Для определения стартовой скорости воспользуемся законом сохранения энергии:

$$v_3 = \sqrt{u^2 + \frac{2GM}{r}}$$

В результате третья космическая скорость v_3 на Земле составляет 16,7 км/с (здесь m и r — масса и радиус Земли).

Ответ: 16,7 км/с.

Задача 3. Искусственный спутник Земли имеет массу 100 кг и обращается вокруг Земли по круговой орбите с радиусом, равным среднему расстоянию Луны от Земли. Спутник состоит из двух одинаковых частей, соединённых стержнем. По команде с Земли в стержне срабатывает импульсный двигатель, отстреливающий две части друг от друга. Какая энергия требуется, чтобы после такого манёвра из окрестностей Земли улетела одна из двух частей спутника? обе части спутника? Какое направление импульса энергетически более выгодно в первом и во втором случаях?

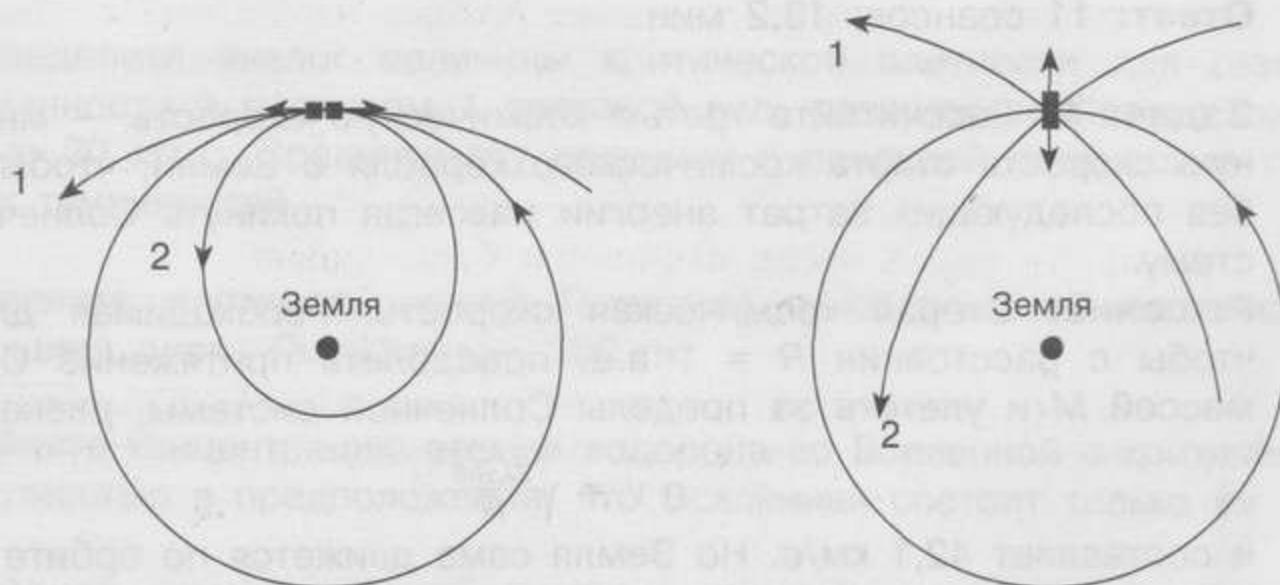
Дано:

$m = 100 \text{ кг.}$

$E_1 - ?$

$E_2 - ?$

Решение: По III закону Ньютона в результате работы двигателя в стержне две одинаковые части спутника получают приращения скорости, равные по величине и противоположные по направлению. Если перед нами стоит задача вывести из поля тяготения Земли только одну часть, то можно использовать её вращение вокруг Земли, придав ей дополнительную скорость в этом же направлении (левый рисунок). При этом второй спутник перейдёт на эллиптическую орбиту.



Приращение скорости, которое получит первая часть спутника, равно разности второй и первой космических скоростей для данного расстояния от Земли:

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} - \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{\frac{GM}{R}} (\sqrt{2} - 1).$$

Здесь M — масса Земли, R — радиус круговой орбиты спутника, равный среднему расстоянию до Луны. Вторая часть спутника получает такое же по модулю приращение скорости. В системе отсчёта, двигавшейся до включения двигателя вместе со спутником, обе части покоились, а после его работы они стали двигаться со скоростью Δv . Следовательно, полученная ими энергия равна

$$E_1 = \frac{m(\Delta v)^2}{2} = \frac{3 - 2\sqrt{2}}{2} \frac{GMm}{R},$$

что составляет $8,89 \cdot 10^6$ Дж. Здесь m — масса спутника (обеих частей вместе).

Если же необходимо вывести на параболические орбиты обе половины спутника, то придавать им импульс, параллельный направлению их орбитального движения, уже не будет энергетически выгодно, так как это будет способствовать переводу на параболическую

орбиту одной половины, но существенно затруднит перевод второй половины. Проще всего придать обеим частям приращение скорости, перпендикулярное их орбитальному движению (правый рисунок). Чтобы обе части после импульса имели вторую космическую скорость, приращение должно быть равным

$$\Delta v = \sqrt{v_2^2 - v_1^2} = \sqrt{\frac{GM}{R}},$$

т.е. первой космической скорости. Для этого потребуется энергия

$$E_2 = \frac{m(\Delta v)^2}{2} = \frac{GMm}{R},$$

равная $5,18 \cdot 10^7$ Дж. Этот же результат можно напрямую получить из закона сохранения энергии с учётом того, что все части спутника в результате покинут окрестности Земли. Обратите внимание, что данная энергия почти в 6 раз больше, чем в случае вывода на параболическую орбиту только одной половины спутника!

Ответ: $8,89 \cdot 10^6$ Дж; $5,18 \cdot 10^7$ Дж.

Задача 4. Две звезды солнечной массы обращаются вокруг общего центра масс за 25 суток. Третья звезда, также похожая на Солнце, удалена от этой пары на расстояние в 100 раз больше, чем расстояние между первыми двумя звёздами. Каков период обращения третьей звезды?

Дано:

$$T = 25 \text{ сут}$$

$$b = 100 \text{ а}$$

$t = ?$

Решение: Расстояние между двумя звёздами в тесной паре определяется из обобщённого III закона Кеплера:

$$a = \left(\frac{G \cdot 2MT^2}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

и составляет 0,21 а.е. Здесь M — масса Солнца, T — период обращения звёзд. Третья звезда обращается на расстоянии $b = 21$ а.е. от данной пары. Период её обращения можно также найти по III закону Кеплера, однако при этом нужно учесть, что суммарная масса системы составляет уже 3 массы Солнца:

$$t = \left(\frac{4\pi^2 b^3}{G \cdot 3M} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Период получается равным 55,9 лет.

Ответ: 55,9 лет.

IV. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

4.1. Сколько всего небесных светил, перемещающихся относительно далёких звёзд, было включено в систему Птолемея?

4.2. В 2003 году была открыта далёкая малая планета Седна. В перигелии она подходит к Солнцу на 76,3 а.е., эксцентриситет её орбиты 0,859. Определите период обращения Седны вокруг Солнца.

4.3. Возможно ли существование тел Солнечной системы с периодом обращения в 1 миллион лет?

4.4. Где находится центр масс Солнечной системы — внутри Солнца или снаружи?

4.5. В ночь на 1 января 1801 года была открыта карликовая планета Церера, которая оказалась в противостоянии на расстоянии 1,75 а.е. от Земли. Орбита Цереры близка к круговой. Сколько полных оборотов вокруг Солнца сделала Церера с тех пор до начала 2018 года?

4.6. Церера оказалась самым крупным объектом главного пояса астероидов (диаметр 1000 км). Определите диапазон возможных значений её углового диаметра при наблюдении с Земли.

4.7. Кометы прилетают во внутренние районы Солнечной системы с её далёких окраин. Исходя из этого, определите диапазон возможных скоростей их пролёта относительно Земли.

4.8. Предположим, место Солнца в центре Солнечной системе занял Юпитер, а Земля продолжила вращаться по орбите с тем же радиусом. Каким станет орбитальный период обращения Земли?

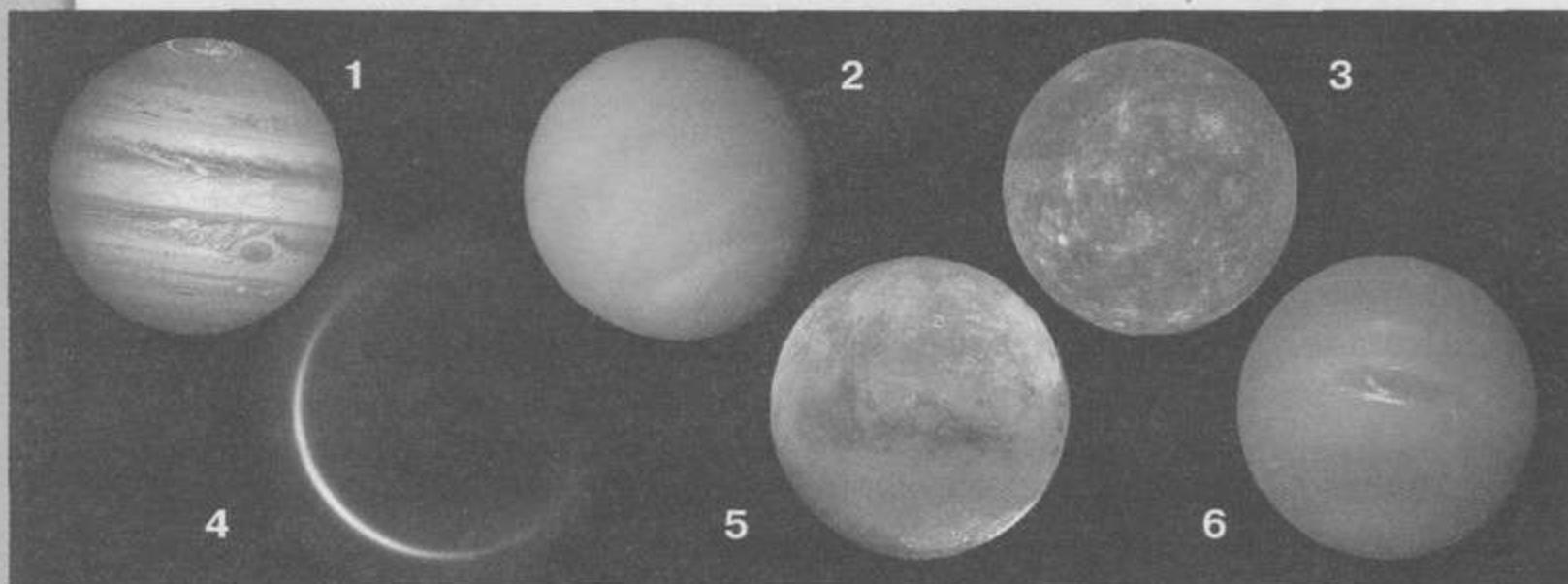
4.9. Какая яркая звезда играла роль Полярной 14 000 лет назад?

4.10. Серебристые облака могут быть видны 21 июня в Ярославле (широта $57,6^\circ$) в зените всю ночь. Определите высоту серебристых облаков.

4.11. Определите величину ускорения свободного падения на Северном полюсе Земли.

- 4.12.** Если всю атмосферу Земли сделать однородной с сохранением массы и приземных физических условий, она будет иметь толщину 8 км. Найдите отношение массы атмосферы к массе Земли.
- 4.13.** Что массивнее — атмосфера или гидросфера Земли?
- 4.14.** Звезда β Малой Медведицы ($\alpha = 14,8$ ч, $\delta = +79^\circ$) получила название Кохаб, или «Звезда Севера». Оцените, в каком веке ей могли дать такое название.
- 4.15.** Стрелка с каким полюсом магнита у компаса указывает направление на север?
- 4.16.** Могла ли появиться жизнь вблизи экватора Земли в отсутствие парникового эффекта?
- 4.17.** Почему длительность солнечных суток на Луне не совпадает с периодом её вращения?
- 4.18.** Сколько приливов в лунный месяц происходит в одной точке Земли?
- 4.19.** Много ли воды в лунных морях?
- 4.20.** На какой глубине под поверхностью Земли расположен центр масс системы Земля—Луна?
- 4.21.** Где приливы сильнее — на экваторе или у полюсов Земли?
- 4.22.** Как со временем меняется угловая и линейная скорость движения Луны вокруг Земли за счёт приливов?
- 4.23.** При какой массе Луны приливы на Земле периодически исчезали бы? В какой фазе Луны это происходило бы?
- 4.24.** Положение какого большого круга небесной сферы — небесного экватора или эклиптики — сильнее изменится относительно звёзд в ближайшие 1000 лет?

- 4.25.** Где сила тяжести больше — в лунном море или на материке?
- 4.26.** В чём причина точного совпадения орбитального и осевого периодов вращения Луны? Всегда ли так было?
- 4.27.** На какой планете Солнечной системы может действовать самая большая приливная сила? На какой планете Солнечной системы самые большие высоты приливов?
- 4.28.** Перед вами фото некоторых планет Солнечной системы. Одна из планет представлена сразу на двух фотографиях. Какие это фотографии и что это за планета?



- 4.29.** Какая планета Солнечной системы обладает самой горячей поверхностью и почему?
- 4.30.** У какой планеты, кроме Земли, была впервые открыта атмосфера? Когда и как это было сделано?
- 4.31.** На какое небесное тело — Луну, Венеру или Марс — было проще осуществить мягкую посадку космического аппарата и почему?
- 4.32.** Перечислите все небесные объекты, видимые невооружённым глазом на дневном небе Земли.
- 4.33.** Во сколько раз углекислого газа в атмосфере Венеры больше, чем в атмосфере Земли?

- 4.34.** Каким становится угловой диаметр Юпитера во время его противостояний?
- 4.35.** Какая внешняя планета сильнее всего меняет свою яркость от противостояния к соединению? Во сколько раз она меняется? Орбиты планет считать круговыми.
- 4.36.** Плотность какой планеты Солнечной системы меньше плотности воды?
- 4.37.** У какой планеты самое сильное сжатие формы у полюсов?
- 4.38.** Кольца каких планет были открыты с Земли, а каких — с борта космических аппаратов?
- 4.39.** Какое тело Солнечной системы обладает самой сильной вулканической активностью? Из-за чего?
- 4.40.** Сколько объектов Солнечной системы, которые сейчас считаются карликовыми планетами, было известно до 1990 года? Как они называются?
- 4.41.** Орбитальный период малой планеты Хаумеа равен 282 годам. Сколько времени нужно лучу света, чтобы дойти от Солнца до Хаумеа, отразиться и попасть на Землю? Считать орбиту Хаумеа круговой, планета в противостоянии с Солнцем при наблюдении с Земли.
- 4.42.** Оцените длительность покрытия звезды Плутоном (в противостоянии с Солнцем) при наблюдении с Земли.
- 4.43.** В какой сезон — в равноденствие или солнцестояние — теплее на экваторе Урана?
- 4.44.** В настоящее время ведутся поиски возможной девятой планеты Солнечной системы, которая может иметь диаметр в 10 диаметров Земли и располагаться в 280 а.е. от Солнца. Астероид какого диаметра в главном поясе будет иметь такую же яркость на Земле, как и эта планета? Отражательную способность астероида и планеты считать одинаковой.

- 4.45.** Перед вами фотографии нескольких объектов Солнечной системы (фото 1). Расположите их в порядке увеличения размеров.

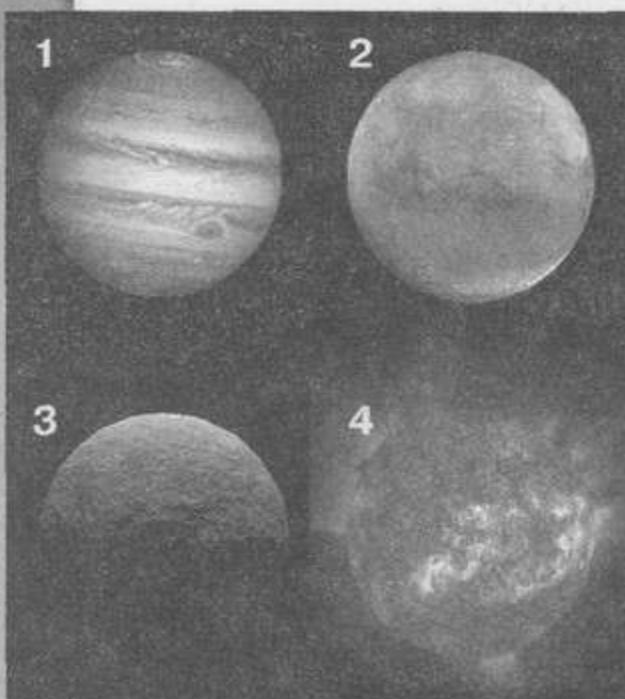


Фото 1

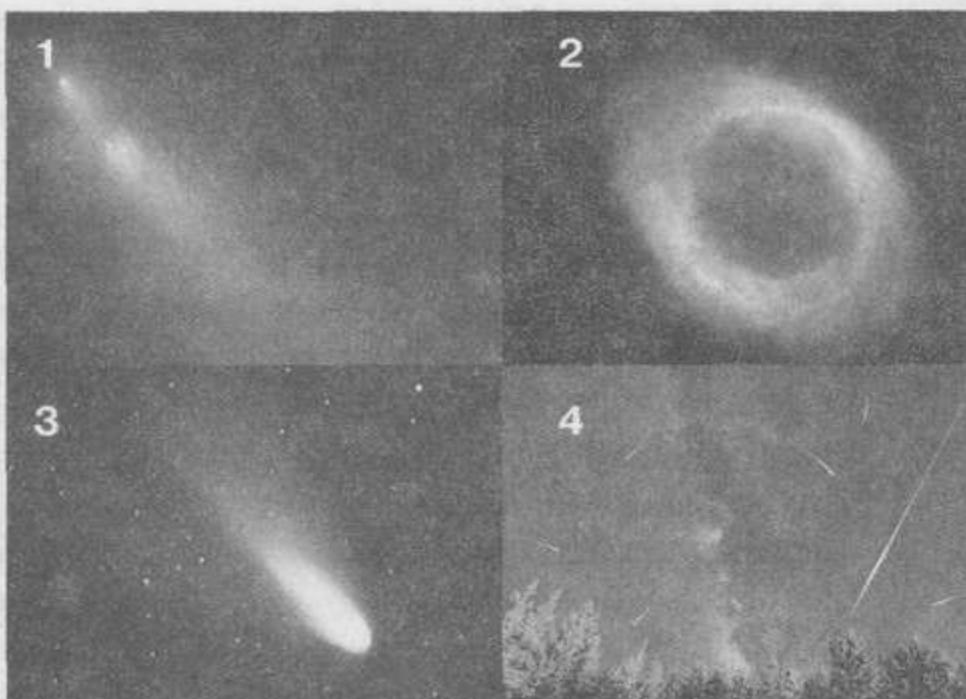


Фото 2

- 4.46.** Перед вами фотографии нескольких небесных объектов и явлений (фото 2). Найдите фото объекта, не имеющего общего происхождения со всеми остальными.

- 4.47.** Видимая яркость астероидов пропорциональна $r^{-2} \cdot d^{-2}$, где r и d — расстояние астероида от Солнца и Земли. Для комет яркость пропорциональна $r^{-N} \cdot d^{-2}$, где число N варьирует от 4 до 6. В чём состоит причина такой разницы?

- 4.48.** Когда в XXII веке сложатся благоприятные условия для наблюдения кометы Галлея?

- 4.49.** Почему доля ярких комет больше среди комет с параболическими или даже гиперболическими орбитами, а среди короткопериодических комет (период менее 100 лет) ярких очень мало?

- 4.50.** Метеорный поток Леониды резко усиливается раз в 33 года. Найдите афелийное расстояние кометы Темпеля—Туттля — прародительницы потока.

- 4.51.** С какими скоростями метеорные тела вторгаются в атмосферу Земли?

4.52. Оцените энергию падения метеорита массой 1 т на Землю в тротиловом эквиваленте. Энергия взрыва 1 кг тротила равна 4,2 МДж.

4.53. По современным представлениям Луна образовалась из множества мелких осколков, возникших при столкновении исторической Земли с другой протопланетой. Считая средний радиус осколков равным 1 км, их расстояние от Земли — 60 000 км, определите, во сколько раз они вместе были ярче на ночном небе, чем нынешняя Луна. Оптические свойства лунных пород считать неизменными с тех пор.

4.54. Долгое время астероиды считались осколками некой доисторической планеты Фазтон. Объясните, почему эта гипотеза отвергнута в настоящее время.

4.55. Темп нагревания метеорного тела при его вторжении в атмосферу пропорционален третьей степени его скорости. Какое из двух одинаковых тел опаснее — движущееся по орбите навстречу Земле или догоняющее Землю?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Предположим, что в Солнечной системе есть планета Противоземля малой массы, движущаяся точно по орбите Земли с отставанием на полгода. Определите максимальное угловое расстояние Противоземли от Солнца при наблюдении с Земли. Удалось бы эту планету зарегистрировать с помощью наземных обсерваторий?

Найти:
 γ — ?

Решение: По условию задачи масса планеты мала, и мы не сможем зарегистрировать её по гравитационным возмущениям на движения других небесных тел. Однако, как ни странно, мы сможем её просто увидеть! Вспомним, что орбита Земли является эллиптической с эксцентриситетом $e = 0,017$.

По II закону Кеплера радиус-вектор, направленный из центра Солнца в центр планеты, за равные промежутки времени описывает равные площади. Изобразим орбиту Земли (и Противоземли) вокруг Солнца на рисунке. Солнце находится в точке S , перигелий орбиты — в точке P , афелий — в точке A . Обозначим центр эллип-

Дано:

$$T = 224,70 \text{ сут}$$

$$P = 243,02 \text{ сут}$$

$$\Delta\lambda - ?$$

$$N - ?$$

Решение: Синодический период Венеры равен

$$S = \frac{T \cdot T_0}{T_0 - T} = \frac{224,7 \cdot 365,26}{365,26 - 224,7} = 583,91 \text{ дней,}$$

где T и T_0 — периоды обращения вокруг Солнца Венеры и Земли соответственно.

Величину солнечных суток на Венере можно вычислить из соотношения

$$S = \frac{T \cdot P}{T + P} = \frac{224,70 \cdot 243,02}{224,70 + 243,02} = 116,75 \text{ дней,}$$

где P — период вращения Венеры вокруг оси. Отсюда получаем, что за период между двумя прохождениями нижнего соединения, то есть один синодический период, на Венере проходит ровно

$$n = \frac{S}{s} = 5 \text{ солнечных суток, т.е. Венера каждое нижнее соединение}$$

располагается к Земле одной стороной (астрономы говорят, что осевое вращение Венеры находится в резонансе с синодическим периодом Венеры по отношению к Земле). Значит, радиолокацией только в нижнем соединении можно построить карту только одного полушария Венеры, а полную карту поверхности построить нельзя.

Ответ: $\Delta\lambda = 0$, числа N не существует.

Задача 3. По современным данным массовая доля кислорода на Солнце составляет 0,8%. На сколько планетных атмосфер типа земной хватило бы солнечного кислорода?

Дано:

$$\eta = 0,8\%$$

$$N - ?$$

Решение: Определим полную массу кислорода на Солнце:

$$M_{Os} = \eta \cdot M_0 = 1,6 \cdot 10^{28} \text{ кг.}$$

Здесь M_0 — масса Солнца. Далее нам нужно определить массу атмосферы Земли. Это несложно сделать, зная атмосферное давление p у поверхности нашей планеты. Это есть сила, с которой столб атмосферы давит на единицу площади поверхности. Масса этого столба равна

$$\mu = \frac{p}{g},$$

где g — ускорение свободного падения на поверхности Земли. Чтобы найти общую массу, умножим величину μ на площадь поверхности Земли:

$$m = 4\pi R_E^2 \mu = \frac{4\pi R_E^2 p}{g} = \frac{4\pi R_E^4 p}{GM_E}.$$

Здесь R_E и M_E — радиус и масса Земли соответственно. Масса атмосферы Земли составляет $5,2 \cdot 10^{18}$ кг. Содержание в ней кислорода составляет 21% по объёму и практически такую же долю по массе (так как молярные массы кислорода и основного атмосферного газа, азота, близки). В итоге масса кислорода в атмосфере Земли составляет чуть более 10^{18} кг. Солнечного кислорода хватило бы на $1,5 \cdot 10^{10}$, т.е. на 15 млрд атмосфер типа земной.

Ответ: 15 млрд.

Задача 4. Недавно была открыта комета, имеющая блеск 10^m . Расчёты орбиты показали, что через два месяца она вдвое приблизится к Солнцу и Земле. Можно ли будет наблюдать её невооружённым глазом в это время? Считать, что яркость кометы обратно пропорциональна четвёртой степени расстояния до Солнца.

Решение: Когда комета приблизится к Солнцу в два раза, она станет посылать в космическое пространство в 16 раз больше света. При этом она ещё вдвое приблизится к Земле, и её видимая яркость на нашей планете усилится в 64 раза. Нетрудно посчитать, что при этом её звёздная величина уменьшится чуть более чем на $4,5^m$ (вспомним, что разница в 5^m соответствует отношению яркостей в 100 раз, а 1^m — в 2,512 раза). Таким образом, она будет светить чуть ярче звезды $5,5^m$, т.е. вполне сможет быть найдена невооружённым глазом на тёмном ясном безлунном небе, разумеется, если не будет находиться слишком близко к Солнцу.

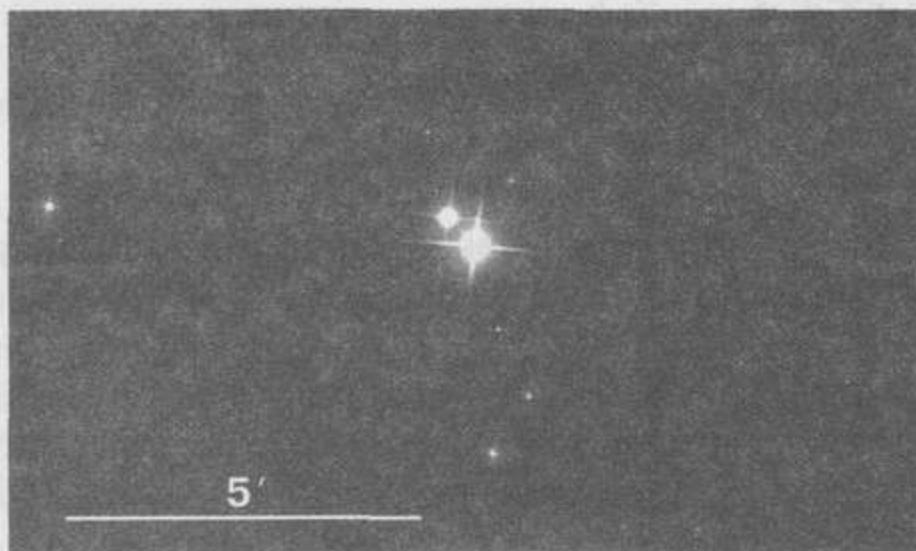
Ответ: Да, можно.

V. АСТРОФИЗИКА И ЗВЁЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ

5.1. Угловое расстояние между компонентами двойной звезды равно $2''$. Телескоп с каким диаметром объектива и увеличением нужно использовать, чтобы увидеть компоненты по отдельности?

5.2. Разрешение человеческого глаза в ночное время составляет примерно $2'$. Каким оно будет при использовании телескопа с диаметром объектива 8 см и увеличении 200 крат?

5.3. Перед вами фотография двойной звезды, удалённой от нас на 118 пк. Определите минимальное расстояние между звёздами в паре в астрономических единицах.



5.4. Телескоп имеет объектив с диаметром 40 см и фокусным расстоянием 4 м. Какой нужен окуляр для достижения увеличения в 50 крат?

5.5. Найдите угловое разрешение системы из наземного радиотелескопа и космического аппарата «Радиоастрон» в режиме радиоинтерферометра, если «Радиоастрон» удалён от Земли на 330 000 км, а наблюдения проводятся на длине волны 18 см.

5.6. Какой нужен телескоп, чтобы визуально наблюдать звёзды 16^m ? Разница в 5^m соответствует отношению яркости в 100 раз.

5.7. Иногда при хороших атмосферных условиях для наблюдения ярких тесных двойных звёзд используется синий светофильтр. Зачем это делается?

- 5.8.** В комплект поставки любительских телескопов обычно входят несколько окуляров с фокусными расстояниями, различающимися в 10—20 раз. Зачем это делается?
- 5.9.** Объектив телескопа имеет диаметр 20 см и фокусное расстояние 1 м. Окуляр с каким максимальным фокусным расстоянием имеет смысл использовать при наблюдениях с этим телескопом?
- 5.10.** На какой длине волны радиотелескоп «РАТАН-600» (кольцо отражателей диаметром 600 м) может достичь углового разрешения в 5''?
- 5.11.** Во сколько раз нужно увеличить диаметр объектива телескопа, чтобы улучшить разрешение в 2 раза? увеличить проникающую способность на 1^m ?
- 5.12.** Какая энергия ежесекундно выделяется с 1 м^2 поверхности Солнца?
- 5.13.** Какой станет светимость Солнца, если оно всё покроется пятнами? Как оно будет выглядеть в небе Земли?
- 5.14.** Какой размер горизонтальной квадратной солнечной батареи нужен для круглосуточного потребления одного небольшого дома (мощность 20 кВт) в тропическом поясе Земли, если КПД солнечной батареи 20%?
- 5.15.** Какая энергия проходит ежесекундно через 1 м^2 горизонтальной поверхности от звезды 0^m , расположенной в зените?
- 5.16.** Какую минимальную мощность излучения фиксирует человеческий глаз?
- 5.17.** Докажите, что если бы могли наблюдать в телескоп диски звёзд, то заметили бы, что их поверхностная яркость определяется только температурой поверхности звезды.
- 5.18.** Известно, что солнечная корона сильно разогревается магнитозвуковыми волнами. Исходя из того что корона состоит в основном из ионизованного водорода, определите её максимально возможную температуру.

- 5.19.** Почему солнечная корона, хоть и будучи значительно горячее поверхности Солнца, светит всё же слабее и видна на Земле только во время полных солнечных затмений?
- 5.20.** С каким светофильтром солнечные пятна будут выглядеть наиболее контрастно? наименее контрастно?
- 5.21.** Как можно наблюдать поверхность Солнца в телескоп, не подвергая глаза опасности?
- 5.22.** Определите величину солнечной постоянной на расстоянии Венеры и Марса.
- 5.23.** Какую температуру имеет звезда, если максимум её излучения приходится на длину волны 4000 ангстрем?
- 5.24.** С помощью современных телескопов были измерены угловые диаметры двух звёзд, и получилось, что у первой звезды он в 10 раз больше, чем у второй. Температура поверхности первой звезды вдвое меньше температуры поверхности второй звезды. Какая из звёзд светит ярче в нашем небе?
- 5.25.** Две главные звезды созвездия Ориона — Бетельгейзе и Ригель — примерно одинаково ярки в небе Земли, но Бетельгейзе в 3,5 раза холоднее. Как соотносятся угловые диаметры этих звёзд?
- 5.26.** Сколько килограммов водорода Солнце сжигает за земные сутки?
- 5.27.** Ускорение свободного падения на поверхности коричневого карлика в 10 раз больше, чем на Земле, а по массе он в 20 раз превосходит Юпитер. Найдите его среднюю плотность.
- 5.28.** Звезда главной последовательности имеет температуру поверхности 10 000 К. Каковы её светимость и спектральный класс?
- 5.29.** Абсолютной звёздной величиной звезды называется её видимая звёздная величина с расстояния 10 пк. Абсолютная звёздная величина Солнца равна $+4,7^m$. Чему равна абсолютная звёздная величина звезды Вега, светимость которой в 40 раз больше светимости Солнца?

- 5.30.** Выведите соотношение «радиус—температура» для сверхгигантов с одинаковой светимостью в 10^5 светимостей Солнца.
- 5.31.** Почему самые сильные линии в спектре Солнца принадлежат ионизованному кальцию, хотя его на Солнце значительно меньше, чем водорода?
- 5.32.** По виду диаграммы Герцшпрунга—Рессела с учётом зависимости «масса—светимость» для звёзд главной последовательности восстановите для этих звёзд соотношение «масса—радиус».
- 5.33.** Звезда видна невооружённым глазом с расстояния 3000 световых лет. Что это за звезда?
- 5.34.** Пульсар имеет радиус 10 км и массу 1,5 масс Солнца. Определите минимально возможный период вращения пульсара.
- 5.35.** Определите минимальный орбитальный период системы из двух пульсаров с характеристиками, аналогичными характеристикам пульсара из предыдущей задачи.
- 5.36.** Найдите гравитационный радиус Земли (радиус, до которого нужно сжать Землю, чтобы она стала чёрной дырой).
- 5.37.** Две чёрные дыры имеют гравитационные радиусы, равные радиусам Земли и Луны, и обращаются вокруг общего центра масс на расстоянии 384 400 км друг от друга. Определите период обращения.
- 5.38.** Гравитационный радиус чёрной дыры виден с её спутника под углом $1''$. Определите линейную скорость кругового обращения спутника.
- 5.39.** Определите возможный орбитальный период обращения Алькора вокруг Мицара, если угловое расстояние между ними на небе — $12'$, параллакс — $0,04''$, суммарная масса системы — 9 масс Солнца.
- 5.40.** Двойная звезда состоит из голубой звезды с температурой поверхности 30 000 К и блеском 0^m и красной звезды с температурой поверхности 3000 К и блеском 5^m . Как соотносятся радиусы этих звёзд?

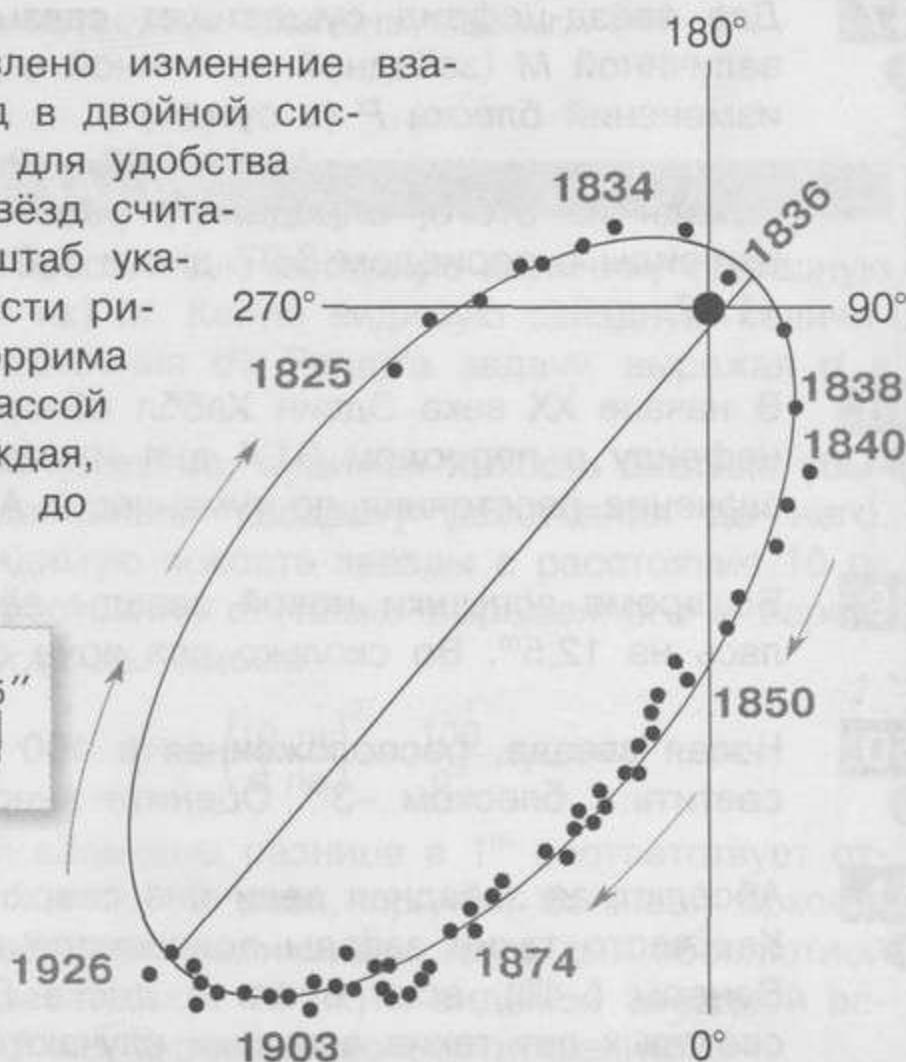
5.41. Две звезды, входящие в затменную двойную систему, имеют одинаковые размеры, а температура первой звезды вдвое больше температуры второй звезды. Орбиты звёзд лежат точно на луче зрения. Определите глубину главного и вторичного минимумов затменной переменной.

5.42. Во время главного минимума затменной переменной звезды в случае круговых орбит затмевается: а) более яркая звезда; б) более крупная звезда; в) более горячая звезда; г) более массивная звезда. Выберите правильные ответы.

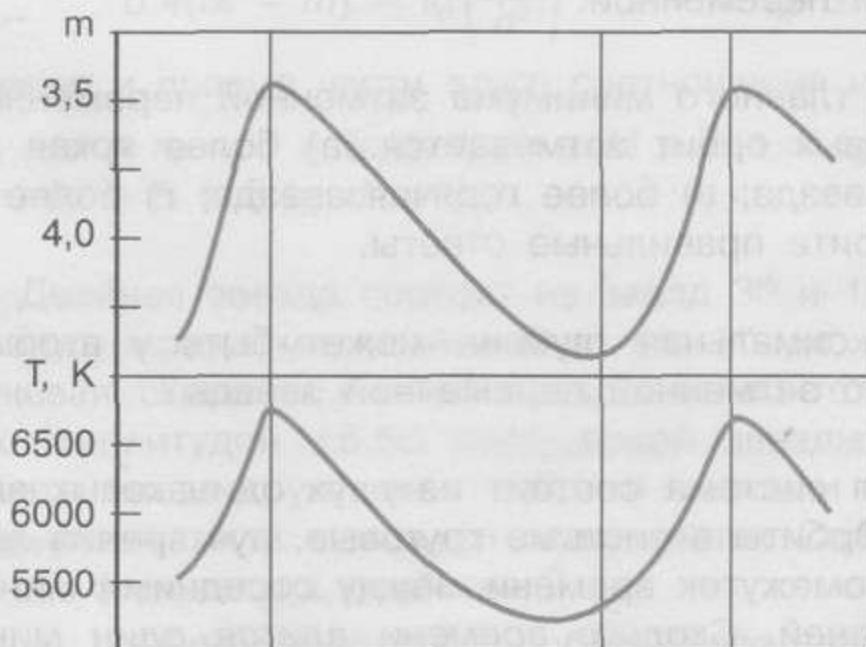
5.43. Какая максимальная глубина может быть у вторичного минимума какой-либо затменной переменной звезды?

5.44. Затменная система состоит из двух одинаковых звёзд, похожих на Солнце. Орбиты в системе круговые, луч зрения лежит в плоскости орбит. Промежуток времени между соседними минимумами составляет 30 дней. Сколько времени длится один минимум (вместе с частными фазами)?

5.45. На диаграмме представлено изменение взаимного положения звёзд в двойной системе Поррима (γ Девы), для удобства изображения одна из звёзд считается неподвижной. Масштаб указан в правой нижней части рисунка. Зная, что Поррима состоит из двух звёзд массой в 1,5 массы Солнца каждая, определите расстояние до Порримы.



- 5.46.** Перед вами графики изменения видимой звёздной величины и температуры звезды δ Цефея в течение одного периода переменности. Сравните размеры звезды в максимуме и минимуме блеска: какой больше и во сколько раз?



- 5.47.** Для звёзд-цефеид существует связь между абсолютной звёздной величиной M (звёздной величиной с расстояния 10 пк) и периодом изменений блеска P (в сутках):

$$M = -1,43 - 2,81 \lg P.$$

Исходя из этого, определите расстояние до Полярной звезды — цефеиды с периодом 3,97 дня и звёздной величиной в небе Земли $+1,97$.

- 5.48.** В начале XX века Эдвин Хаббл обнаружил в туманности Андромеды цефеиду с периодом 31,4 дня и видимой величиной $+17,6^m$. Какое значение расстояния до туманности Андромеды он получил в итоге?

- 5.49.** Во время вспышки новой звезды её звёздная величина уменьшилась на $12,5^m$. Во сколько раз ярче стала звезда?

- 5.50.** Новая звезда, расположенная в 100 пк от нас, на 2 месяца стала светить с блеском -3^m . Оцените энергию взрыва.

- 5.51.** Абсолютная звёздная величина сверхновой звезды составляет -18^m . Как часто такие звёзды появляются в небе Земли с блеском ярче Венеры (-4^m), если всего в диске Галактики радиусом 100 тысяч световых лет такие вспышки случаются раз в 20 лет?

5.52. После вспышки сверхновой звезды в созвездии Тельца, которая наблюдалась в 1054 году, на этом месте неба появилась Крабовидная туманность. Сейчас она имеет угловой радиус $3'$, измерения показали, что внешние части расширяются со скоростью 1600 км/с. Найдите расстояние до туманности.

5.53. В 1885 году в туманности Андромеды была зарегистрирована вспышка сверхновой звезды. Какова была её звёздная величина? Можно ли было наблюдать её в бинокль?

5.54. Тесная двойная система состоит из двух компонентов, удалённых друг от друга на $0,01''$. Расстояние до системы — 10 пк. Период обращения — 6 дней. Может ли в этой системе впоследствии взорваться сверхновая звезда?

5.55. Звёздное скопление имеет возраст 100 миллионов лет и удалено на 100 пк. Какую звёздную величину будут иметь самые яркие звёзды этого скопления, лежащие на главной последовательности диаграммы Гершпрунга—Рессела? Считать, что для этих звёзд светимость пропорциональна четвёртой степени массы.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Звезда имеет абсолютную звёздную величину (звёздную величину с расстояния 10 пк) M . Какую видимую звёздную величину она будет иметь с расстояния d ? Решите задачу, выражая d в парсеках.

Дано:

M

d

m — ?

Решение: Как известно, видимая яркость светила убывает пропорционально квадрату расстояния до него. Обозначим видимую яркость звезды с расстояния 10 пк как J_0 , а с расстояния d (также выраженного в парсеках) как J . Тогда мы имеем

$$\frac{J}{J_0} = \left(\frac{10 \text{ пк}}{d \text{ пк}} \right)^2 = \frac{100}{d^2}.$$

По определению звёздной величины разница в 1^m соответствует отношению яркостей в $10^{0,4} = 2,512$ раза, причём большая яркость соответствует меньшим звёздным величинам. Тогда для абсолютной звёздной величины M (с расстояния 10 пк) и видимой звёздной величины m (с расстояния d пк) справедливо соотношение

$$\frac{J}{J_0} = 10^{0,4(M - m)}.$$

Приравнявая отношение яркостей в двух формулах и логарифмируя, имеем

$$0,4(M - m) = \lg\left(\frac{100}{d^2}\right) = 2 - 2 \lg d.$$

Умножив левую и правую части этого соотношения на 2,5, получаем:

$$M - m = 5 - 5 \lg d; \quad m = M - 5 + 5 \lg d.$$

Ответ: $m = M - 5 + 5 \lg d$.

Задача 2. Двойная звезда состоит из звёзд 3^m и 10^m , угловое расстояние между которыми изменяется от $1''$ до $5''$ с периодом 50 лет. Лучевая скорость слабой звезды относительно Солнца изменяется с амплитудой $\pm 5,55$ км/с, яркой звезды — $\pm 1,11$ км/с. Считая орбиты звёзд круговыми, найдите массы и светимости обеих звёзд, выразив их в массах и светимостях Солнца. Что можно сказать об их физических свойствах?

Дано:

$$m_1 = 3$$

$$m_2 = 10$$

$$d_{\text{MIN}} = 1''$$

$$d_{\text{MAX}} = 5''$$

$$v_1 = \pm 1,11 \text{ км/с}$$

$$v_2 = \pm 5,55 \text{ км/с}$$

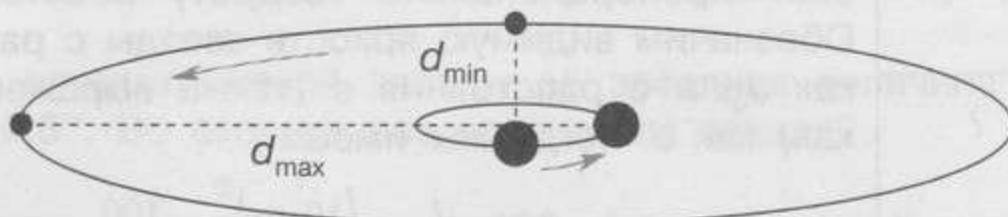
$$M_1 = ?$$

$$M_2 = ?$$

$$L_1 = ?$$

$$L_2 = ?$$

Решение: Если орбиты звёзд круговые, то расстояние между звёздами R , выраженное в астрономических единицах, равно $L \cdot d$, где L — расстояние от Земли до этих звёзд в парсеках, а d — максимальное угловое расстояние между звёздами в угловых секундах. Эта же величина R равна $\frac{vT}{2\pi}$, где v — суммарная орбитальная скорость звёзд, а T — период обращения звёзд вокруг общего центра масс, который будет равен 100 годам, так как за один период обращения звёзды дважды сблизятся и дважды разойдутся на земном небе.



Так как плоскость орбит звёзд наклонена к лучу зрения на угол

$$\alpha = \arcsin \frac{d_{\text{MIN}}}{d_{\text{MAX}}} = 11,5^\circ,$$

суммарная орбитальная скорость будет равна

$$v = \frac{v_1 + v_2}{\cos \alpha} = 6,80 \text{ км/с}.$$

Подставляя численные значения, получаем $R = 22,82$ а.е. и $L = 4,56$ пк. Из III закона Кеплера получаем суммарную массу звёзд:

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2} = 1,2M_0.$$

Здесь M_0 — масса Солнца. Так как массы звёзд, как видно по лучевым скоростям, соотносятся как 1 : 5, получается, что яркая звезда имеет массу около $1M_0$, а слабая — $0,2M_0$. Зная расстояние до звёзд, мы можем рассчитать их абсолютные звёздные величины m_0 по формуле (см. предыдущую задачу):

$$m_0 = m + 5 - 5 \lg L.$$

Абсолютная звёздная величина получается равной $+4,7^m$ для яркой звезды и $+11,7^m$ для слабой. Выходит, что яркая звезда очень похожа на Солнце, а её спутник является красным карликом с впятеро меньшей массой и в 630 раз меньшей светимостью.

Ответ: $M_1 = M_0$; $M_2 = 0,2 M_0$; $L_1 = L_0$; $L_2 = 0,0016 L_0$.

Задача 3. Затменная переменная состоит из двух звёзд с одинаковым блеском 6^m и температурами поверхности 5000 К и 10 000 К. Чему равен блеск переменной в моменты главного и вторичного минимумов блеска и вне затмений? Считать, что поверхностная яркость звезды одинакова по всему её диску, а Земля находится точно в плоскости орбит звёзд.

Дано:

$$m = 6$$

$$T_1 = 5000 \text{ К}$$

$$T_2 = 10\,000 \text{ К}$$

$$m_0 - ?$$

$$m_1 - ?$$

$$m_2 - ?$$

Решение: Расстояния до обеих звёзд можно считать одинаковыми, значит, одинаковы и светимости звёзд. При этом одна из них вдвое горячее, т.е. излучает в 16 раз больше энергии с единицы площади. Следовательно, более горячая звезда в 4 раза меньше по размерам. Вне минимумов мы видим обе звезды 6-й величины, и их суммарный блеск будет равен

$$m_0 = 6 - 2,5 \lg 2 = 5,25.$$

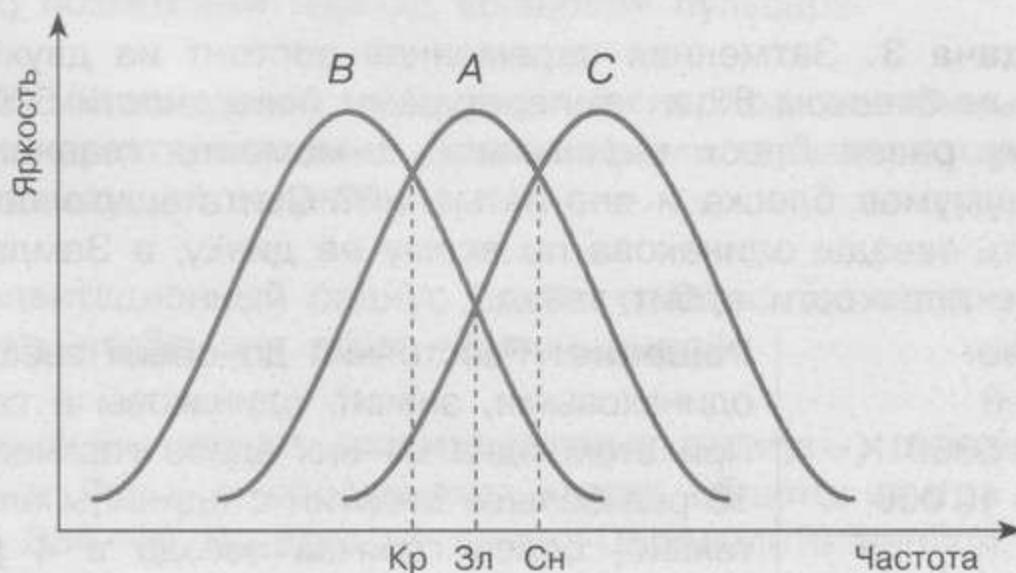
Так как Земля находится в плоскости орбит, то в определённый момент более холодная звезда, имеющая большие размеры, может полностью закрыть более горячую звезду. Видимый блеск переменной на нашем небе составит $m_1 = 6$, и это будет главный минимум. Во время вторичного минимума горячая звезда пройдёт перед холодной, но закроет лишь $1/16$ её диска. В это время мы будем регистрировать всё излучение одной звезды 6^m и $15/16$ излучения второй звезды того же блеска. Звёздная величина переменной составит

$$m_2 = 6 - 2,5 \lg \left(\frac{31}{16} \right) = 5,28.$$

Ответ: $5,25^m$; $6,0^m$; $5,28^m$.

Задача 4. Звёзды *A* и *B* светят одинаково через красный светофильтр, звёзды *B* и *C* — одинаково через зелёный, а *A* и *C* — одинаково через синий. При этом в зелёных лучах звезда *A* ярче звезды *B*. Расположите эти три звезды в порядке возрастания их температуры.

Решение: Как известно, чем горячее звезда, тем в более коротковолновой (синей) части спектра она излучает больше всего света. Звёзды *A* и *B* выглядят одинаково яркими в красных лучах, однако в более коротковолновой части спектра, в зелёных лучах, звезда *A* становится ярче, значит, звезда *A* горячее звезды *B* (см. рисунок, буквы у оси абсцисс соответствуют трём цветам). В зелёных лучах звезда *C* (как и звезда *B*) светит слабее звезды *A*, но в синих лучах их яркость сравнивается, т.е. звезда *C* горячее звезды *A*. Таким образом, эти три звезды нужно расставить следующим образом: *B*, *A*, *C*.



Ответ: *B*, *A*, *C*.

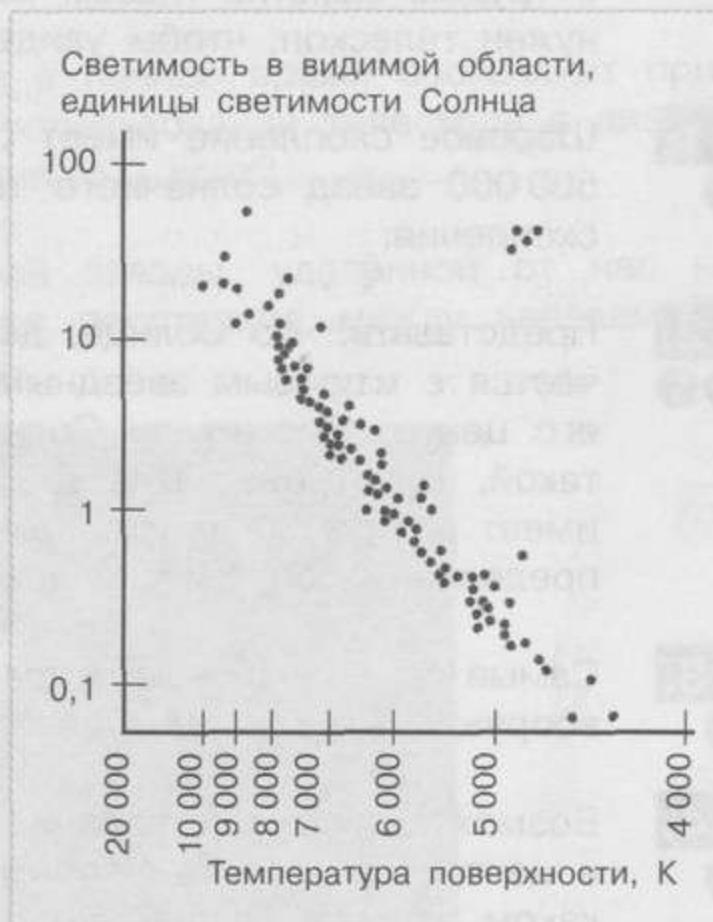
VI. Млечный Путь — наша Галактика

6.1. Почему звёзды образуются из холодного, а не горячего газа?

6.2. Сколько звёзд солнечного типа может образоваться из облака радиусом 100 пк, давлением 10^{-15} Па и температурой 50 К?

6.3. Перед вами — диаграмма Герцшпрунга—Рессела рассеянного звёздного скопления Гиады. Определите возраст скопления.

6.4. Звезда Альдебаран — красный гигант — имеет блеск около $0,9^m$ и находится на небе в одном направлении со звёздным скоплением Гиады (см. предыдущую задачу). Самые яркие звёзды Гиад имеют звёздную величину примерно 3,5. Кто находится ближе к нам — Альдебаран или Гиады?



6.5. Шаровое звёздное скопление M13 имеет угловой диаметр $23'$, удалено на расстояние 7600 пк и состоит из 200 000 звёзд. Оцените характерное расстояние между звёздами в скоплении.

6.6. Шаровое звёздное скопление M5 имеет угловой диаметр $23'$ и звёздную величину $5,6^m$. Расстояние до него составляет 24 500 световых лет, скопление состоит из 300 000 звёзд. Определите среднюю светимость звезды скопления по сравнению с Солнцем.

6.7. Как вы думаете, почему в Галактике не наблюдается молодых шаровых звёздных скоплений? Могут ли они быть видны где-то ещё?

6.8. Как вы думаете, почему в Галактике не наблюдается старых рассеянных звёздных скоплений? Могут ли они быть видны где-то ещё?

- 6.9.** Рассеянные звёздные скопления видны в диске Галактики, а шаровые — в основном в балдже и гало. Объясните причину этой разницы.
- 6.10.** Рассеянное звёздное скопление состоит из 100 одинаковых звёзд и с трудом заметно глазом как маленькое пятнышко на небе. Какой нужен телескоп, чтобы увидеть в нём отдельные звёзды?
- 6.11.** Шаровое скопление имеет радиус 100 световых лет и состоит из 500 000 звёзд солнечного типа. Оцените скорости звёзд на краю скопления.
- 6.12.** Представьте, что Солнце, двигаясь вокруг центра Галактики, встречается с шаровым звёздным скоплением и пролетает прямо через его центр. Сможет ли Солнце сохранить свою планетную систему такой, какой она была до сближения со скоплением? Скопление имеет радиус 30 пк и состоит из миллиона звёзд, равномерно распределённых внутри скопления.
- 6.13.** Самые яркие шаровые скопления в небе Земли с трудом видны невооружённым глазом. Оцените расстояния до этих скоплений.
- 6.14.** Возможно ли существование спутника сверхмассивной чёрной дыры в центре Галактики, который обращался бы вокруг неё за год? На каком угловом расстоянии от чёрной дыры спутник наблюдался бы с Земли?
- 6.15.** Плотность сверхмассивной чёрной дыры равна плотности воды на Земле. Определите массу чёрной дыры.
- 6.16.** Возраст Солнца оценивается в 4,5 млрд лет. Сколько оборотов вокруг центра Галактики оно сделало за это время?
- 6.17.** Линейные скорости звёзд вокруг центра Галактики вблизи Солнца почти не зависят от расстояния от центра и составляют около 220 км/с. Найдите синодический период (интервал между последовательными приближениями к Солнцу) для звезды, удалённой от центра Галактики на 9 кпк.
- 6.18.** Звёздное скопление Плеяды удалено от нас на 135 пк. Когда ярчайшая звезда скопления взорвётся как сверхновая, с каким объек-

том неба она будет сравнима по яркости? Считать, что расстояние до Плеяд к этому времени существенно не изменится.

6.19.

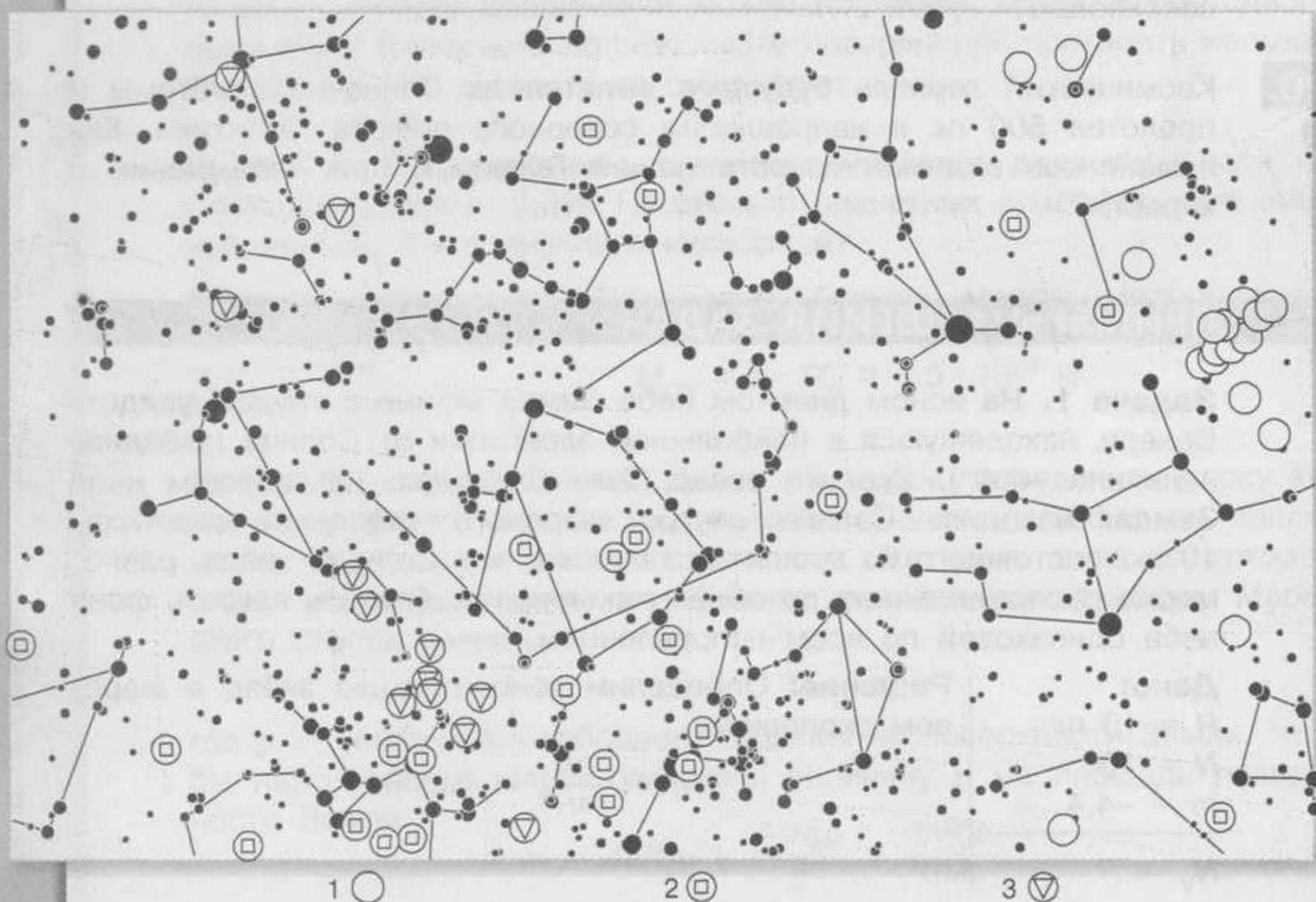
Вещество падает на сверхмассивную чёрную дыру в центре некоторой галактики с темпом 0,001 массы Солнца в год, излучая 10% энергии в пространство в виде света. Какой будет абсолютная звёздная величина окрестностей чёрной дыры?

6.20.

В шаровых звёздных скоплениях достаточно много переменных звёзд типа RR Лиры, характеризующихся примерно одинаковой светимостью (около 100 светимостей Солнца). Можно ли увидеть их в типичном шаровом скоплении нашей Галактики в 20-см телескоп?

6.21.

На карте звёздного неба различными символами показаны рассеянные и шаровые звёздные скопления, а также далёкие галактики. Какой тип объектов соответствует символам, располагающимся в зоне цифр 1, 2 и 3 под картой?



- 6.22.** Шаровое звёздное скопление видно в балдже Галактики в 45° от центра Галактики на небе. Оцените время облёта скопления вокруг центра Галактики.
- 6.23.** Шаровое скопление имеет угловой диаметр $30'$ и видимый блеск 6^m , расстояние и количество звёзд неизвестны. Оцените освещённость ночного неба на планете, обращающейся вокруг одной из звёзд скопления.
- 6.24.** Шаровое скопление радиусом 50 пк и массой 1 миллион масс Солнца пролетает вблизи сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики с массой 4 миллиона масс Солнца. При каком расстоянии между центром скопления и чёрной дырой скопление начнёт терять массу?
- 6.25.** Будем считать, что взрывом сверхновой звезды II типа заканчивается эволюция звёзд массой более 8 масс Солнца. Когда в шаровых скоплениях нашей Галактики в последний раз взорвались такие сверхновые?
- 6.26.** Космический корабль будущего вылетел из Солнечной системы и пролетел 500 пк в направлении северного полюса Галактики. Как изменилась видимая яркость нашей Галактики при наблюдении с корабля?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. На ясном дневном небе Земли можно с трудом увидеть Венеру, находящуюся в наибольшей элонгации от Солнца (звёздная величина $-4,4^m$). Сколько звёзд было бы видно на дневном небе Земли, находишь Солнце внутри шарового скопления радиусом 10 пк, состоящего из миллиона таких же, как Солнце, звёзд, равномерно распределённых по объёму скопления? Считать яркость фона неба одинаковой по всем направлениям.

Дано:

$$R = 10 \text{ пк}$$

$$N = 10^6$$

$$m = -4,4$$

$$N_V = ?$$

Решение: Определим концентрацию звёзд в шаровом скоплении:

$$n = \frac{3N}{4\pi R^3} = 240 \text{ пк}^{-3}.$$

Найдём далее расстояние, с которого звезда солнечного типа (абсолютная звёздная величина M равна $+4,7$) будет выглядеть как Венера в наибольшей элонгации (видимая звёздная величина m равна $-4,4$):

$$\lg r = 1 + \frac{m - M}{5} = -0,82.$$

Соответствующее расстояние составляет $0,15$ пк. Рассчитаем среднее количество звёзд внутри полусферы с таким радиусом:

$$N_V = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 n = \frac{N}{2} \cdot \frac{r^3}{R^3} \sim 2.$$

К этому числу можно добавить ещё единицу, соответствующую самому Солнцу, видимому на дневном небе Земли. В любом случае на небе планеты, находящейся в шаровом скоплении, днём было бы видно лишь несколько звёзд.

Ответ: $N_V \sim 2$.

Задача 2. Параллакс звёзд из скопления Плеяды составляет около $0,009''$, собственное движение по небу относительно более далёких звёзд — $0,05''/\text{год}$, а лучевая скорость (скорость удаления от Солнца) — около $+10$ км/с. Когда расстояние Плеяд от Солнца было минимальным и чему оно было равно? Каков был блеск ярчайшей звезды скопления Альционы, если сейчас он составляет $2,85^m$?

Дано:

$$\pi'' = 0,009''$$

$$\alpha'' = 0,05''/\text{год}$$

$$v_L = +10 \text{ км/с}$$

$$m_0 = 2,85$$

$$\Delta t = ?$$

$$m = ?$$

Решение: Расстояние до Плеяд равно

$$r = \frac{1}{\pi''} = 111 \text{ пк.}$$

Здесь π'' — параллакс, выраженный в угловых секундах. Данные о собственном движении α позволяют нам рассчитать тангенциальную скорость Плеяд относительно Солнца v_T (см. рисунок). Она равна

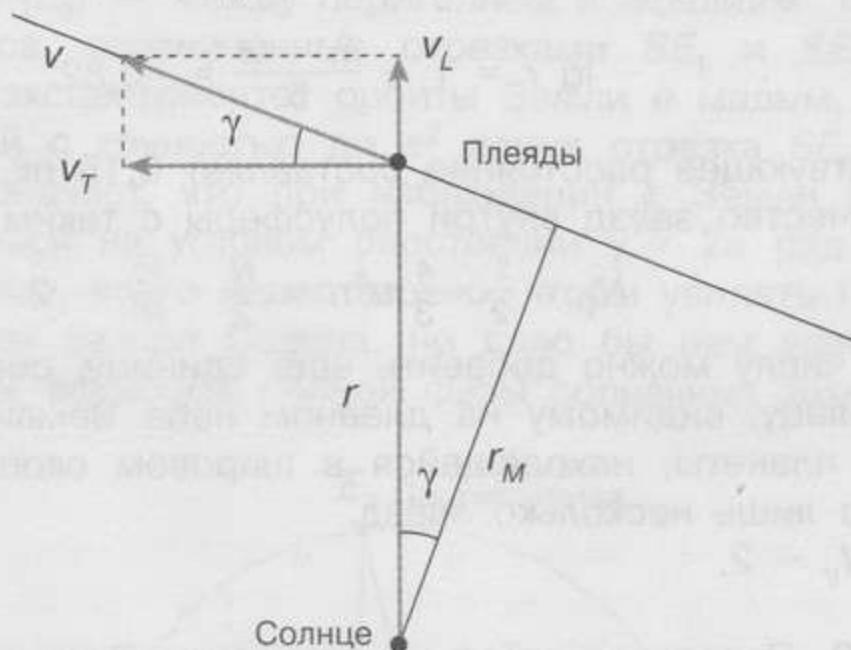
$$d' \cdot r = \frac{d'}{\pi''} = 5,56 \text{ а.е./год} = 26,3 \text{ км/с.}$$

Лучевая скорость Земли равна $+10$ км/с, знак «+» указывает, что Плеяды в настоящее время удаляются от Солнца. Теперь мы можем вычислить угол γ проекции вектора скорости Плеяд на небесную сферу, он равен

$$\gamma = \arctg \left(\frac{10}{26,3} \right) = 20,8^\circ.$$

Минимальное расстояние между Солнцем и Плеядами, как видно из рисунка, равно

$$r_M = r \cos \gamma = 104 \text{ пк.}$$



Время, прошедшее с момента максимального сближения с этим скоплением, равно отношению пути, пройденного Плеядами с тех пор, к полной скорости Плеяд:

$$\Delta t = \frac{r \sin \gamma}{v} = \frac{r \sin \gamma \cos \gamma}{v_T},$$

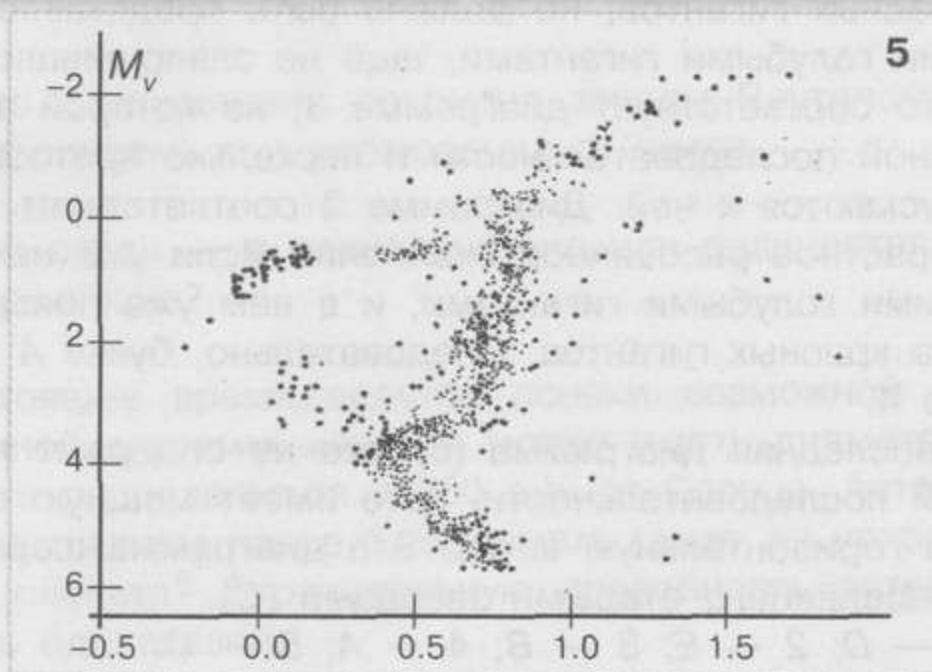
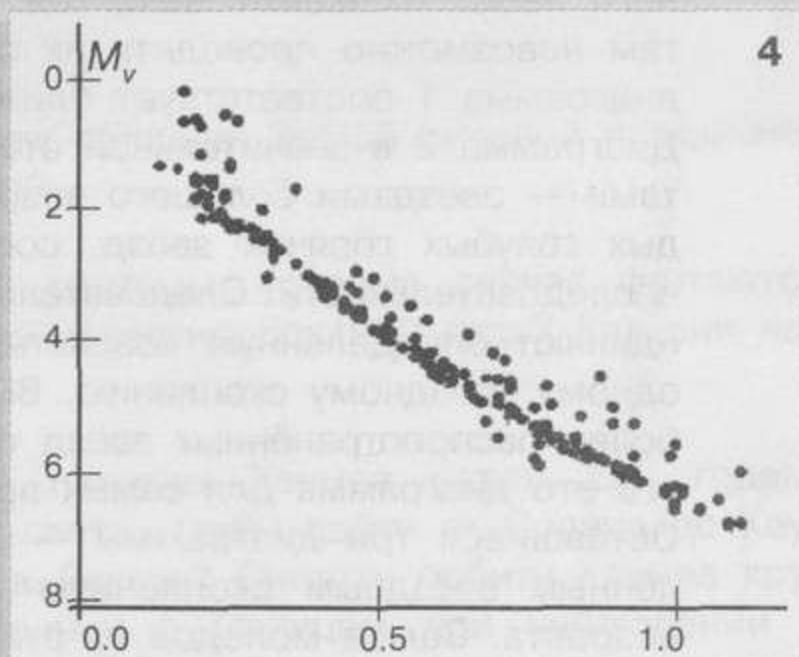
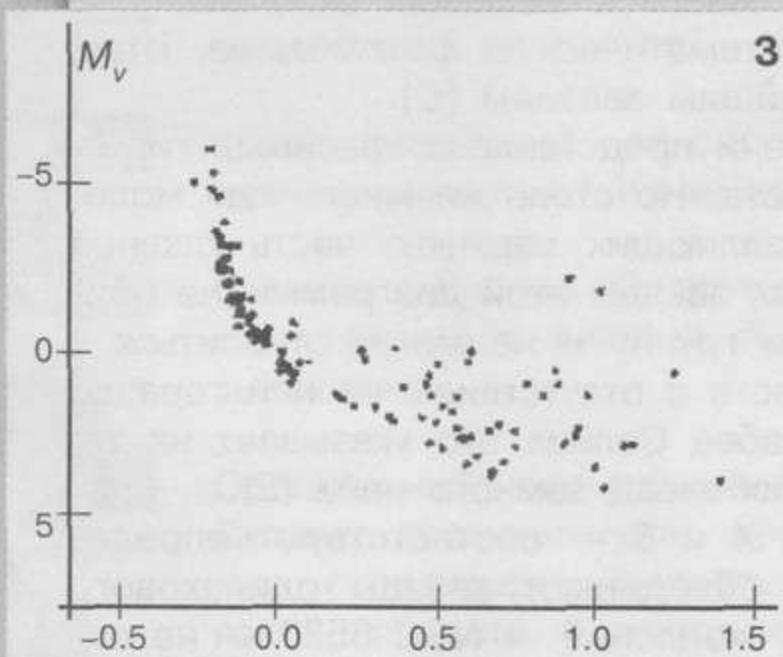
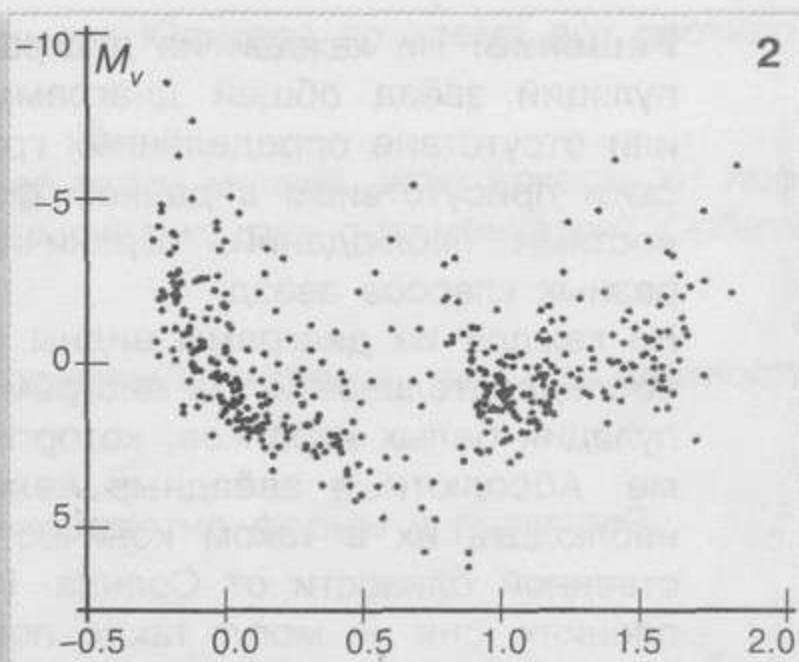
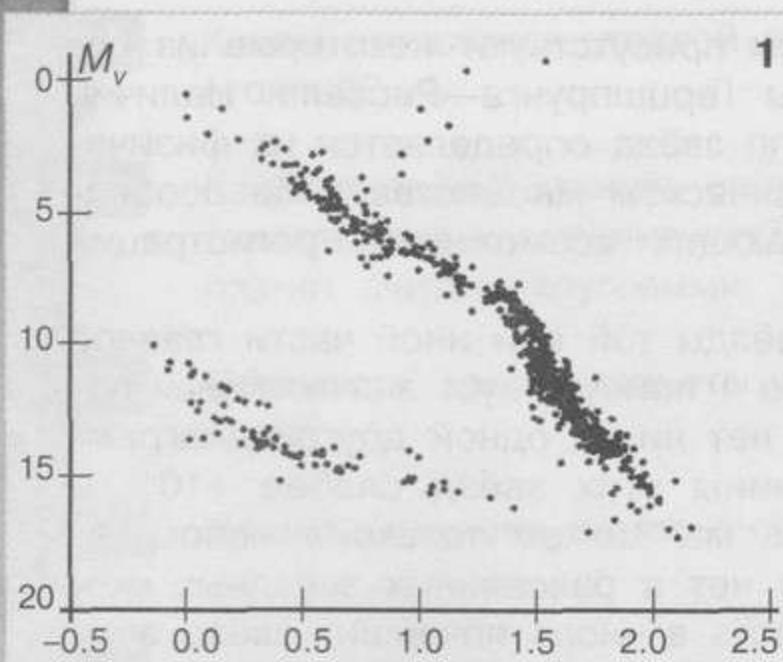
что составляет $1,37 \cdot 10^6$ лет. Наконец, блеск Альционы в то время (если предположить, что её светимость с тех пор не изменилась) равен

$$m = m_0 + 5 \lg \left(\frac{r_M}{r} \right) = m_0 + 5 \lg \cos \gamma = 2,70.$$

Здесь m_0 — современный блеск Альционы.

Ответ: 1,37 млн лет назад; +2,70^m.

Задача 3. Перед вами диаграммы «цвет — абсолютная звёздная величина» для звёзд рассеянного скопления Ясли (возраст 730 млн лет, *A*), очень молодого рассеянного скопления NGC 6530 в туманности М8 (*B*), шарового скопления М3 (*C*), близких звёзд (расстояние от Солнца менее 25 пк, *D*) и ярчайших звёзд неба Земли (видимая звёздная величина до 4^m, *E*). По оси абсцисс отложена цветовая характеристика звезды, равная для Солнца +0,67^m и возрастающая для красных холодных звёзд, по оси ординат — визуальная абсолютная звёздная величина (видимая звёздная величина с расстояния 10 пк). Расставьте буквы *A*, *B*, *C*, *D*, *E* в соответствии с номерами 1, 2, 3, 4 и 5 на диаграммах.



Решение: На каждой из диаграмм присутствуют некоторые из популяций звёзд общей диаграммы Герцшпрунга—Рессела. Наличие или отсутствие определённых групп звёзд определяется их физическим присутствием в данном физическом множестве либо особенностями наблюдений, ограничивающих возможность регистрации разных классов звёзд.

На каждой из диаграмм видны звёзды той или иной части главной последовательности. На диаграмме 1 присутствует значительная популяция белых карликов, которой нет ни на одной другой диаграмме. Абсолютные звёздные величины этих звёзд слабее $+10^m$, и наблюдать их в таком количестве мы можем только в непосредственной близости от Солнца. Их нет в рассеянных звёздных скоплениях, они не могут также попасть в число ярчайших звёзд земного неба. Их может быть очень много в шаровом скоплении, но там невозможно проводить их систематическую фотометрию. Итак, диаграмма 1 соответствует ближайшим звездам (*D*).

Диаграмма 2 в значительной степени представлена красными гигантами — звёздами большого возраста. Но столь же много там молодых голубых горячих звёзд, составляющих верхнюю часть главной последовательности. Следовательно, звёзды этой диаграммы не объединяют определённую возрастную группу и не могут относиться к одному звёздному скоплению. Вместе с отсутствием на ней гораздо более распространённых звёзд слабее Солнца это указывает на то, что это диаграмма для самых ярких звёзд земного неба (*E*).

Оставшиеся три диаграммы — 3, 4 и 5 — соответствуют определённым звёздным скоплениям и объединяют звёзды одинакового возраста. Самое молодое из этих скоплений — NGC 6530 — не содержит красных гигантов, но должно быть представлено, в частности, яркими голубыми гигантами, ещё не завершившими свою эволюцию. Это соответствует диаграмме 3, на которой видна верхняя часть главной последовательности и несколько протозвёзд, которые только опускаются к ней. Диаграмма 3 соответствует ответу *B*.

Более возрастное рассеянное скопление Ясли уже не обладает самыми яркими голубыми гигантами, и в нём уже появилась небольшая группа красных гигантов. Следовательно, буква *A* соответствует диаграмме 4.

Наконец, последняя диаграмма (5) уже не содержит яркой половины главной последовательности, зато имеет мощную ветвь красных гигантов и горизонтальную ветвь. Это диаграмма шарового скопления М3, населённого старыми звёздами (*C*).

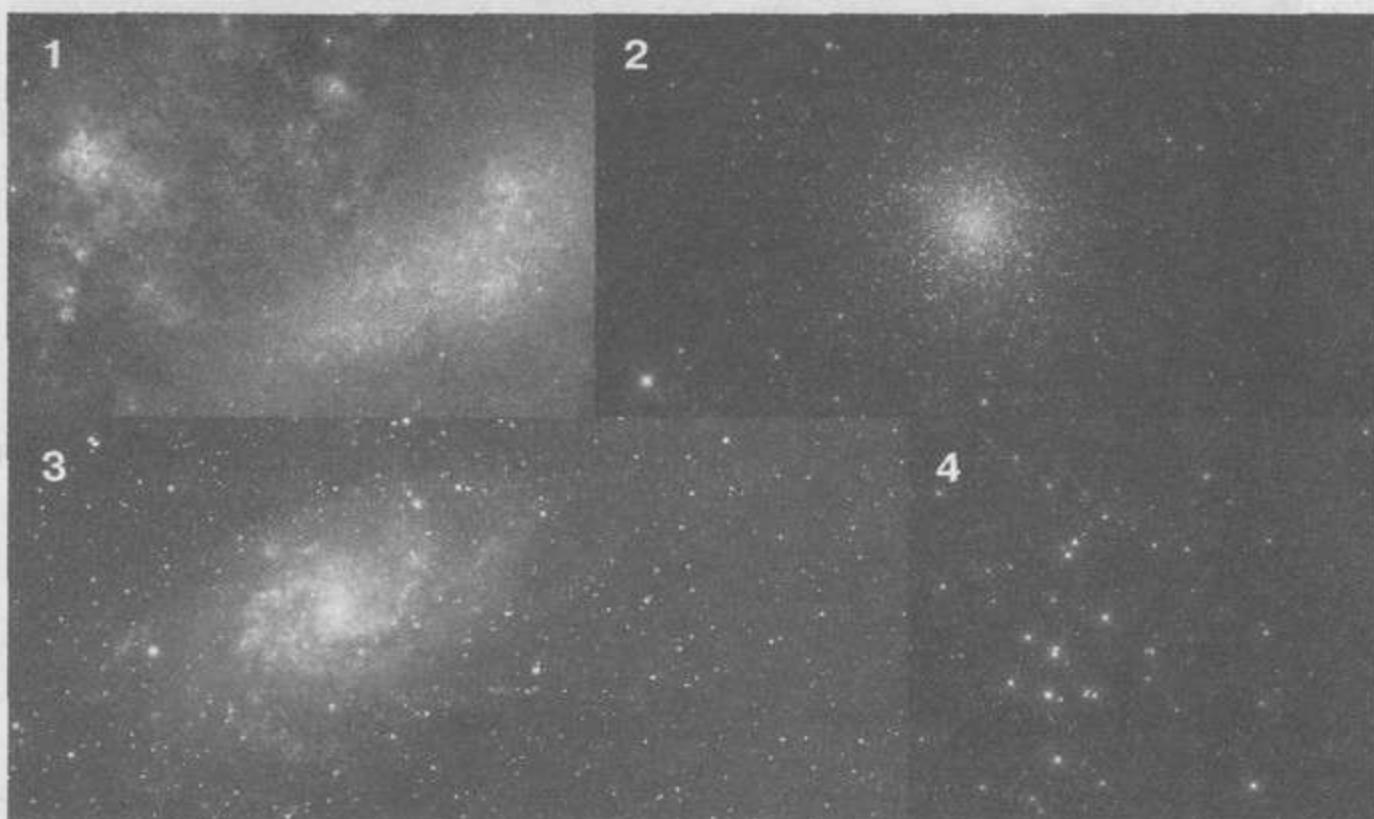
Ответ: 1 — *D*; 2 — *E*; 3 — *B*; 4 — *A*; 5 — *C*.

VII. ГАЛАКТИКИ

7.1. Назовите самый далёкий объект, видимый на небе невооружённым глазом, и расстояние до него.

7.2. В каком из вышеперечисленных созвездий видно больше всего галактик? меньше всего галактик? Стрелец, Рыбы, Дева, Весы.

7.3. Расположите четыре объекта на фотографиях в порядке возрастания расстояния от Земли.

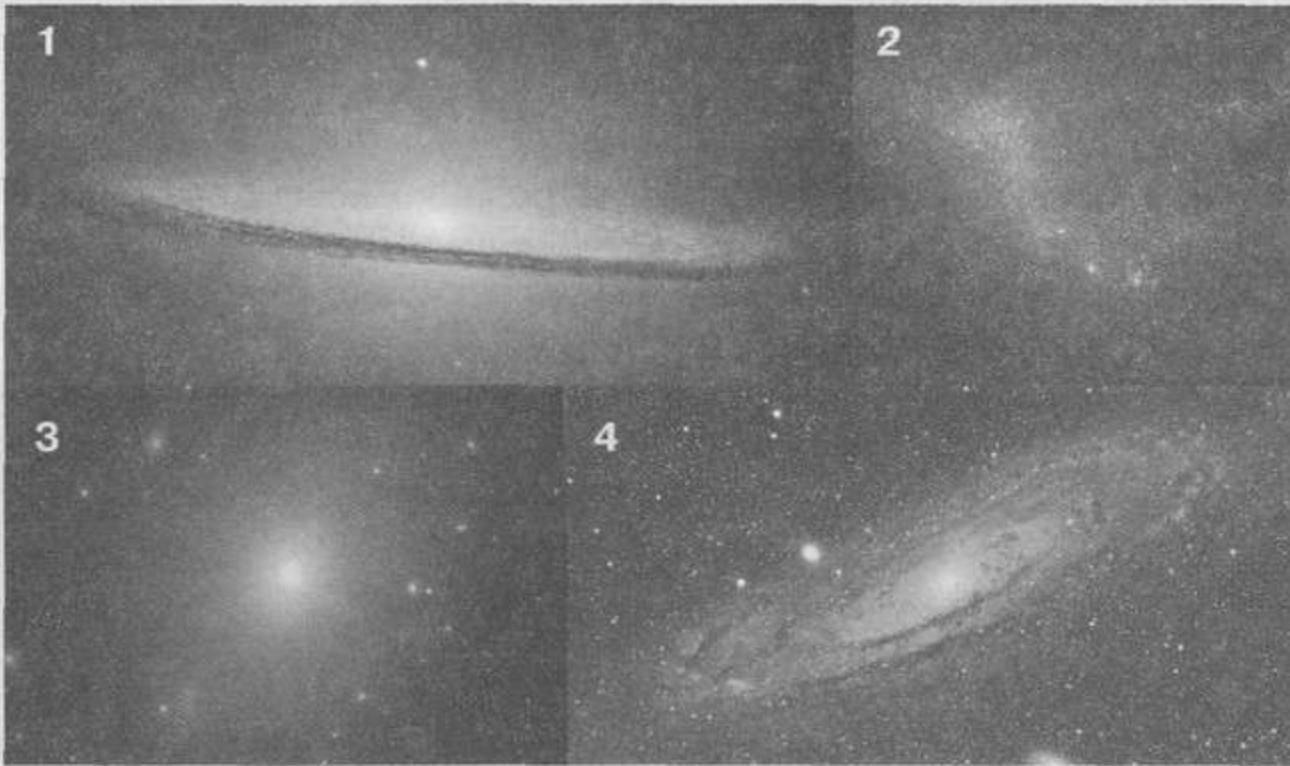


7.4. Расстояние до галактики Андромеды (M31) — 770 кпк, до галактики Треугольника (M33) — 900 кпк. Предположим, в этих двух галактиках и Галактике Млечный Путь одновременно вспыхнули одинаковые сверхновые звёзды. В какой из трёх галактик раньше удастся зарегистрировать все три вспышки? Межзвёздное поглощение не учитывать.

7.5. Одна солнцеподобная звезда находится в противоположной части нашей Галактики, другая — в туманности Андромеды. Какая из них ярче в оптическом диапазоне спектра в небе Земли?

7.6. Большое Магелланово облако удалено на 50 кпк. Оцените время его оборота вокруг нашей Галактики.

- 7.7.** Перед вами фотографии нескольких галактик. Укажите, какая из галактик является спиральной, какая — эллиптической, какая — неправильной.



- 7.8.** Туманность Андромеды летит навстречу нашей Галактике с относительной скоростью 150 км/с. Когда произойдёт столкновение двух галактик?

- 7.9.** С какого расстояния нашу Галактику можно рассмотреть в телескоп с диаметром объектива 10 см?

- 7.10.** Линия атомарного водорода $H\beta$ (4861 \AA) в спектре далёкой галактики совместилась с линией $H\alpha$ лабораторного источника (6563 \AA). Определите красное смещение галактики и скорость её удаления.

- 7.11.** Некоторая галактика удалена от нас на 100 Мпк. Какую длину волны будут иметь в её спектре линии ионизованного кальция (лабораторные длины волн 3934 и 3968 \AA)?

- 7.12.** Галактика имеет красное смещение $z = 0,01$ и диаметр 100 тысяч световых лет. Каков её угловой диаметр на небе?

- 7.13.** Какую скорость нужно сообщить звезде на краю галактики M87, чтобы она могла улететь из неё? Масса галактики — $3 \cdot 10^{12}$ масс Солнца, видимый диаметр — $7'$, расстояние — 55 миллионов световых лет.

- 7.14.** Исходя из «плоской» кривой вращения нашей Галактики (независимости линейной скорости от расстояния от центра), определите примерную зависимость плотности тёмной материи в Галактике от расстояния от центра.
- 7.15.** Первый обнаруженный квазар, 3C 48, имеет блеск $16,2^m$ и красное смещение 0,367. Какова его светимость?
- 7.16.** Предполагая, что свечение квазара вызвано падением вещества на чёрную дыру, определите его темп (в массах Солнца в год). КПД энерговыделения считать равным 10%.
- 7.17.** Скопление галактик в созвездии Волосы Вероники имеет среднее красное смещение 0,0231, угловой диаметр 12° и состоит примерно из 1000 галактик. Определите характерное расстояние между галактиками.
- 7.18.** Если бы концентрация галактик была такой же, как в созвездии Волосы Вероники, то при каком минимальном красном смещении луч, пущенный в произвольном направлении, обязательно встретил бы галактику? Размеры галактик считать равными размеру нашей Галактики Млечный Путь.
- 7.19.** Сверхновая с абсолютной звёздной величиной -18 вспыхнула в галактике с красным смещением 0,2. Каков будет блеск этой сверхновой в небе Земли?
- 7.20.** Современным телескопам доступны звёзды до 28^m . На каких максимальных красных смещениях можно наблюдать самые яркие сверхновые с абсолютной величиной -20^m ?
- 7.21.** Космический телескоп им. Хаббла зарегистрировал двойной квазар. Его красное смещение равно 0,848, угловое расстояние между компонентами — $0,3''$. Считая массу квазара равной 10^7 масс Солнца, определите период обращения в этой системе.
- 7.22.** Активное ядро галактики на красном смещении 0,5 наблюдается радиоинтерферометром с участием наземного телескопа и орбитального телескопа «Радиоастрон» на расстоянии 100 000 км от Земли. Длина волны равна 18 см. Какое пространственное разрешение можно получить?

- 7.23.** У квазара обнаружена переменность с периодом 1 день. Оцените его максимальный размер.
- 7.24.** Закон Хаббла начинает выполняться для галактик на расстоянии в 2 Мпк. Насколько эти галактики были ярче при рождении Солнца, если их светимость считать постоянной?
- 7.25.** Предположим, какую-то галактику полностью «заволокло» пылью, и мы не видим света её звёзд. Сможем ли мы узнать о её существовании?
- 7.26.** Две галактики на красных смещениях 0,1 и 1 выглядят одинаково по цвету. Что можно сказать о темпе звездообразования в них — в какой он больше?
- 7.27.** Во сколько раз давление межгалактического газа (температура 10^9 К, концентрация частиц 10^3 см $^{-3}$) меньше атмосферного давления у поверхности Земли?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Скопление галактик состоит из 10 000 одинаковых галактик с блеском 18^m каждая. Всё скопление на земном небе имеет угловой диаметр 5° . Спектральные измерения показали, что красное смещение скопления составляет 0,1, а разность лучевых скоростей отдельных галактик и лучевой скорости скопления достигает ± 500 км/с. Считая, что все галактики состоят из звёзд, похожих на Солнце, определите вклад тёмной материи в массу скопления.

Дано:

$$N = 10\,000$$

$$\delta = 5^\circ$$

$$m = 18$$

$$z = 0,1$$

$$v = 500 \text{ км/с}$$

$$\eta = ?$$

Решение: Определим расстояние до скопления галактик по закону Хаббла:

$$d = \frac{cz}{H} = 440 \text{ Мпк.}$$

Угловой радиус скопления галактик равен $\frac{\delta}{2} = 2,5^\circ$, следовательно, пространственный радиус составляет

$$R = d \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \sim 20 \text{ Мпк} = 6 \cdot 10^{23} \text{ м.}$$

Максимальная разность лучевых скоростей отдельных галактик и всего скопления примерно равна круговой (первой космической)

скорости на краю скопления v . Из этого можно получить полную массу скопления галактик:

$$M = \frac{v^2 R}{G} \approx 2 \cdot 10^{45} \text{ кг} = 10^{15} M_0.$$

Здесь M_0 — масса Солнца. Определим теперь суммарную массу всех звёзд скопления. Абсолютная звёздная величина каждой из галактик равна

$$m_0 = m + 5 - 5 \lg d = -20,3.$$

Если считать, что каждая звезда похожа на Солнце с абсолютной звёздной величиной $m_s = +4,7^m$, то можно определить число звёзд в каждой галактике:

$$N_G = 10^{0,4(m_s - m_0)} = 10^{10}.$$

Суммарная масса звёзд скопления будет равна

$$M_S = M_0 \cdot N \cdot N_G = 2 \cdot 10^{44} M_0.$$

Мы видим, что звёзды составляют лишь около 10% массы всего скопления галактик, остальные 90% приходятся на тёмную материю.

Ответ: $\eta = 0,9$.

Задача 2. Определите галактический параллакс квазара с красным смещением $z = 0,5$.

Дано:
 $z = 0,5$

π_G — ?

Решение: По определению, суточный параллакс светила есть угол, под которым с него виден радиус Земли. На этот же угол положение светила на небе отклоняется, если проводить наблюдения «с края» Земли по отношению к объекту. Годичный параллакс, определяемый для звёзд, — угол, под которым с них виден радиус земной орбиты.

Аналогичным образом мы можем ввести галактический параллакс для внегалактических объектов — это угол, под которым с них виден радиус пути Солнца вокруг центра Галактики, равный 8 кпк.

Расстояние до квазара можно вычислить по закону Хаббла:

$$d = \frac{cz}{H} = 2,2 \cdot 10^9 \text{ пк}.$$

Галактический параллакс равен

$$\pi_G = \arcsin \frac{r}{d} = \frac{r}{d} \text{ рад} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ рад} = 0,75''.$$

Ответ: $0,75''$.

VIII. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

8.1. Какой была критическая плотность, когда Вселенная была вдвое меньше?

8.2. Какой была критическая плотность, когда Вселенная была вдвое моложе? При решении воспользуйтесь примером 1 решения задач данной части.

8.3. Определите аналог величины критической плотности для газовой туманности с радиусом 1 световой год, расширяющейся со скоростью 20 км/с. Сравните эту величину с реальной плотностью газовых туманностей.

8.4. Сравните плотность нашей Галактики с критической плотностью. Толщина диска Галактики — 300 пк.

8.5. Найдите концентрацию атомов водорода во Вселенной с критической плотностью в предположении, что Вселенная состоит только из них.

8.6. Найдите радиус чёрной дыры с плотностью, равной критической.

8.7. Через какое время массы водорода и гелия в Галактике сравняются? Считать светимость Галактики постоянной во времени.

8.8. Какой самый дальний объект во Вселенной, непосредственно наблюдаемый на Земле? Точнее говоря, где появились фотоны, которые были зарегистрированы земной аппаратурой, преодолев перед этим максимальное расстояние?

8.9. Считая, что масштабный фактор Вселенной меняется со временем как $t^{\frac{2}{3}}$, определите, когда спектр реликтового излучения был похож на спектр Солнца.

8.10. В результате движения Солнца относительно фона реликтового излучения в направлении созвездия Льва температура реликтового излучения в этой области неба на 0,0032 К выше средней. Определите величину скорости Солнца относительно реликтового излучения.

- 8.11.** Определите концентрацию (в м^{-3}) реликтовых фотонов во Вселенной, если средняя энергия одного фотона равна 10^{-22} Дж.
- 8.12.** Представьте, как бы развивалась Вселенная, если бы водород в первые минуты её существования целиком превратился в гелий.
- 8.13.** Назовите три фактора, ограничивающие яркость ночного неба.
- 8.14.** Возможно ли существование галактик с $z < 0$?
- 8.15.** Первое измерение постоянной Хаббла, сделанное самим Эдвином Хабблом, дало результат $500 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$. Каким тогда был бы возраст Вселенной? Противоречило ли это каким-то данным, имеющимся на 20—30-е годы XX века?
- 8.16.** Определите, является ли устойчивой Местная группа галактик при постоянной Хаббла, равной $68 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$? $700 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$? Расстояние до туманности Андромеды равно 2 миллиона световых лет.
- 8.17.** Примерно через 5 млрд лет наша Галактика столкнется с туманностью Андромеды. К каким последствиям это приведёт для галактик? для звёзд? для планет?
- 8.18.** Две галактики с $z = 1$ располагаются на небе в 30 градусах друг от друга. Какую величину z будет сейчас иметь одна галактика при наблюдении с другой галактики?
- 8.19.** Далёкая галактика похожа по своим свойствам на нашу Галактику, её красное смещение равно 0,25. В $1'$ от неё виден спутник — карликовая галактика. Оцените период его обращения вокруг большой галактики.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Предположим, плотность Вселенной всегда была равна критической плотности, соответствующей её текущим размерам и скорости расширения, а само расширение происходило в соответствии с законами Ньютона. Определите, как тогда менялся характерный размер Вселенной R в зависимости от времени t . Ответ найдите в виде $R \sim C \cdot t^N$, где C — постоянная величина, а N — некоторое число.

Дано:

$$\rho = \rho_{\text{кр}}$$

$$N = ?$$

Решение: Рассмотрим некоторый момент времени t и последующий короткий интервал $\Delta t \ll t$. Определим скорость расширения Вселенной:

$$v = \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} = C \frac{(t + \Delta t)^N - t^N}{\Delta t}.$$

С учётом того что интервал времени Δt маленький, справедливо соотношение

$$(t + \Delta t)^N = t^N + Nt^{N-1}\Delta t.$$

Тогда скорость расширения Вселенной будет равна

$$v = CN \cdot t^{N-1}.$$

Мы знаем, что в случае расширения в соответствии с законом Ньютона при критической плотности скорость равна второй космической:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2GM}{Ct^N}} \sim t^{-\frac{N}{2}}.$$

Таким образом,

$$N - 1 = -\frac{N}{2}; \quad N = \frac{2}{3}.$$

Ответ: Расширение Вселенной происходило бы по закону

$$R = C \cdot t^{\frac{2}{3}}.$$

Задача 2. На сколько градусов в год реликтовое излучение могло бы нагреть шарообразный запаянный аквариум с водой радиусом 20 см, находящийся в космосе? Теплоёмкость воды равна 4200 Дж/К. Считать, что аквариум и вода задерживают всё попадающее на него излучение и не переизлучают его в космос. Свойства воды в аквариуме такие же, как на поверхности Земли.

Дано:

$R = 20 \text{ см}$

$C = 4200 \text{ Дж/К}$

$T_{\gamma} = ?$

Решение: Для того чтобы решить задачу, сравним действие реликтового излучения с действием Солнца на расстоянии 1 а.е. Плотность потока энергии от Солнца F_0 нам известна, она равна 1360 Вт/м^2 . Солнце имеет температуру $T_0 = 6000 \text{ К}$, но занимает очень небольшую часть небесной сферы с телесным углом:

$$S_0 = \pi\gamma^2 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ стер.}$$

Здесь γ — видимый радиус Солнца в радианах ($0,0047 \text{ рад}$). Реликтовое излучение имеет температуру $T = 2,7 \text{ К}$, но приходит со всей небесной сферы (телесный угол $S = 4\pi$ стерадиан). Аквариум находится в космосе, задерживает реликтовое излучение со всех направлений площадью πR^2 . Определим количество энергии реликтового излучения, которое будет задерживаться аквариумом за одну секунду:

$$E = F_0 \cdot \pi R^2 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 \cdot \frac{4\pi}{\pi\gamma^2} = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ Вт.}$$

Масса воды, содержащаяся в аквариуме, равна

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho = 33,5 \text{ кг.}$$

Здесь ρ — плотность воды. Изменение температуры воды за время t (1 год или $3,16 \cdot 10^7$ секунд) составит

$$T_{\gamma} = \frac{E \cdot t}{C \cdot M} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ К.}$$

Ответ: $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ К.}$

IX. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОНОМИИ

9.1. При каком возрасте Вселенной началось её ускоренное расширение? Как соотносились тогда плотности материи (видимой и тёмной) и тёмной энергии?

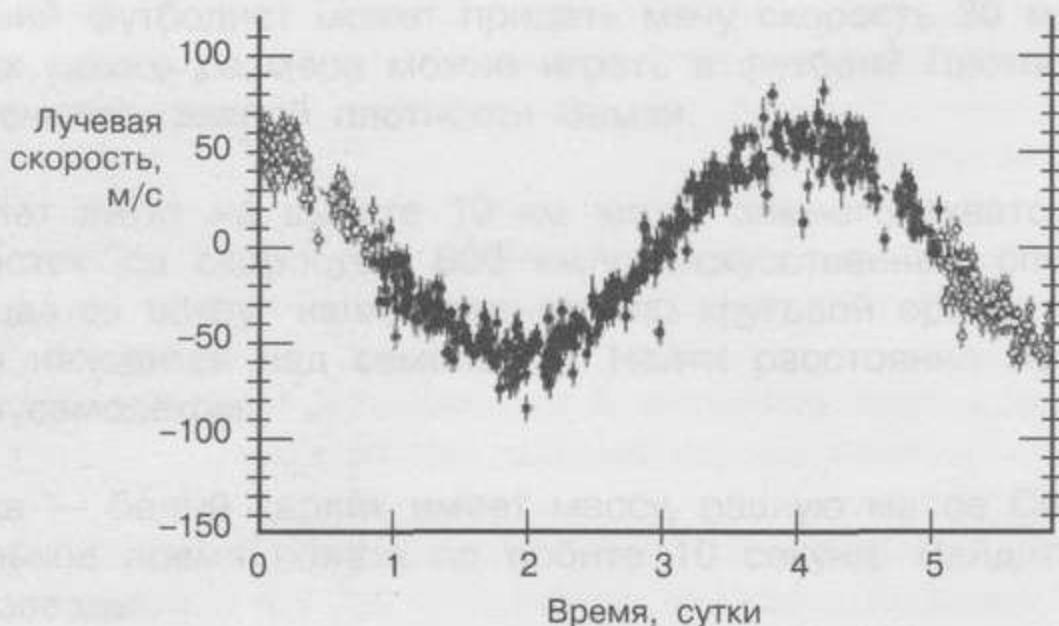
9.2. Ощутимо ли действие тёмной энергии на масштабе Местной группы галактик?

9.3. Предположим, во Вселенной есть только две одинаковые галактики с массой 10^{12} масс Солнца, изначально не двигающиеся друг относительно друга. При каком расстоянии их взаимное ускорение обратится в ноль? Плотность тёмной энергии составляет 0,70 от современной критической плотности Вселенной.

9.4. Какая точность фотометрии (в звёздных величинах) нужна далёкой цивилизации, чтобы зафиксировать прохождение Юпитера по диску Солнца? прохождение Земли по диску Солнца? Считать, что планеты проходят перед центром солнечного диска.

9.5. Какая точность спектральных измерений вблизи длины волны 5000 \AA нужна далёкой цивилизации, чтобы обнаружить действие Юпитера на Солнце? действие Земли на Солнце?

9.6. Более 20 лет назад, в 1995 году, была открыта первая экзопланета, обращающаяся вокруг звезды 51 Пегаса. Масса звезды равна массе Солнца. На графике приведена зависимость гелиоцентрической лучевой скорости этой звезды от времени. Оцените по этому гра-



фику массу экзопланеты, считая, что луч зрения лежит в плоскости её орбиты.

9.7. Звезда Проксима Центавра имеет массу 0,123 массы Солнца. На каком максимальном расстоянии от неё должна быть планета, похожая на Юпитер, чтобы заметить её с помощью спектрографа с разрешением $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 10^6$ ($\Delta\lambda$ — минимальная фиксируемая разница длин волн в спектральном диапазоне, соответствующем длине волны λ)?

9.8. Считая, что светимость L и масса M жёлтых и красных карликов связаны как $L \sim M^4$, определите, у каких звёзд можно найти планеты с массой и температурными условиями, аналогичными таким же характеристикам Земли, со спектрографом с разрешением 10^6 .

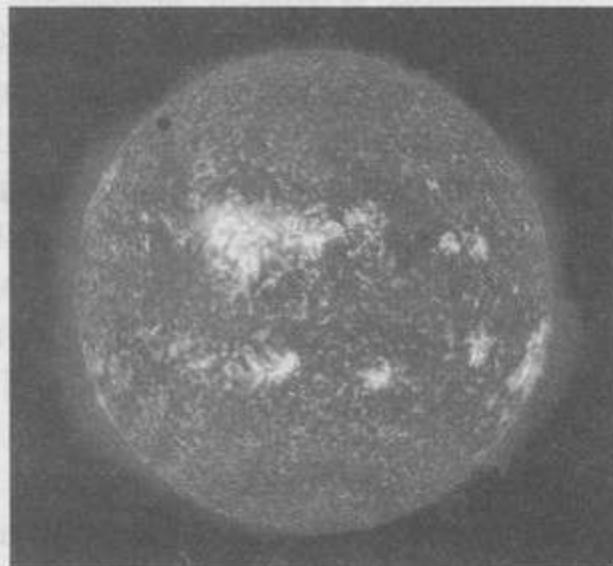
9.9. Почему первые планеты земного типа были открыты у пульсаров?

9.10. Какая точность спектральных измерений нужна, чтобы открыть у планеты типа Земли атмосферу с озоновым слоем? Высоту верхней границы слоя считать равной 40 км.

9.11. Если плотность солнцеподобных звёзд в диске Галактики равна $0,01 \text{ пк}^{-3}$, а обитаемая планета есть у каждой десятой, то на каком примерно расстоянии находится ближайшая? Каков блеск у её центральной звезды?

9.12. Прохождение планеты по диску звезды солнечного типа длится 6 часов, падение блеска составляет $0,001^m$. Найдите диаметр планеты и расстояние от звезды до планеты.

9.13. Какого диаметра должно быть пятно в центре видимого диска Солнца с температурой 4200 К, чтобы оно давало такой же эффект по изменению звёздной величины, как Венера при прохождении по диску Солнца (чёрное пятно в левой верхней части звезды)? Наблюдения ведутся с Земли.



- 9.14.** Можно ли наблюдать изменение лучевой скорости звезды из-за действия планеты, если она обращается в плоскости на луче зрения? под углом 45° к лучу зрения? перпендикулярно лучу зрения?
- 9.15.** Можно ли наблюдать прохождение планеты по диску звезды, если она обращается в плоскости на луче зрения? под углом 45° к лучу зрения? перпендикулярно лучу зрения?
- 9.16.** Почему планеты чаще открывают у холодных карликовых звезд?
- 9.17.** Земляне отправили сигнал к звезде τ Кита, имеющей блеск $3,6^m$ и светимость, вдвое меньшую, чем у Солнца. Когда можно ждать ответный сигнал?
- 9.18.** Земляне отправили сигнал к шаровому скоплению M13, имеющему возраст 13 млрд лет. У каких звезд и на каких расстояниях от них там возможно существование планет с такими же температурными условиями, что и на Земле?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Двойная звезда находится в 10 пк от Солнца. Блеск каждой из компонент составляет 5^m . Температуры звезд равны 4000 и 6000 К. Вокруг этой пары обращается планета, похожая по своим свойствам на Юпитер. Луч зрения образует некоторый угол с плоскостью орбиты планеты. Прохождение планеты по диску какой из звезд будет с большей вероятностью замечено, если точность измерений блеска звезд составляет $0,005^m$? $0,001^m$? Потемнением дисков звезд к краям пренебречь.

Решение: Расстояние до двойной звезды составляет 10 пк, и видимая звездная величина каждой из звезд совпадает с её абсолютной звездной величиной. Для каждой из звезд абсолютная величина на $0,28^m$ больше, чем у Солнца. Следовательно, светимость каждой из звезд J составляет

$$J = J_0 \cdot 10^{-0,4 \cdot 0,28} = 0,77 \cdot J_0.$$

Здесь J_0 — светимость Солнца. Исходя из закона Стефана—Больцмана, можно определить радиус каждой из звезд по формуле

$$\frac{R_i}{R_0} = \sqrt{\frac{J}{J_0}} \left(\frac{T_0}{T_i} \right)^2.$$

Здесь R_0 и T_0 — радиус и температура поверхности Солнца. Первая из звёзд в полтора раза холоднее Солнца, и её радиус превосходит солнечный в два раза. Радиус второй звезды составляет 0,9 от радиуса Солнца.

По условию задачи планета, движущаяся вокруг двойной звезды, похожа по своим свойствам на Юпитер. Радиус Юпитера в 10 раз меньше радиуса Солнца. Таким образом, планета уступает по радиусу первой, холодной звезде в 20 раз, а второй, более горячей — в 9 раз. Прохождение этой планеты по диску первой звезды вызовет уменьшение её блеска на $1/400$ часть или на $0,003^m$. Прохождение планеты по диску горячей звезды вызовет уменьшение блеска на $1/81$ часть, т.е. на $0,013^m$.

Мы видим, что при точности фотометрии $0,005^m$ мы сможем регистрировать только прохождения планеты по диску горячей звезды с температурой 6000 К. Если же точность фотометрии улучшить до $0,001^m$, то можно будет наблюдать прохождения планеты по диску обеих звёзд. С большей вероятностью будут замечены те прохождения, которые происходят чаще. Так как плоскость орбиты планеты образует некоторый угол с лучом зрения, прохождения планеты по диску звезды могут не наступать. Выше будет вероятность прохождения планеты по диску более холодной звезды, так как эта звезда имеет больший размер. Поэтому при точности фотометрии в $0,001^m$, вероятнее, сначала будет замечено прохождение планеты по диску звезды с температурой поверхности 4000 К.

Задача 2. Пульсар PSR B1257+12 стал первым, у которого была найдена планета. Период этого пульсара составляет 6,22 мс, его масса равна 1,5 массам Солнца. Планета была обнаружена на основе того, что импульсы регистрировались не в то время, в которое они должны были поступать. На графике приведена зависимость величины смещения моментов регистрации импульсов пульсара (по сравнению с моделью без этой планеты) от времени. Оцените массу планеты, считая, что луч зрения лежит в плоскости её орбиты.

Дано:

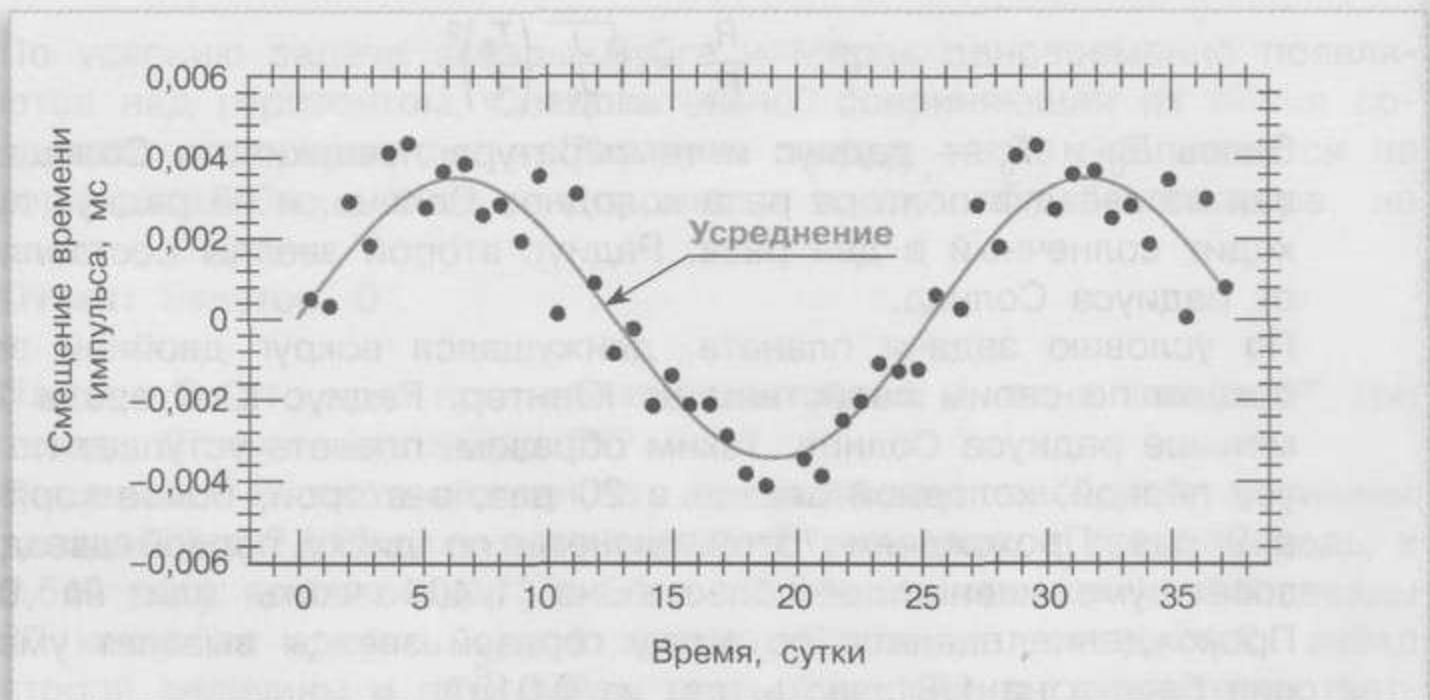
$$\tau = 6,22 \text{ мс}$$

$$(0,00622 \text{ с})$$

$$M = 1,5M_0$$

$$m - ?$$

Решение: Пульсар изменяет свой наблюдаемый период вследствие своего вращения вокруг общего с планетой центра масс и эффекта Доплера. По графику мы можем определить период обращения пульсара и планеты вокруг общего центра масс T , он равен 25 суткам.

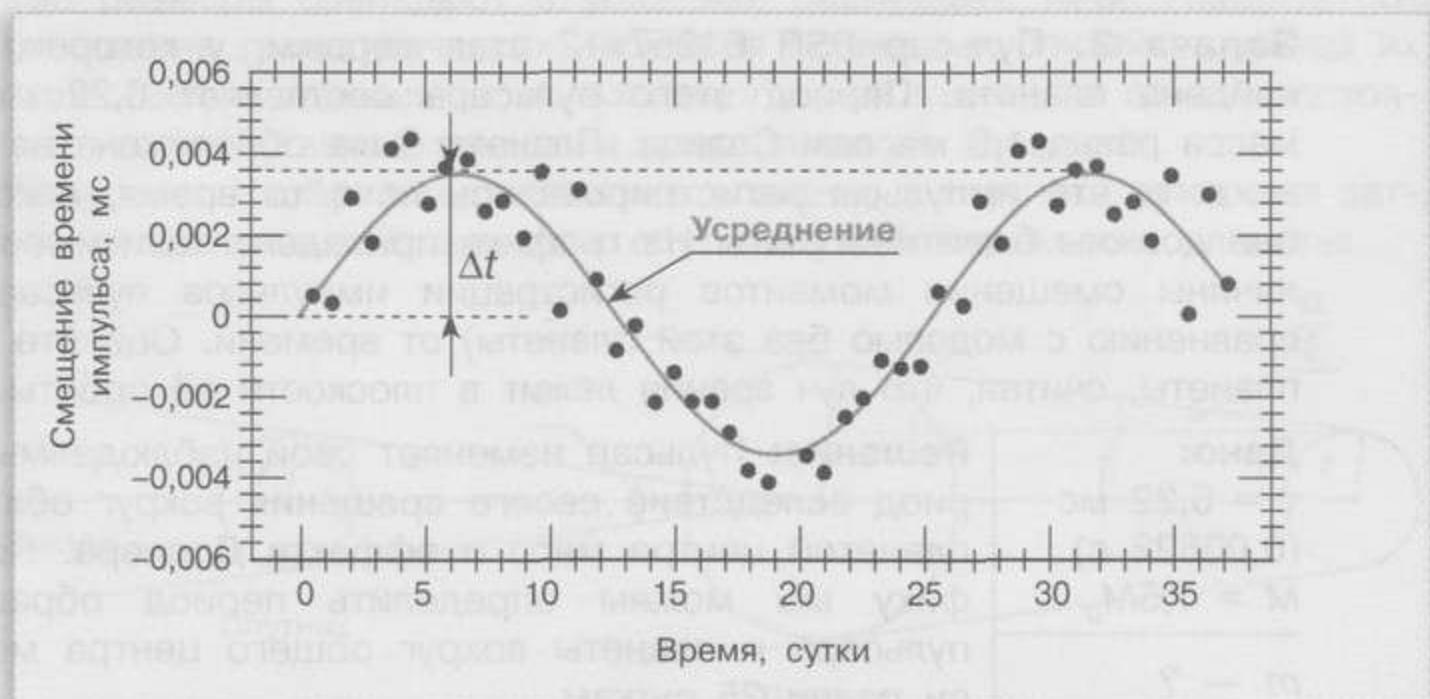


Запаздывание сигналов определяется тем, насколько дальше (или ближе) расположен пульсар по сравнению с центром масс системы. Если луч зрения находится в плоскости орбит, то радиус орбиты пульсара A есть произведение максимального запаздывания импульса Δt (0,0035 мс, см. рисунок) и скорости света (c):

$$A = c \cdot \Delta t = 1 \text{ км.}$$

Обозначим массы пульсара и планеты как M и m , радиус орбиты планеты как a . Расстояние между компонентами системы равно

$$a_0 = a + A = \frac{A(M + m)}{m}.$$





Здесь a — большая полуось орбиты планеты. Мы учли, что из определения центра масс $AM = am$. Из III закона Кеплера имеем

$$\frac{G(M+m)T^2}{m} = a_0^3 = A^3 \frac{(M+m)^3}{m^3}.$$

Масса планеты составляет

$$m = \left(\frac{4\pi^2(M+m)^2 A^3}{GT^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{4\pi^2 M^2 A^3}{GT^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{v^2 M^2 A}{G} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Мы получаем значение 10^{23} кг, или 1/60 массы Земли! С учётом возможного наклона орбиты планеты к картинной плоскости (при решении не рассматривалось) масса планеты может быть больше. В реальности у данного пульсара есть ещё две планеты с большей массой. В данной задаче был отдельно рассмотрен эффект, по которому удалось открыть третью, наименее массивную планету.

Ответ: 10^{23} кг.

Ответы к задачам

I. Введение в астрономию

1.1. Солнце. 1.2. 10^{42} кг. 1.3. $5 \cdot 10^{17}$ км. 1.4. Через 50,2 тысячи лет. 1.5. Длина проволоки составит примерно $5 \cdot 10^{29}$ км, что больше нынешних размеров Вселенной. 1.6. 120 000 лет. 1.7. В 3,7 раза. 1.8. $8 \cdot 10^{-21}$ кг/м³. 1.9. 3 км. 1.10. В $2 \cdot 10^{11}$ раз. 1.11. Около 8000 км. 1.12. Разрешение телескопов на Земле ограничено влиянием земной атмосферы и равно примерно 1". Разрешение телескопа имени Хаббла лучше 0,1". 1.13. «Радиоастрон» — можно (разрешение около 10 млн км). С метровым телескопом — нельзя (разрешение — сотни миллиардов км). 1.14. Отсутствие атмосферы; малая угловая скорость вращения небесной сферы; меньшая сила тяжести, возможность установки тяжёлого оборудования. 1.15. Примерно 120 000 звёзд на всей небесной сфере.

II. Астрометрия

2.1. В 100 раз. 2.2. Ярче двойная из звёзд 1^m и 3^m. 2.3. $-27,2^m$. 2.4. Точка 1. 2.5. Одинаково с точностью до нескольких процентов. 2.6. $28,5^m$. 2.7. Именно в эту сторону в северных широтах по небу вращается Солнце и его тень — стрелка солнечных часов. 2.8. Две — Северный и Южный полюса мира. 2.9. В тропическом поясе, на широтах от $-24,5^\circ$ до $+24,5^\circ$ (широты тропиков плюс примерно один градус, соответствующий видимым размерам тени Земли). 2.10. Да; нет. 2.11. В январе. 2.12. Он выше всего располагается над горизонтом летними ночами и осенними вечерами. 2.13. 2, так может быть только в Южном полушарии. 2.14. Вероятнее всего — планета. 2.15. $+23,4^\circ$; $-23,4^\circ$; $+66,6^\circ$; $-66,6^\circ$. 2.16. 20° . 2.17. 0° . 2.18. Нет; да. 2.19. Для звёзд со склонением от -56° до $+56^\circ$. 2.20. Точка весеннего равноденствия. 2.21. Нет. 2.22. Да; да. 2.23. Да. 2.24. 90° . 2.25. Одна четверть. 2.26. $+70^\circ$. 2.27. В Южном полушарии; в Северном полушарии. 2.28. Марс, Юпитер или Сатурн. 2.29. С левой стороны. 2.30. Сатурн. 2.31. В начале января вблизи южного тропика (на широтах $22-23^\circ$ ю.ш.). 2.32. Вечером. 2.33. Зимой. 2.34. Осенью. 2.35. Из-за движения Земли вокруг Солнца; сидерический период. 2.36. Нет, только в северных широтах. 2.37. Вблизи экватора в тёмное время суток

рога направлены вверх. **2.38.** 3, там видна часть обратной стороны Луны. **2.39.** Такое взаимное расположение Земли и Луны невозможно. Луна, очевидно, должна находиться между Землёй и наблюдателем, но в этом случае было бы видно её обратное полушарие, а не то, что на рисунке. **2.40.** Новолуние; полнолуние. **2.41.** Из-за наклона орбиты Луны к эклиптике Луна обычно проходит выше или ниже Солнца или земной тени на небе. **2.42.** Да. **2.43.** Вечер. **2.44.** Лунная тень сравнительно мала (не более 250 км, если не учитывать эффект проекции на земную поверхность) и быстро перемещается по поверхности Земли. **2.45.** 7,5 минуты. Необходимо учитывать, что поверхность Земли также движется за счёт осевого вращения нашей планеты. **2.46.** Из-за рассеяния сине-зелёных лучей Солнца в атмосфере Земли. Ту же причину имеют голубой цвет ясного неба и красный цвет Солнца у горизонта. **2.47.** Прозрачность атмосферы Земли резко ухудшалась, и Луна в тени Земли вместо красного приобретала тёмно-коричневый цвет, иногда становясь практически невидимой. **2.48.** Нет. Тень Земли около Луны значительно больше самой Луны. **2.49.** Кольцеобразные. Средний угловой диаметр у Солнца больше, чем у Луны. **2.50.** Теневые лунные, так как тень Земли имеет больший угловой диаметр, чем Солнце. **2.51.** 1, 3, 4. **2.52.** Лунное затмение запечатлено на фото 1, 2, 4, 6. **2.53.** В день осеннего равноденствия. **2.54.** 12 декабря. **2.55.** Нет. Наклон экватора к эклиптике всё равно порождал бы эффект уравнивания времени, хотя он был бы меньшим. **2.56.** 45° в.д. **2.57.** В $23^{\text{ч}}57^{\text{м}}$ по московскому времени того же дня. **2.58.** Около 1 сентября. **2.59.** В $16^{\text{ч}}56^{\text{м}}$. **2.60.** Нужно проехать на 56 км в западном направлении. **2.61.** 366. **2.62.** Юлианский, на 11 минут. **2.63.** В XLIV (44) и XLV (45) веках.

III.

Небесная механика

3.1. В 1,5 раза. **3.2.** Козерог. **3.3.** Меркурий, Венера. **3.4.** В восточной стороне утром. **3.5.** Восточная. **3.6.** 22° . **3.7.** Да, вблизи нижнего соединения. **3.8.** У Марса, который будет находиться на небе противоположно Солнцу. **3.9.** Осенью. **3.10.** 41° . **3.11.** $6^{\text{ч}}00^{\text{м}}00,0237^{\text{с}}$, в осеннее равноденствие. **3.12.** 15,2 пк, 49,7 св. лет. **3.13.** 0,38 а.е. **3.14.** В это время Земля находится в том же направлении от Солнца, что и перигелий орбиты Марса. **3.15.** В 4,4 раза. **3.16.** 29,8 км/с; 29,3 км/с; 30,3 км/с; 24,1 км/с; 21,9 км/с; 26,4 км/с. **3.17.** $1,019^\circ/\text{сут}$; $0,952^\circ/\text{сут}$. **3.18.** 2,73 а.е.

3.19. 34,5 а.е. **3.20.** 1,77 сут. **3.21.** Спутник Марса Фобос. **3.22.** Нептун. **3.23.** 0,5. **3.24.** Сатурн. **3.25.** Гиперболическая. **3.26.** 5, 3, 2, 1, 4. **3.27.** Такое же, как вокруг Земли без атмосферы, — 84 минуты. **3.28.** Радиус астероида больше 20 км. **3.29.** 26 140 км. **3.30.** $1,2 \cdot 10^6$ кг/см³. **3.31.** 3 км. **3.32.** 17. **3.33.** Перицентр: $v_p = v_{p_0} \sqrt{1 + e}$; апоцентр: $v_A = v_{A_0} \sqrt{1 - e}$. **3.34.** Меркурий: 239 тыс. км; Венера: 1536 тыс. км; Земля: 42,2 тыс. км; Марс: 20,4 тыс. км; Юпитер: 160 тыс. км; Сатурн: 112 тыс. км; Уран: 82,7 тыс. км; Нептун: 83,5 тыс. км. Могут существовать для всех планет, кроме Меркурия и Венеры, где тело с этих орбит перейдёт на околосолнечную орбиту. **3.35.** Сатурн. **3.36.** 1,24 года. **3.37.** 2,17 а.е. (длительность полёта туда и обратно — 2 года) или 3,16 а.е. (3 года). **3.38.** Около 5 дней (в реальности было 4 дня). **3.39.** $0,077$ с⁻¹ или $4,43^\circ/\text{с}$. **3.40.** Меркурий (если учитывать наличие у Земли атмосферы).

IV. Строение Солнечной системы

4.1. 7 — Солнце, Луна и 5 планет. **4.2.** 12 590 лет. **4.3.** Да, это орбиты, характерные для облака Оорта. **4.4.** Большую часть времени — снаружи, в среднем в 0,06 радиуса Солнца над его поверхностью. **4.5.** 47. **4.6.** От $0,4''$ до $0,8''$. **4.7.** От 12,2 до 71,8 км/с. **4.8.** 32,4 года. **4.9.** Вега. **4.10.** 80 км. **4.11.** Приближённое значение, рассчитанное по самой простой модели, — $9,87$ м/с². Точное — $9,83$ м/с². **4.12.** $2,9 \cdot 10^{-7}$. **4.13.** Гидросфера, в несколько сотен раз. **4.14.** Ближе всего к полюсу мира звезда Кохаб была ровно в начале Новой Эры. **4.15.** Северный полюс. **4.16.** Нет. **4.17.** Из-за вращения Земли вокруг Солнца. **4.18.** 57. **4.19.** В лунных морях воды нет. **4.20.** 1650 км. **4.21.** На экваторе. **4.22.** Луна удаляется от Земли, линейная и угловая скорости уменьшаются. **4.23.** $3,4 \cdot 10^{22}$ кг, в 2,2 раза меньше её реального значения, в фазах первой и последней четверти. **4.24.** Небесный экватор, из-за прецессии земной оси. **4.25.** В лунном море. **4.26.** Приливное трение, задерживающее более быстрое осевое вращение Луны, которое было раньше. **4.27.** Юпитер; Юпитер. **4.28.** Венера на фото 2 и 4. **4.29.** Венера, из-за мощного парникового эффекта, создаваемого углекислым газом в её атмосфере. **4.30.** Венера, во время её прохождения по диску Солнца в 1761 году. **4.31.** На Венеру, в плотной атмосфере которой можно было осуществить посадку с парашютом. **4.32.** Солнце, Луна, Венера. **4.33.** В 300 000 раз. **4.34.** $45\text{—}50''$.

4.35. Марс, в 23,2 раза (на $3,4^m$). **4.36.** Сатурн. **4.37.** Сатурн. **4.38.** С Земли — Сатурн, Уран. С космических аппаратов — Юпитер, Нептун. **4.39.** Ио, из-за приливного действия Юпитера. **4.40.** Две — Церера и Плутон. **4.41.** 11,8 часов. **4.42.** 100 секунд. **4.43.** В равноденствие. **4.44.** 7 км. **4.45.** 3, 2, 1, 4. **4.46.** Объект 2 (планетарная туманность вокруг остатка далёкой звезды) не связана с кометой (3), её распадом (1) и осколками, влетающими в атмосферу и порождающими явления метеоров (4). **4.47.** При приближении к Солнцу лёд, входящий в состав комет, испаряется. Вместе с частицами пыли он образует голову и хвост кометы, которые существенно улучшают её способность отражать солнечный свет. **4.48.** В 2136 г. **4.49.** При каждом приближении к Солнцу комета теряет часть своего вещества. Короткопериодические кометы постепенно теряют яркость. **4.50.** 19,6 а.е. («комета семейства Урана»). **4.51.** От 11,2 до 72,8 км/с (необходимо учитывать притяжение Земли). **4.52.** От 15 до 630 тонн. **4.53.** В 35 000 раз. **4.54.** Суммарная масса всех астероидов в 1000 раз меньше массы Земли, их недостаточно для планеты. **4.55.** Наиболее опасны тела, догоняющие Землю и имеющие меньшую скорость относительно нашей планеты. Они с большей вероятностью не успеют сгореть до падения на поверхность Земли.

V.

Астрофизика и звёздная астрономия

5.1. 7 см, 60 крат. **5.2.** 1,8", это определяется диаметром объектива. **5.3.** 4000 а.е. или 0,02 пк. **5.4.** Окуляр с фокусным расстоянием 8 см. **5.5.** Около 0,0001". **5.6.** Телескоп с диаметром объектива 60—80 см. **5.7.** У синих лучей меньше длина волны и как следствие — меньший размер дифракционного диска. **5.8.** Для наблюдения разных объектов нужны разные увеличения. Слабые туманности, звёздные скопления и галактики лучше видны при маленьком увеличении, а для разрешения тесных двойных систем и наблюдения Луны и планет нужны большие увеличения. **5.9.** 3 см. При большем фокусном расстоянии окуляра часть света, собранного объективом, не будет попадать в глаз наблюдателя. **5.10.** 1,2 см. **5.11.** В 2 раза; в 1,6 раза. **5.12.** $6,3 \cdot 10^7$ Дж. **5.13.** Уменьшится примерно в 4 раза, Солнце станет красным. **5.14.** Около 17 м. **5.15.** $2,6 \cdot 10^{-8}$ Дж. **5.16.** Около 10^{-14} Вт. **5.17.** Светимость звезды пропорциональна $R^2 T^4$, где R и T — её радиус и температура. Яркость звезды на Земле пропорциональна $\frac{R^2 T^4}{L^2}$, где L — расстояние

до звезды. Площадь видимого диска пропорциональна $\frac{R^2}{L^2}$. В итоге яркость с единицы видимой площади пропорциональна T^4 .

5.18. 2 млн К. При большей кинетической температуре протоны начнут покидать солнечную корону. В итоге в ней задерживаются только частицы с меньшей энергией. Более лёгкие электроны удерживаются электростатическим притяжением протонов. **5.19.** Корона сильно разрежена и не находится в состоянии термодинамического равновесия. Поэтому она светит слабее Солнца. **5.20.** С синим; с красным. **5.21.** На объектив (не окуляр!) телескопа нужно надеть плотный солнечный светофильтр, убедившись, что он закреплён и не спадёт с него. Другой способ — проецировать изображение Солнца на белый экран, установленный за окуляром, при этом наводиться на Солнце нужно, не глядя в телескоп. **5.22.** 2610 Вт/м²; 590 Вт/м². **5.23.** 7250 К. **5.24.** Первая звезда ярче в 6,25 раз. **5.25.** Угловой диаметр Бетельгейзе больше в 12 раз. **5.26.** $5,3 \cdot 10^{16}$ кг. **5.27.** 2,2 г/см³. **5.28.** Около 40 светимостей Солнца; спектральный класс А. **5.29.** 0,7^m. **5.30.** $R = 220 \text{ млн км} \cdot (6000 \text{ К/Т})^2$. **5.31.** Линии водорода в оптическом диапазоне спектра создают возбуждённые атомы, которых на Солнце мало. Их существенно больше у звёзд спектральных классов А и F. **5.32.** $\frac{M}{M_0} \sim \frac{R}{R_0}$. **5.33.** Сверхгигант со светимостью не менее 2500 светимостей Солнца. **5.34.** $3 \cdot 10^{-4}$ с. **5.35.** $9 \cdot 10^{-4}$ с. **5.36.** 0,9 см. **5.37.** 80 с. **5.38.** 470 км/с. **5.39.** 800 тысяч лет. **5.40.** Радиус горячей звезды в 10 раз меньше радиуса холодной звезды. **5.41.** 3,08^m; 0,07^m. **5.42.** в). **5.43.** 0,75^m. **5.44.** 11,5 часа. **5.45.** 13 пк. **5.46.** В минимуме радиус больше на 5%. **5.47.** 100 пк (в действительности — 130 пк). **5.48.** 450 кпк. **5.49.** В 100 000 раз. **5.50.** $2,6 \cdot 10^{38}$ Дж. **5.51.** Примерно раз в 500 лет (в реальности — реже из-за межзвёздного поглощения света в диске Галактики). **5.52.** 2 кпк. **5.53.** Около 6^m, можно. **5.54.** Да, так как суммарная масса системы равна 3,7 массы Солнца. **5.55.** 3^m.

VI.

Млечный Путь — наша Галактика

6.1. Холодный газ при том же давлении имеет бóльшую плотность, а также характеризуется меньшей скоростью частиц. Поэтому холодный газ легче сжимается под действием собственного тяготения. **6.2.** Около 130 000 звёзд. **6.3.** 800 млн лет. **6.4.** Абсолютная

звёздная величина Альдебарана примерно такая же, как ярчайших звёзд скопления Гиады, но он в небе Земли ярче. Следовательно, Альдебаран находится ближе. **6.5.** 0,7 пк. **6.6.** 0,8 светимости Солнца. **6.7.** В Галактике сейчас нет крупных облаков газа, из которых могло бы образоваться шаровое скопление (несколько сот тысяч звёзд). Но они могут быть в других галактиках. **6.8.** Рассеянное скопление, в отличие от шарового, не является гравитационно связанным и быстро распадается. Старые рассеянные скопления не могут существовать. **6.9.** Рассеянные скопления могут быть только там, где происходит звездообразование. За время своей жизни они не успевают покинуть эти области. Шаровые скопления за время своей жизни успевают сильно изменить свои орбиты вокруг центра Галактики и наблюдаются во всех направлениях от него. **6.10.** Телескоп с диаметром объектива не менее 6 см. **6.11.** 8 км/с. **6.12.** Сможет, расстояние между звёздами существенно больше размеров планетной системы. **6.13.** Около 5 кпк. **6.14.** Да, 0,02". **6.15.** $2,7 \cdot 10^{38}$ кг или 135 млн масс Солнца. **6.16.** Около 20. **6.17.** Около 2 млрд лет. **6.18.** $-12,5^m$, как полная Луна. **6.19.** $-18,3^m$. **6.20.** Их звёздная величина будет около $+13,5^m$, в 20-сантиметровый телескоп они будут на пределе видимости. **6.21.** 1 — галактики (вдали от Млечного Пути), 2 — шаровые скопления (далеко вокруг центра Галактики), 3 — рассеянные скопления (в Млечном Пути). **6.22.** Около 200 млн лет, как и у Солнца. **6.23.** Всё небо будет иметь ту же поверхностную яркость, что и скопление в небе Земли, полусфера будет иметь звёздную величину около -5^m . **6.24.** 200 пк. **6.25.** Они произошли уже через 20—50 млн лет после образования скопления, т.е. около 13 млрд лет назад. **6.26.** Галактика станет существенно ярче, так как пыль перестанет скрывать центральные области Галактики.

VII. Галактики

7.1. Туманность Андромеды, около 2,5 млн световых лет или 770 кпк. **7.2.** Дева (большое скопление галактик); Стрелец (пыль диска нашей Галактики скрывает более далёкие объекты). **7.3.** 4 (рассеянное звёздное скопление), 2 (шаровое звёздное скопление), 1 (Большое Магелланово облако — спутник нашей Галактики), 3 (туманность Треугольника, соседняя большая спиральная галактика). **7.4.** В туманности Андромеды. **7.5.** В туманности Андромеды. Излучение звезды в нашей Галактике будет заблокировано пылью. **7.6.** 1,5—2 млрд лет. **7.7.** Спиральные — 1, 4; эллиптическая — 3; непра-

вильная — 2. **7.8.** Через 5 млрд лет. **7.9.** Около 150 Мпк. **7.10.** 0,35; 105 000 км/с. **7.11.** 4023 Å; 4058 Å. **7.12.** 2,4'. **7.13.** Около 1200 км/с. **7.14.** $\rho \sim R^{-2}$. **7.15.** $6,5 \cdot 10^{11}$ светимостей Солнца. **7.16.** 0,45 масс Солнца в год. **7.17.** 1,5 Мпк. **7.18.** 7 Гпк, что сопоставимо с масштабами Вселенной. **7.19.** $21,7^m$. **7.20.** $z \sim 10$. **7.21.** 10^{10} лет. **7.22.** 4 пк. **7.23.** 180 а.е. **7.24.** На $0,8^m$. **7.25.** Мы сможем заметить излучение самой пыли в инфракрасной области спектра. Помимо этого, если рядом будет находиться другая галактика, будет заметно искажение её формы, вызванное притяжением запылённой галактики. **7.26.** Звездообразование интенсивнее в галактике с $z = 1$. **7.27.** Примерно в 10^{10} раз.

VIII. Строение и эволюция Вселенной

8.1. В 8 раз больше, $8 \cdot 10^{-26}$ кг/м³. **8.2.** В 4 раза больше, $4 \cdot 10^{-26}$ кг/м³. **8.3.** $7 \cdot 10^{-15}$ кг/м³. Это на несколько порядков больше реальных плотностей туманностей. **8.4.** Плотность Галактики в 10^6 раз больше критической плотности. **8.5.** 6 м^{-3} . **8.6.** $R = \frac{c}{H} = 1,4 \cdot 10^{26} \text{ м} = 14 \text{ млрд световых лет}$ — характерный масштаб Вселенной. **8.7.** Через 15 млрд лет. **8.8.** Реликтовое излучение. **8.9.** При возрасте Вселенной в 100 тыс. лет. **8.10.** 350 км/с. **8.11.** $4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$. **8.12.** Во Вселенной образовались бы галактики и скопления галактик, но они были бы гораздо темнее, так как звёздами становились бы только очень крупные тела с массой в несколько масс Солнца, в которых начались бы термоядерные реакции горения гелия. Более того, время жизни этих звёзд было бы крайне невелико — несколько млн лет. Вселенная быстро стала бы совершенно тёмной. **8.13.** 1) Конечность масштабов Вселенной; 2) красное смещение и уменьшение энергии фотонов от далёких объектов; 3) межзвёздное поглощение света. **8.14.** Да, вблизи нашей Галактики. Пример — туманность Андромеды ($z = -0,001$). **8.15.** 2 млрд лет. Было известно, что возраст Земли больше. **8.16.** В первом случае да, так как хаббловская скорость, соответствующая радиусу Местной группы (около 30 км/с), меньше второй космической скорости (около 150 км/с). Во втором случае нет. **8.17.** Резко изменится форма галактик и их спиральных ветвей. Появятся новые очаги звездообразования. Последствия для планетных систем маловероятны, так как расстояния между пролетающими мимо звёздами существенно больше размеров планетных систем. **8.18.** 0,54. **8.19.** Около 20 млрд лет.

9.1. 7 млрд лет. Плотности были одинаковы. **9.2.** Нет, так как плотность материи в Местной группе выше плотности тёмной энергии. **9.3.** 1,3 Мпк. Это характерное расстояние, на котором становится заметным хаббловское расширение галактик. **9.4.** $0,01^m$; $0,0001^m$. **9.5.** $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$; $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}$. **9.6.** $9 \cdot 10^{26} \text{ кг}$ (половина массы Юпитера). **9.7.** 0,08 а.е. **9.8.** 0,1 массы Солнца. **9.9.** Пульсары имеют стабильные и точно определённые периоды. Действие даже небольших планет может вызвать изменения наблюдаемых периодов, которые могут быть зафиксированы. **9.10.** Около 10^{-6} . **9.11.** 10 пк; около 5^m . **9.12.** 45 тыс. км; 0,2 а.е. **9.13.** 50 000 км. **9.14.** Да; да; нет. **9.15.** Да; нет; нет. **9.16.** Из-за меньшей массы звёзд у них регистрируются большие скорости, вызванные действием планет. При прохождении по диску маленькой звезды планета вызывает более заметное падение блеска звезды. **9.17.** Через 27 лет. **9.18.** У красных карликов, ещё не сошедших с главной последовательности, массы не более 0,7 масс Солнца, светимость не более 0,25 светимостей Солнца, расстояния до звезды не более 0,5 а.е.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные физические и астрономические постоянные

Гравитационная постоянная $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$

Скорость света в вакууме $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$

Универсальная газовая постоянная $\mathfrak{R} = 8,31 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$

Постоянная Стефана—Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-4}$

Масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

Астрономическая единица $1 \text{ а.е.} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$

Парсек $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$

Постоянная Хаббла $H = 68 \text{ (км/с)/Мпк}$

Данные о Солнце

Радиус $697\,000 \text{ км}$

Масса $1,989 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

Светимость $3,88 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$

Видимая звёздная величина $-26,78^m$

Абсолютная звёздная величина $+4,72^m$

Эффективная температура 5800 К

Спектральный класс G2

Солнечная постоянная на расстоянии Земли 1360 Вт/м^2

Данные о Земле

Тропический год $365,24219 \text{ суток}$

Средняя орбитальная скорость $29,8 \text{ км/с}$

Период вращения $23 \text{ часа } 56 \text{ минут } 04 \text{ секунды}$

Экваториальный радиус $6378,14 \text{ км}$

Полярный радиус $6356,77 \text{ км}$

Данные о Луне

Среднее расстояние от Земли $384\,400 \text{ км}$

Средний эксцентриситет орбиты $0,055$

Сидерический (звёздный) период обращения $27,321662 \text{ суток}$

Синодический период обращения $29,530589 \text{ суток}$

Радиус 1738 км

Масса $7,348 \cdot 10^{22} \text{ кг}$

Средняя плотность $3,34 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$

Видимая звёздная величина в полнолуние $-12,7^m$

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Планета	Масса		Радиус		Плотность (г·см ⁻³)	Период вращения вокруг оси	Наклон экватора к плоскости орбиты (градусы)	Вид. звёздная величина*
	кг	массы Земли	км	радиусы Земли				
Солнце	$1,989 \cdot 10^{30}$	332 946	697 000	109,3	1,41	25,380 сут	7,25	-26,8
Меркурий	$3,302 \cdot 10^{23}$	0,05271	2439,7	0,3825	5,42	58,646 сут	0,00	-0,1
Венера	$4,869 \cdot 10^{24}$	0,81476	6051,8	0,9488	5,20	243,019 сут**	177,36	-4,4
Земля	$5,974 \cdot 10^{24}$	1,00000	6378,1	1,0000	5,52	23,934 час	23,45	—
Марс	$6,419 \cdot 10^{23}$	0,10745	3397,2	0,5326	3,93	24,623 час	25,19	-2,0
Юпитер	$1,899 \cdot 10^{27}$	317,94	71 492	11,209	1,33	9,924 час	3,13	-2,7
Сатурн	$5,685 \cdot 10^{26}$	95,181	60 268	9,4494	0,69	10,656 час	26,73	0,4
Уран	$8,683 \cdot 10^{25}$	14,535	25 559	4,0073	1,32	17,24 час**	97,86	5,7
Нептун	$1,024 \cdot 10^{26}$	17,135	24 746	3,8799	1,64	16,11 час	28,31	7,8

* — для наибольшей элонгации внутренних планет и среднего противостояния внешних планет.

** — обратное вращение.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТ ПЛАНЕТ

Планета	Большая полуось		Эксцентриситет	Наклон к плоскости эклиптики (градусы)	Период обращения	Синодический период (сут.)
	млн км	а.е.				
Меркурий	57,9	0,3871	0,2056	7,004	87,97 сут	115,9
Венера	108,2	0,7233	0,0068	3,394	224,70 сут	583,9
Земля	149,6	1,0000	0,0167	0,000	365,26 сут	—
Марс	227,9	1,5237	0,0934	1,850	686,98 сут	780,0
Юпитер	778,3	5,2028	0,0483	1,308	11,862 лет	398,9
Сатурн	1429,4	9,5388	0,0560	2,488	29,458 лет	378,1
Уран	2871,0	19,1914	0,0461	0,774	84,01 лет	369,7
Нептун	4504,3	30,0611	0,0097	1,774	164,79 лет	367,5

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

Спутник	Масса (кг)	Радиус (км)	Плотность (г/см ³)	Радиус орбиты (км)	Период обращения (сут.)	Геометрич. альbedo	Видимая звёздная величина (m)*
Земля							
Луна	$7,348 \cdot 10^{22}$	1738	3,34	384 400	27,32166	0,12	-12,7
Марс							
Фобос	$1,08 \cdot 10^{16}$	~10	2,0	9380	0,31910	0,06	11,3
Деймос	$1,8 \cdot 10^{15}$	~6	1,7	23 460	1,26244	0,07	12,4
Юпитер							
Ио	$8,94 \cdot 10^{22}$	1815	3,55	421 800	1,769138	0,61	5,0
Европа	$4,8 \cdot 10^{22}$	1569	3,01	671 100	3,551181	0,64	5,3
Ганимед	$1,48 \cdot 10^{23}$	2631	1,94	1 070 400	7,154553	0,42	4,6
Каллисто	$1,08 \cdot 10^{23}$	2400	1,86	1 882 800	16,68902	0,20	5,7
Сатурн							
Тефия	$7,55 \cdot 10^{20}$	530	1,21	294 660	1,887802	0,9	10,2
Диона	$1,05 \cdot 10^{21}$	560	1,43	377 400	2,736915	0,7	10,4
Рея	$2,49 \cdot 10^{21}$	765	1,33	527 040	4,517500	0,7	9,7
Титан	$1,35 \cdot 10^{23}$	2575	1,88	1 221 850	15,94542	0,21	8,2
Япет	$1,88 \cdot 10^{21}$	730	1,21	3 560 800	79,33018	0,2	~11,0
Уран							
Миранда	$6,33 \cdot 10^{19}$	235,8	1,15	129 900	1,413479	0,27	16,3
Ариэль	$1,7 \cdot 10^{21}$	578,9	1,56	190 900	2,520379	0,34	14,2
Умбриэль	$1,27 \cdot 10^{21}$	584,7	1,52	266 000	4,144177	0,18	14,8
Титания	$3,49 \cdot 10^{21}$	788,9	1,70	436 300	8,705872	0,27	13,7
Оберон	$3,03 \cdot 10^{21}$	761,4	1,64	583 500	13,46324	0,24	13,9
Нептун							
Тритон	$2,14 \cdot 10^{22}$	1350	2,07	354 800	5,87685**	0,7	13,5

* — для полнолуния или среднего противостояния внешних планет.

** — обратное направление вращения.

НАИБОЛЕЕ ЯРКИЕ ЗВЁЗДЫ НОЧНОГО НЕБА

Название	Обозначение в созвездии	Прямое восхождение, α		Склоне- ние, δ		Звёзд- ная величи- на, m	Спек- траль- ный класс	Рассто- яние, пк
		час	мин	°	'			
Сириус	α Большого Пса	06	45,1	-16	43	-1,46	A1	2,64
Канопус	α Киля	06	24,0	-52	42	-0,72	F0	96
Ригель Кентаурус	α Центавра (A+B)	14	39,6	-60	50	-0,27	G2+K1	1,34
Арктур	α Волопаса	14	15,7	+19	11	-0,04	K1	11,2
Вега	α Лиры	18	36,9	+38	47	0,03	A0	7,8
Капелла	α Возничего	05	16,7	+46	00	0,08	G5	12,9
Ригель	β Ориона	05	14,5	-08	12	0,12	B8	260
Процион	α Малого Пса	07	39,3	+05	14	0,38	F5	3,50
Ахернар	α Эридана	01	37,7	-57	14	0,46	B3	43
Бетельгейзе	α Ориона	05	55,2	+07	24	0,50	M1	200
Хадар	β Центавра	14	03,8	-60	22	0,61	B1	120
Альтаир	α Орла	19	50,8	+08	52	0,77	A7	5,15
Альдебаран	α Тельца	04	35,9	+16	31	0,85	K5	20
Антарес	α Скорпиона	16	29,4	-26	26	0,96	M1	190
Спика	α Девы	13	25,2	-11	10	0,98	B1	80
Поллукс	β Близнецов	07	45,3	+28	02	1,14	K0	10,3
Фомальгаут	α Южной Рыбы	22	57,7	-29	37	1,16	A3	7,66
Мимоза	β Южного Креста	12	47,7	-59	41	1,25	B0	86
Денеб	α Лебедя	20	41,4	+45	17	1,25	A2	505
Акрукс	α Южного Креста	12	26,6	-63	06	1,33	B0	98
Регул	α Льва	10	08,4	+11	58	1,35	B7	23,8



Учебное издание

Серия «Сферы 1—11»

Угольников Олег Станиславович

АСТРОНОМИЯ

Задачник

10—11 классы

Учебное пособие для общеобразовательных организаций

Базовый уровень

Руководитель проекта «Сферы 1—11» *С.Г. Яньков*

Руководитель Центра «Сферы» *А.В. Сильянова*

Выпускающий редактор *Н.Н. Гриценко*

Художественный редактор *Ю.С. Асеева*

Компьютерная вёрстка *Ю.С. Асеевой*

Художественное оформление *С.Г. Куркиной*

Дизайн обложки *О.В. Поповича, В.А. Прокудина*

Технический редактор *Л.В. Марухно*

Корректор *М.Г. Волкова*

В издании использованы фотоматериалы
фотобанков *East News, Shutterstock*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01.

Подписано в печать 01.02.18. Формат 70×90^{1/16}. Бумага типографская.

Гарнитура PragmaticaC. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 5,85.

Тираж 10 000 экз. Заказ № Е-346ТАТ.

Акционерное общество «Издательство «Просвещение».

127521, Москва, 3-й проезд Марьиной роши, 41.

Отпечатано по заказу АО «ПолиграфТрейд».

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии филиала АО «ТАТМЕДИА»

«ПИК «Идел-Пресс». 420066, г. Казань, ул. Декабристов, д. 2.