

Д.Я. МАРТЫНОВ В.М. ЛИПУНОВ

# СБОРНИК ЗАДАЧ

ПО АСТРОФИЗИКЕ

Д. Я. МАРТЫНОВ, В. М. ЛИПУНОВ

# СБОРНИК ЗАДАЧ ПО АСТРОФИЗИКЕ

*Получено Министерством высшего  
и среднего специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для студентов вузов,  
обучающихся по специальности «Астрономия»*



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1986

ББК 22.63  
М 29  
УДК 52 (075.8)

Мартынов Д. Я., Липунов В. М. Сборник задач по астрофизике. — Учебное пособие для вузов. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 128 с.

Сборник включает 400 задач, снабженных ответами, а в трудных случаях также указаниями, развернутыми ответами или списком рекомендуемой литературы. Авторы преследовали цель помочь студентам глубже проникнуть в физическую сторону явлений и научить их смелее оперировать своими знаниями по физике при последующих занятиях астрофизикой.

Для студентов и преподавателей университетов. Может быть использован студентами и преподавателями педагогических институтов.

Табл. 6. Ил. 63. Библиогр. 24 назв.

Рецензенты:  
Кафедра астрономии Казанского Государственного университета им. В. И. Ульянова-Ленина,  
доктор физико-математических наук Н. Д. Новиков

Дмитрий Яковлевич Мартынов, Владимир Михайлович Липунов  
СБОРНИК ЗАДАЧ ПО АСТРОФИЗИКЕ

Редакторы А. В. Засов, И. Е. Рахлин  
Художественный редактор Т. Н. Кольчико  
Технический редактор С. Я. Шкляр. Корректор Н. Б. Ручницкая

ИБ № 12858

Сдано в набор 10.12.85. Подписано к печати 17.04.86. Т-07697. Формат 84×108/32. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 6,72. Усл. кр.-отт. 6,93. Уч.-изд. л. 7,26. Тираж 11 000 экз. Заказ № 1949. Цена 25 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы  
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени  
МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова  
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР  
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.  
113054 Москва, Валовая, 28

Отпечатано во 2-й типографии издательства «Наука»  
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6.

1705040000—084  
М—053 (02)—86 143-86

© Издательство «Наука».  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1986

## ПРЕДИСЛОВИЕ

До последнего времени у нас не было сборника задач к университетскому курсу астрофизики. Только в двух учебниках («Курс практической астрофизики» и «Курс общей астрофизики» Д. Я. Мартынова) приведены около 150 задач. Однако ответы к ним не даются, что затрудняет пользование ими для самообразования. Решив устранить этот недостаток, авторы сочли необходимым существенно расширить их диапазон, составив еще 250 задач. При этом составлены были многочисленные задачи-вопросы, требующие со стороны учащегося относительно более глубокого проникновения в астрофизику.

Современная астрофизика переполнена физическими идеями. Предполагается, что настоящий сборник поможет глубже проникнуть в физическую сторону явлений и научат читателя смелее оперировать своими познаниями в физике при последующих занятиях астрофизикой. Для всех задач даны ответы. Не всегда ответы типа «да» или «нет» удовлетворят читателя. В трудных случаях добавляются указания. Наконец, некоторые вопросы (отмеченные звездочкой) по серьезности своей приближаются к уровню задач, решаемых в курсовых студенческих работах. В помощь их решению дается список рекомендуемой литературы. Впрочем, в отдельных случаях авторы дают развернутый ответ, как, например, в задаче 58, посвященной вопросу о видимости звезд днем, — вопросу, имеющему двухтысячелетнюю историю. А для других — приводятся чертежи, фотографии, рисунки, которые облегчают читателю путь к цели.

Нужно отметить, что авторам не известны сборники задач по астрофизике ни в отечественной, ни в зарубежной литературе. Интересные вопросы содержатся во французском сборнике общеономического направления «Astronomie Méthodes et Calculs». Из этого сборника мы заимство-

вали две задачи о высоте гор на планетах и приливном разрушении твердых тел (352 и 375).

Авторы выражают глубокую признательность А. В. Засову, Э. В. Кононовичу, М. И. Лаврову и И. Д. Новикову за многочисленные замечания, способствовавшие улучшению задачника. Мы благодарны Н. А. Липуновой за многочисленные предложения и подготовку рукописи. Большую практическую помощь оказала Т. А. Бируля при изготовлении и иллюстраций.

Авторы признательны всем сотрудникам и аспирантам кафедры астрофизики и звездной астрономии МГУ за высказанные идеи, советы и замечания, а также студентам астрономического отделения физического факультета МГУ, проявившим живой интерес к решению задач и отысканию ошибок в ответах на семинарских занятиях.

Учитывая то, что предлагаемый сборник является первым в своем роде, мы просим быть снисходительными к пробелам и ошибкам, которые могут в нем встретиться. Мы будем признательны за все критические указания и предложения.

Москва, август, 1985 г.

*Д. Я. Мартынов  
В. М. Липунов*

## РАЗДЕЛ I

### ПРАКТИЧЕСКАЯ АСТРОФИЗИКА

#### ГЛАВА I

##### ОСНОВНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

1. Как изменится внефокальное изображение звезды, если центр объектива закрыть круглым экраном? Что произойдет при этом с фокальным изображением?

2. На матовом стекле, поставленном в фокусе астрографа, изображение Луны имеет размер 5 см. Чему равно фокусное расстояние астрографа?

3. Чтобы привести в соответствие изображение на пластинке с изображением, наблюдаемым в искателе телескопа, наблюдателю приходится рассматривать пластинку со стороны стекла. Что можно сказать о конструкции и типе телескопа?

4. Разность двух звездных величин связана с освещенностями выражением:

$$m_1 - m_2 = 2,5 \lg \frac{E_2}{E_1}.$$

Является ли число 2,5 точным?

5. Располагая объективом с фокусным расстоянием 1,5 м и диаметром 15 см, какое можно получить увеличение при наблюдении нормальным глазом (расстояние ясного видения 20 см) без окуляра? Какая доля падающего света попадет при этом внутрь глаза?

6. Доказать, что выходной зрачок телескопа есть изображение объектива, даваемое окуляром. Найти расстояние выходного зрачка от окуляра. Фокусное расстояние объектива  $F$ , а окуляра —  $f$ . Доказать, что отношение диаметров объектива и выходного зрачка равно  $F/f$ .

7. В вашем распоряжении имеется телескоп диаметром 40 см и фокусным расстоянием 6 м. Определить фокусное расстояние окуляра, соответствующего равнозрачковому увеличению.

Начиная с какого увеличения, окуляр Рамсдена не сможет показывать весь диск Луны? (Поле зрения окуляра Рамсдена равно  $30^\circ$ .)

8. В горизонтальных солнечных телескопах фокусное расстояние достигает 60 м. Определить линейный размер изображения Солнца.

9. Найти линейные размеры изображений Луны, Юпитера и Марса в камере, эквивалентное фокусное расстояние которой равно 19 м. Угловой размер трех выше названных светил соответственно равен  $31'05''$ ;  $47''$ ;  $8,9''$  (средний).

10. Астроном хочет поставить на телескоп с фокусным расстоянием  $F=250$  см микрометр с ценой деления 1 оборот =  $30''$ . Каков должен быть шаг винта микрометра?

11. Обладает ли идеальное параболическое зеркало нормальной дисторсией?

12. Имеется телескоп с диаметром входного зрачка 50 см и фокусным расстоянием 6 м. Необходимо приспособить к нему мелкоформатную камеру со светосилой 1:2,5 и фокусным расстоянием 50 мм. а) Какое нужно выбрать фокусное расстояние для окуляра перед камерой? б) Каково будет эквивалентное фокусное расстояние получившейся камеры и ее поле зрения? Сможет ли обеспечить такое поле зрения обыкновенный окуляр Гюйгенса, Рамсдена или ортоскопический окуляр?

13. Выразить разность звездных величин в децибелах.

14. При наблюдении в телескоп наблюдатель не замечает изменений в четкости изображения, двигая окуляр на четверть миллиметра. Что можно сказать о светосиле телескопа?

15. Как зависит оптическая мощность телескопа от его основных характеристик — диаметра  $D$  и фокусного расстояния  $F$  — при наблюдении:

- точечных объектов, ярких по сравнению с фоном?
- протяженных объектов значительно ярче неба?
- быстро движущихся ярких точечных объектов?

Указание: оптической мощностью называется выигрыш в освещенности чувствительного элемента, который обеспечивает телескоп по сравнению с невооруженным глазом.

16. Какой слой стекла нужно снять при изготовлении коррекционной пластинки Шмидта для телескопа с диаметром  $D=100$  см и светосилой  $m=F/D=1,5$ ? Показатель преломления стекла  $n=1,5$ .

17. Обладает ли комой изображение, полученное с помощью:

- параболического зеркала;
- сферического зеркала?

18. Чему равен максимальный диаметр поля зрения телескопа Шмидта, у которого  $F/D=2$ ?

19. Как изменяется фокусное расстояние рефрактора или рефлектора при изменении температуры на величину  $\Delta T$ ? Коэффициент линейного расширения стекла  $\alpha$ , фокусное расстояние  $F$ , показатель преломления  $n$  постоянен.

20. Во сколько раз светосила сплошного телескопа Шмидта больше светосилы обычного? Показатель преломления стекла  $n$ .

21. Сравните потери в объективе типа изображенного на рис. 1 с просветленной и не просветленной оптикой. Для

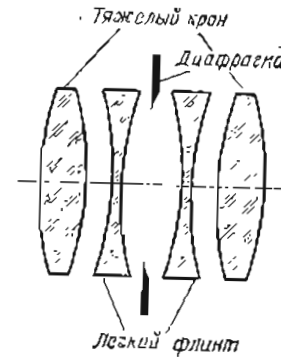


Рис. 1

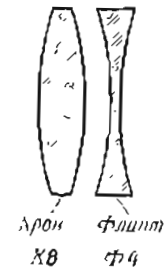


Рис. 2

коэффициента преломления тяжелого кроуна принять значение  $n=1,627$ , а для легкого флинта  $n=1,586$ . Принять, что после просветления отражается 0,5% падающего света. Падение лучей считать перпендикулярным.

22. В вашем распоряжении два телескопа одинакового диаметра — системы Кассегрена и системы Ричи — Кретьена. Какой из телескопов удобнее для следующих наблюдений:

- фотографирование туманности Андромеды;
- фотометрирование переменной звезды?

23. Какие области неба неудобны при наблюдении в телескопы, имеющие:

- английскую установку;
- горизонтальную установку?

24. Рассчитать визуальный объектив — ахромат из стекол сорта К8 и Ф4 (см. рис. 2). Параметры стекол таковы: а) для К8 — показатель преломления в линии D ( $\lambda=5890 \text{ \AA}$ )  $n_D=1,5163$ ;  $n_D-n_C=0,00240$ ;  $n_F-n_D=0,00566$ ;  $\gamma=64,1$  (С и F — линии солнечного спектра с длиной волны  $6560 \text{ \AA}$  ( $H_\alpha$ ) и  $4860 \text{ \AA}$  ( $H_\beta$ ) соответственно);

б) для Ф4 — показатель  $n_D=1,6242$ ;  $n_D-n_C=0,00496$ ;  $n_F-n_D=0,01242$ ;  $\gamma=35,9$ . Здесь  $\gamma=(n_D-1)/\Delta n$  для каждого стекла.

25. Определить отличие глубины параболоида от соприкасающейся сферы (см. рис. 3) ММ на расстоянии  $y$  от центра зеркала. Фокус зеркала  $F$ .

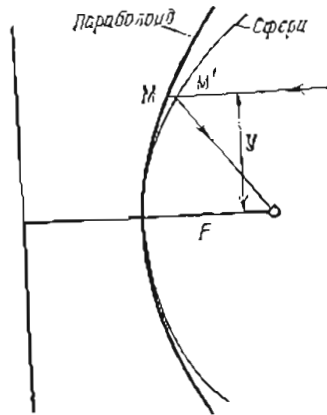


Рис. 3

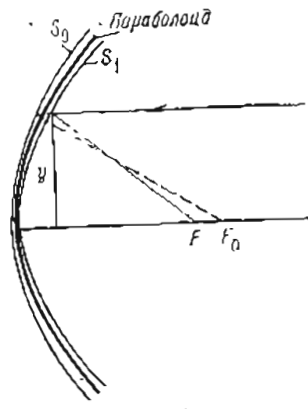


Рис. 4

26. Если бы плоская волна встречала не сферическое а параболическое зеркало, то она распространялась бы после отражения в виде сферы  $S_0$  с центром  $F_0$  (рис. 4). Но фактически волна встречается со сферой  $S_1$ , которая при ординате  $y$  лежит впереди параболоида на величину, определенную в предыдущей задаче. Вывести условие, накладывающее ограничение на светосилу сферического зеркала, соответствующее критерию Рэлея.

27. Принцип действия полевосправляющей линзы Пиацци — Смита основан на том факте, что плоскопараллельная пластинка толщиной  $\delta$  отодвигает изображение при малых углах падения лучей на величину  $\delta(n-1)/n$  (где  $n$  — показатель преломления). Выведите формулу для сдвига при произвольных углах падения  $i$  и оцените отклонение (в единицах  $\delta$ ) от плоской формы фокальной поверхности, исправляемой плоско-выпуклой линзой Пиацци — Смита. Линза изготовлена из крона ( $n=1,52$ ). Максимальный раствор конуса сходящихся лучей  $20^\circ$ .

28. Перечислите все источники паразитного света, с которыми приходится бороться при построении коронографа системы Лيو. Что бы вы изменили в конструкции коро-

нографа, предназначенного для наблюдений в открытом космосе?

29. Рассчитать внеатменный коронограф так, чтобы он давал изображение Солнца диаметром 2 см (дать фокусные расстояния трех его линз). Определить величину сферической aberrации от передней линзы. Диаметр передней плоско-выпуклой линзы принять равным 15 см.

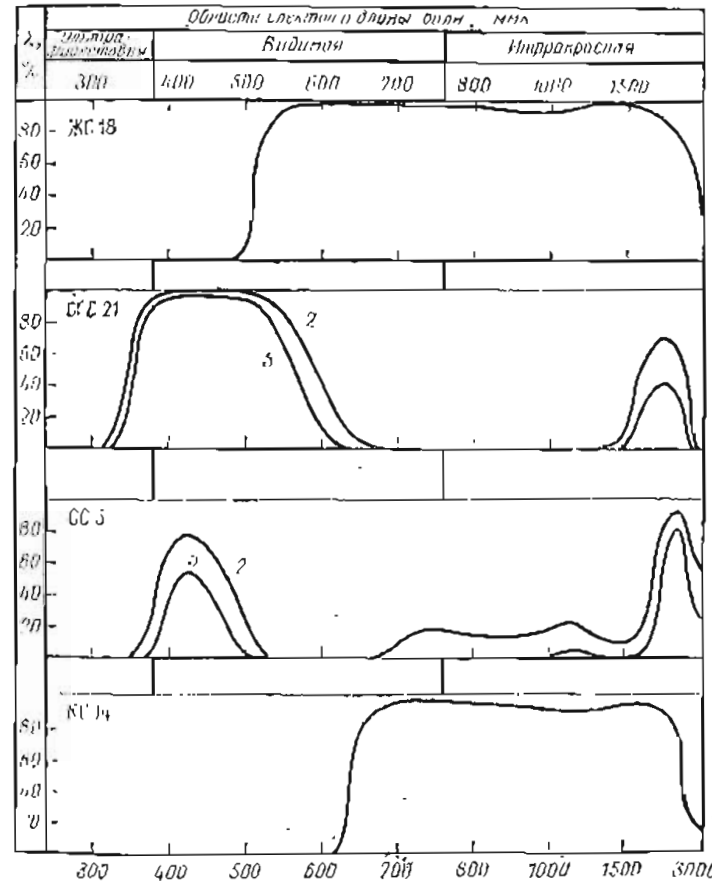


Рис. 5

30. На рис. 5 показаны кривые пропускания различных светофильтров. Определить область пропускания у сложных фильтров: а) ЖС 18+СС 5; б) ЖС 18+КС 14. Можно

ли наблюдать линию  $L_{\alpha}$  от квазара, имеющего красное смещение  $z=1$ , через светофильтр СЗС 21?

31. Требуется рассчитать спектрограф по следующим исходным данным. Питающий телескоп имеет диаметр входного отверстия  $D=100$  см, фокус  $F=15$  м. Фокусное расстояние коллиматора желательнее делать не больше 80 см. Предполагается использовать призму с преломляющим углом  $60^{\circ}$  и следующими значениями показателя преломления:

Линия	$\lambda$ ( $10^{-8}$ мкм)	$n$	Линия	$\lambda$ ( $10^{-8}$ мкм)	$n$
$H_{\alpha}$	656,3	1,64378	$H_{\beta}$	486	1,66494
$D_2$	589,0	1,65119	$H_{\gamma}$	434	1,67672
$b_1$	518,0	1,65963	$H_{\delta}$	410	1,68414

Необходимо указать размеры объектива коллиматора, ребра призмы, диаметра объектива камеры и его фокусное расстояние, с тем чтобы дисперсия при  $\lambda=4340 \text{ \AA}$  была  $50 \text{ \AA/мм}$ .

32. Определить разрешающую силу спектрографа, рассчитанного в предыдущей задаче, для  $\lambda=4340 \text{ \AA}$ .

33. Выяснить, какая доля от общего количества света будет проникать внутрь щели, имеющей нормальную ширину, если диаметр однородного турбулентного диска звезды равен  $0,5''$ ,  $1''$  и  $2''$ . Длина волны  $\lambda=5000 \text{ \AA}$ . Относительное отверстие  $F:D=15$  и диаметр главного зеркала  $D=100$  см.

34. Сколько штрихов должна иметь дифракционная решетка для того, чтобы во втором порядке можно было разделить линии  $D_1$  и  $D_2$  натрия, у которых длины волны равны соответственно:  $5895,944$  и  $5889,977 \text{ \AA}$ . Чему равно линейное расстояние между этими двумя линиями на спектрограмме в первом порядке спектра решетки с числом штрихов  $C=600 \text{ мм}^{-1}$ , если фокусное расстояние камеры равно  $80$  см?

35. Рассчитать общую длину спектра Солнца в третьем порядке в области видимого глазом излучения, т. е. от  $4000 \text{ \AA}$  до  $7000 \text{ \AA}$ , получаемого автоколлимационным спектрографом. Фокусная длина спектрографа  $23$  м. Решетка имеет  $620$  штрихов на мм. Общие размеры ее —  $126 \times 67$  мм. Чему равна ее разрешающая сила и средняя дисперсия в первом порядке?

36. Призмная камера ГАИШ имеет следующие характеристики: диаметр  $D=400$  мм, фокус  $F=160$  см. Призма

изготовлена из крона и имеет преломляющий угол  $7^{\circ}$ . Зависимость задается законом Корню с параметрами  $C=7,756$ ,  $\lambda_0=3070 \text{ \AA}$ . Какую площадь на небе покрывает пластинка  $30 \times 30$  см? Какова линейная дисперсия в фокусе камеры вблизи линии  $H_{\gamma}$ ?

37. Какую поправку к отсчету круга склонения необходимо придать для того, чтобы найти звезду, гидуруя по которой, получим спектр интересующей нас области неба? Преломляющее ребро призмы, описанной в предыдущей задаче, установлено вдоль суточной параллели в северной части объектива. Показатель преломления принять равным  $n=1,63$ .

38. На рис. 6 приведена область неба, снятая призмной камерой. Объясните, почему спектры звезд становятся более яркими к левому краю.

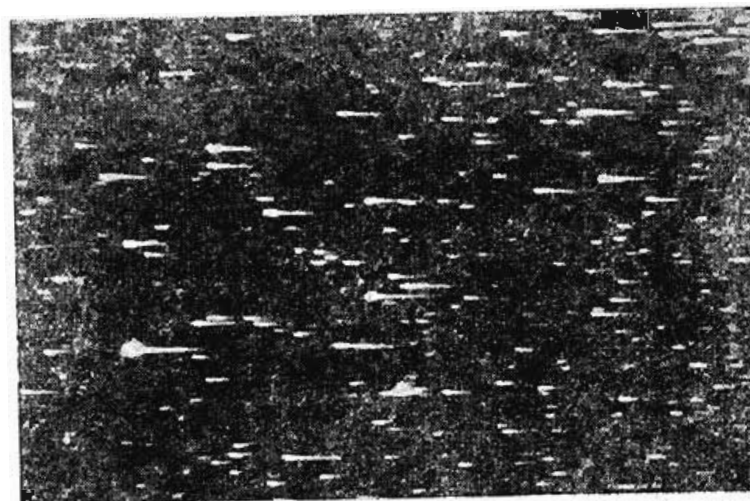


Рис. 6

39. Щель сужают до  $5 \cdot 10^{-4}$  см. С какой точностью должны быть параллельны ее края, чтобы при ее длине в  $1$  см количество света, проходящего через разные края, отличалось не более чем на  $1\%$ ?

40. Сравнить относительную ширину полосы пропускания в  $1 \text{ МГц}$  при приеме излучения нейтрального водорода  $21,2$  см и полосу пропускания  $2 \text{ \AA}$  при наблюдениях излучения водорода в линии  $H_{\alpha}$ .

41. Найдите максимальную разрешающую способность радиоинтерферометра, работающего на длине волны 1 м в земных условиях. Какова должна быть при этом точность согласования времени на телескопах?

42. Рассмотреть вращение поля зрения у телескопа с азимутальной установкой. Применить решение к задаче апертурного синтеза в радиоастрономии.

## ГЛАВА II ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

43. Насколько будет отличаться значение блеска звезды, выраженное в звездных величинах, от «правильного» значения, т. е. соответствующего закону Погсона, если в основу вычисления звездных величин положить формулу

$$m_1 - m_2 = C_1 \lg \frac{E_1}{E_2},$$

в которой  $C_1 = -1/0,398$ , как это следует из анализа звездного каталога Птолемея? Считается, что измерения ведутся от звезды нулевой величины и «правильный» блеск звезды равен: а)  $10^m$ ; б)  $15^m$ ; в)  $20^m$ .

44. Поверхностной яркостью называется величина, равная количеству энергии, излучаемой в одну секунду

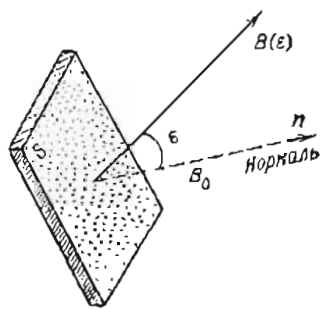


Рис.

внутри единичного телесного угла под углом  $\epsilon$  к нормали площадки, проекция которой на плоскость, перпендикулярную направлению излучения, имеет площадь равную единице. Вычислить полный поток, излучаемый площадкой  $S$ , имеющей яркость  $B(\epsilon) = B_0 \cos \epsilon$  (рис. 7).

45. Достаточно ли одного понятия интенсивности для описания поля излучения? Как связаны между собой понятия интенсивности и поверхностной яркости?

46. Почему фонари, имеющие ощутимый угловой размер, ночью кажутся одинаково яркими независимо от расстояния до них?

47. Как изменяется поле излучения в телескопе? Потери на отражение и поглощение пренебречь.

48. Определить средние поверхностные яркости Солнца и Луны за пределами земной атмосферы исходя из того, что освещенность от Солнца равна 135 000 лк, а от Луны 0,32 лк. Средний угловой диаметр Солнца равен  $32'$ , а Луны  $31,1'$ .

49. Определить поток солнечного излучения в фокусе линзы с диаметром  $D$  и фокусным расстоянием  $F$ . Эффективная температура Солнца  $T_{\odot}$ .

50. До какой температуры нагреется абсолютно черное тело сферической формы, совмещенное с изображением Солнца, даваемым объективом с относительным отверстием  $D/F = 1/m$ ?

51. Какова максимальная температура, до которой можно нагреть тело с помощью линзы или зеркала?

52. Определить освещенность от Луны в первой четверти, когда ее интегральный блеск равен  $m = -10,39^m$ .

53. Можно ли увидеть невооруженным глазом на темном фоне зайчик от зеркала в руках космонавта: а) на орбите вокруг Земли (расстояние 300 км); б) на Луне? Зеркальце считать кружком с диаметром 10 см.

Указание: учтите дифракцию и воспользуйтесь принципом Гюйгенса.

54. Сколько квадратных градусов содержится во всей сфере?

55. Скольким звездным величинам соответствуют: а) 100 децибелов; б) 20 децибелов?

56. Новая международная свеча, кандела, действующая с 1948 г., отличается от старой так, что

$$1 \text{ международная свеча} = 1,019 \text{ кандела}$$

Найти, чему равна разность их звездных величин.

57. Какова будет освещенность от ночного неба на дне фабричной трубы диаметром  $D = 1$  м и высотой  $H = 30$  м? Насколько изменится эта освещенность при прохождении в зените звезды  $\alpha$  Лирь ( $0,14^m$ )? Принять, что яркость неба совместно со слабым звездным фоном равна  $B = 2 \cdot 10^{-8}$  св.

58. В мировой литературе (начиная с Аристотеля) описываются случаи, когда люди, находясь в глубоких колодцах, видели звезды днем. Возможно ли это в принципе? Необходимо принять, что в условиях полной адаптации глаз способен различать контраст в 5%.

59. Один албанец, славившийся остротой зрения, утверждал, что он видел Венеру со дна глубокого колодца днем. Заслуживает ли доверия это утверждение?



60. Яркость дневного неба в зените равна  $1,2 \cdot 10^4$  апостильба, при заходе Солнца — 600 апостильб и в конце гражданских сумерек — 5 апостильб. Какой звездной величиной должна обладать звезда, чтобы ее можно было видеть при перечисленных выше условиях невооруженным глазом?

У к а з а н и е: считать, что на ярком фоне звезда видна, если отношение сигнала к шуму (фону) не менее единицы.

61. В излучении кометы светятся пары натрия, и приходящий от них на земную поверхность поток равен  $6,4 \cdot 10^{-11}$  эрг/(с·см<sup>2</sup>). Комета рассматривается через интерференционный светофильтр, пропускающий только излучение натрия с длиной волны  $\lambda = 5900$  Å. В этих лучах фильтр имеет прозрачность 50%. Найти освещенность зрачка при рассматривании кометы через этот светофильтр, а также видимую звездную величину кометы в этих лучах.

62. Объясните, почему дневное зрение человека более чувствительно к красным лучам, чем к синим (эффект Пуркинье).

63. Обнаружимость протяженных объектов существенным образом определяется отношением их поверхностной яркости и поверхностной яркости неба. Изменяет ли телескоп поверхностную яркость? Улучшает ли телескоп видимость туманностей?

64. Найти минимальное количество энергии, вызывающее зрительный эффект (имеется в виду излучение в оптическом диапазоне).

У к а з а н и е: предполагается, что для отчетливого зрительного впечатления от предельно слабого объекта необходимо время 0,15 с.

65. Найти, во сколько раз изменится экспозиция по сравнению с законом взаимозаместимости при переходе от экспозиции 1 с к экспозиции 2 часа, если показатель Шварцшильда  $p = 0,9; 0,8; 0,7$ .

66. Насколько увеличивается предельная звездная величина пластинки, если экспозиция возрастает в 2,512 раза? Показатель в законе Шварцшильда равен  $p$ .

67. Пользуясь рисунком 8, рассчитать, насколько менее эффективно по сравнению с оптимальными условиями работает фотопластинка при фотографировании туманности, поверхностная яркость которой равна  $10^{-7}$  сб. Светосилу камеры принять равной 1 : 2. Потерями в камере пренебречь. Решить задачу для двух видов фотоэмульсии, изопаки ко-

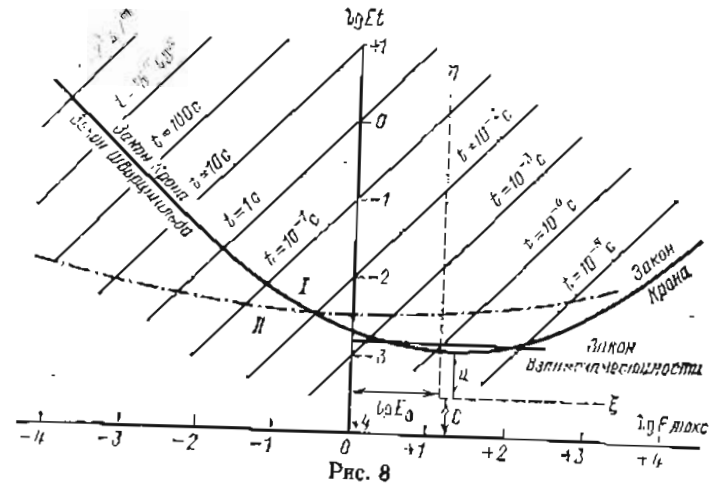


Рис. 8

торых представлены на рис. 8 соответственно сплошной и штрихпунктирной линиями.

68. Найти предельные экспозиции с 5-метровым Паломарским зеркалом ( $D : F = 1 : 3,3$ ) и 6-метровым телескопом CAO АН СССР ( $D : F = 1 : 4$ ).

69. Фотографический сюжет имеет широту 1:100 (т. е. отношение интенсивностей у его наиболее темной и наиболее светлой детали). Измерение плотностей выше 2 дает малую точность. Какую из трех фотоэмульсий следует выбрать: а)  $\gamma = 2$ , прямолинейная часть характеристики начинается со значений  $D_0 = 0,3$ ; б)  $\gamma = 1$ ,  $D_0 = 0,2$ ; в)  $\gamma = 0,7$ ,  $D_0 = 0,2$ ?

Напомним, что  $\gamma$  есть тангенс угла наклона характеристической кривой в зависимости от освещенности,  $D_0$  — плотность почернения.

70. Может ли квантовый выход приемника излучения быть больше единицы?

71. Во сколько раз необходимо увеличить время накопления при наблюдении в режиме счета фотонов, переходя к звезде на одну величину слабее и сохраняя точность наблюдений неизменной? Рассмотреть два случая:

- сигнал много больше шума;
- сигнал много меньше шума.

72. Пусть  $n_t$  — общее количество квантов в одну секунду, а  $n_*$  — число квантов от звезды. Определить, какое время накопления  $t$  необходимо, чтобы достичь относительной погрешности  $e$ .

73. Чему равен максимальный квантовый выход светочувствительного элемента, работа которого основана на внешнем фотоэффекте?

74. Вычислить величину фототока, возникающего в фотокатоде с чувствительностью 1200 мА/лм при наблюдении звезды А0, величина которой равна:  $m=7^m$ ;  $10^m$ ;  $15^m$ . Диаметр телескопа 125 см. Потери света в телескопе принять равными 15%.

75. На рис. 9 показана кривая чувствительности сурьмяно-цезиевого катода. Найти квантовый выход этого фотокатода в максимуме чувствительности ( $\lambda=3100 \text{ \AA}$ ).

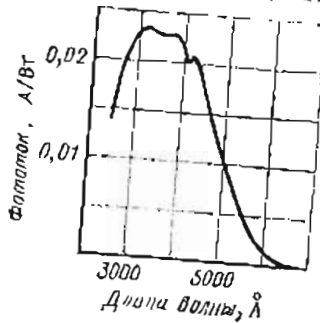


Рис. 9

76. При яркости ночного неба  $4^m$  с квадратного градуса наблюдается звезда  $22^m$  внутри диафрагмы диаметром  $3''$ . Как долго нужно копить сигнал, чтобы при имеющихся флуктуациях определить ее блеск с точностью до  $\pm 0,05^m$ ? Свет от звезды «выбивает» 5 фотоэлектронов в секунду (см. табл. 6 в Приложении III).

77. Определить фототок, даваемый селеновым фотоэлементом при освещении его светом звезды нулевой величины в фокусе метрового телескопа. Чувствительность ФЭУ принять равной  $0,5 \text{ мА/лм}$ . Потери света в телескопе принять равными 15%.

78. Рассчитать, какова будет энергетическая освещенность поверхности, обращенной к полусфере, излучающей как абсолютно черное тело при  $T=300 \text{ К}$ ;  $30 \text{ К}$ ;  $2,7 \text{ К}$ .

79. На земную поверхность от Солнца попадает  $1,45 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$ . Определить, каков должен быть диаметр входного отверстия телескопа, чтобы обнаружить излучение звезды, подобной Солнцу, с расстояния 10 пк. Приемником излучения является:

- болометр с чувствительностью  $0,1 \text{ эрг/с}$ ;
- термоэлемент с чувствительностью  $0,02 \text{ эрг/с}$ ;
- тепловой радиометр ( $0,01 \text{ эрг/с}$ ).

80. Приемник обладает шум-фактором, равным 5, и шириной полосы пропускания  $100 \text{ кГц}$ . Его записывающий аппарат имеет постоянную времени, равную 1 мин, а температура, окружающая антенну, равна  $290 \text{ К}$ . Определить предельную мощность сигнала, который можно обнаружить с приемником.

81. Чувствительность радиотелескопа с шириной полосы пропускания  $1 \text{ МГц}$  равна  $0,1 \text{ Ян}$ . Какой звездной величины (звезды типа А0) в видимом диапазоне соответствует этот поток?

82. Как известно, наша Вселенная заполнена чернотельным реликтовым излучением с температурой, равной  $2,7 \text{ К}$ . Определите мощность энергии, выделяемой на калибровочном сопротивлении при наблюдении реликтового фона в области  $\lambda=3 \text{ см}$  с полосой пропускания  $1 \text{ МГц}$ .

83. Английские астрономы Мишель Дисней и Уильям Спаркс предложили новую единицу измерения — гершель — для характеристики видимой яркости в любом спектральном диапазоне (см. Sky & Telescope, 1983, September, p. 215). Полагается, что источник обладает яркостью в один

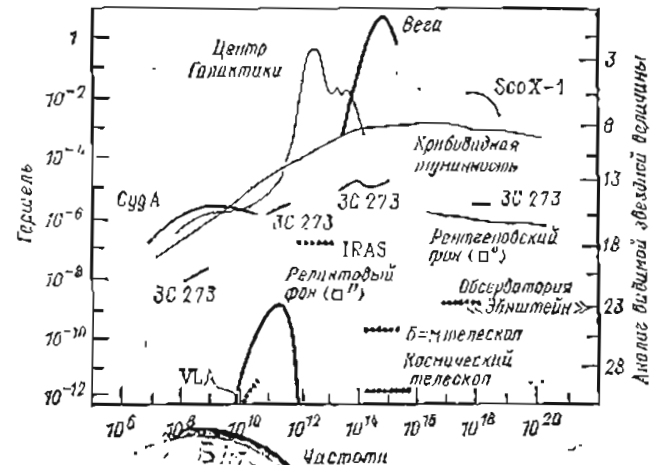


Рис. 10

гершель, если он имеет светимость внутри декады один порядок по логарифму частоты с центром на частоте  $\nu$ , равную полной светимости Солнца, будучи расположен на расстоянии 1 парсек. Поток энергии, создаваемый таким источником на Земле, численно равен  $3,198 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{с)}$ . На рис. 10 представлены данные о спектрах наиболее ярких астрономических объектов, яркость которых выражена в гертелях. Пунктирными отрезками показаны пределы чувствительности наиболее крупных инструментов. Затененная полоса соответствует оптическому диапазону. Используя рис. 10, определите светимость Веги, рентгеновского источника Sco X-1 и радиогалактики Лебедь А. Рас-

стояние до этих источников соответственно 8,1 пк, 500 пк и 300 Мпк.

84. Источник, расположенный на расстоянии 100 пк, имеет яркость  $10^{-4}$  гершеля. Чему равна светимость этого источника в этом же диапазоне?

### ГЛАВА III МЕТОДЫ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

85. Что можно сказать об особенностях спектров звезд по их обозначениям:

B2e, B0k, A4s, cA4?

86. На рис. 11 показана зависимость видимой звездной величины  $m_z$  от  $\sec z$  ( $z$  — зенитное расстояние), называемая Бугеровской прямой. Этот график был построен по данным наблюдений, проводившихся на уровне моря. Как изменился бы график (качественно), если бы наблюдения производились в горах?

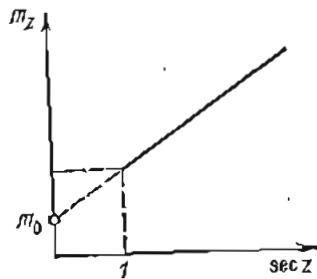


Рис. 11

87. В целях определения коэффициента прозрачности земной атмосферы фотометрически наблюдалась звезда Арктур на различных зенитных расстояниях. Ниже помещена табличка

этих наблюдений, в которой приведены:  $m_z$  — измеренная звездная величина звезды,  $z$  — зенитное расстояние,  $F(z)$  — функция воздушных масс.

$m_z$	0,30 <sup>m</sup>	0,41 <sup>m</sup>	0,48 <sup>m</sup>	0,54 <sup>m</sup>	0,64 <sup>m</sup>	0,77	0,94 <sup>m</sup>
$z$	60,0°	65,0°	68,4°	70,0°	72,8°	75,1°	77,4°
$F(z)$	1,995	2,357	2,700	2,909	3,350	3,840	4,503

Найти звездную величину Арктура в зените и вне атмосферы, а также коэффициент прозрачности  $p$ .

88. Средняя величина  $\Delta m = 0,23$  (для визуальных наблюдений) Земли в зените равна (для визуальных наблюдений). Какова оптическая толщина атмосферы?

89. В жестких рентгеновских лучах ( $h\nu \geq 7$  кэВ) поглощение в атмосфере Земли в основном определяется томсоновским рассеянием, сечение которого равно:  $\sigma_T = 6,65 \times$

$\times 10^{-26}$  см<sup>2</sup>. Определить оптическую толщину атмосферы Земли в рентгеновском диапазоне. Плотность воздуха у основания атмосферы  $\rho_0 = 10^{-3}$  см<sup>-3</sup>, высота однородной атмосферы  $H = 8$  км.

90. В теории экстинкции Лапласа атмосфера Земли предполагалась изотермичной. В более развитой теории Бемполада принимается ход температуры с высотой  $H$  в виде

$$T = T_0 - \beta H,$$

где  $\beta$  — константа. Какому физическому состоянию атмосферы соответствует этот закон?

91. Ночное небо излучает в свете линии  $\lambda = 5577 \text{ \AA}$  (кислород)  $2 \cdot 10^6$  квантов в секунду с 1 см<sup>2</sup>. Определить поверхностную яркость ночного неба в этом свете, выраженную в стильбах.

92. Рассеянный дневной свет является достаточно изотропным (в особенности в облачную погоду) и обладает высокой яркостной температурой, близкой к температуре Солнца. Если бы это излучение было равновесным, все предметы нагрелись бы до яркостной температуры, чего в действительности, конечно, нет. Объясните это.

93. Определить константу клина из наблюдений ряда звезд, блеск которых  $m$  (соответствующие отсчеты клина приведены в следующей таблице):

$m$	9,69 <sup>m</sup>	9,12 <sup>m</sup>	9,08 <sup>m</sup>	9,01 <sup>m</sup>	8,55 <sup>m</sup>	8,02 <sup>m</sup>	7,70 <sup>m</sup>
$S$	1,12	1,64	1,68	1,74	2,12	2,60	2,95

94. Степень поляризации определяется следующим образом:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  — максимальная и минимальная интенсивность излучения, получаемая при вращении поляризатора. В астрономии иногда применяют следующую характеристику:

$$\Delta m_p = 2,5 \lg (I_{\max} / I_{\min}).$$

Найти связь между  $P$  и  $\Delta m_p$ .

95. В результате измерений, проведенных разными наблюдателями, получены  $N$  оценок блеска звезды  $\Delta m_i$  по отношению к одной и той же звезде сравнения. Как вычислить среднюю величину  $\Delta m$ ?

96. Излучение черного тела характеризуется функцией Планка  $B_\lambda$ :

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left( e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}.$$

Определить общую энергию, излучаемую шарообразным абсолютно черным телом в одну секунду с  $1 \text{ см}^2$  (т. е. вывести закон Стефана — Больцмана), и длину волны, соответствующую максимуму функции  $B_\lambda$  (закон Вина).

97. Изменяются ли ответы на вопросы, поставленные в предыдущей задаче, если рассматривать функцию  $B_\nu$ , а не  $B_\lambda$ ? Если изменятся, то как?

98. Определить интенсивность излучения, соответствующую максимуму функции Планка  $B_\lambda$ .

99. Температура одной из двух одинаковых по размеру звезд в 2 раза больше, чем другой. Во сколько раз отличаются следующие характеристики их излучения:

- общая светимость;
- длина волны, соответствующая максимуму спектра;
- интенсивность излучения в максимуме спектра;
- интенсивность излучения на одной длине волны в Рэлей-Джинсовской области спектра?

100. В коротковолновом рентгеновском диапазоне электромагнитных волн, как правило, пользуются не частотой или длиной волны, а энергией кванта  $E = h\nu$  (кэВ). Для характеристики же интенсивности используют не энергию квантов, уносимую ими в одну секунду, а их число  $N(E, T)$ . Как выглядит спектр Вина в этих переменных?

101. Выведите закон смещения Вина для функции  $N(E, T)$  (см. предыдущую задачу).

102. Найдите связь между яркостной  $T_s$  и истинной  $T$  температурами в виновской области спектра. Покажите, что  $T_s < T$ , если нет явлений селективного излучения (например, флуоресценции). (Об истинной температуре см. КПА, с. 394.)

103. Некалиброванные наблюдения источника велись в Рэлей-Джинсовской области спектра. Можно ли, используя данные этих измерений, определить цветовую температуру объекта?

104. Звезда радиусом  $R$  имеет спектр черного тела с температурой  $T$ . Найдите освещенность, создаваемую звездой вблизи Земли в диапазоне длин волн  $d\lambda$  на волне  $\lambda$ . Расстояние до звезды равно  $D$ .

105. Найти погрешность определения температуры звезды, если погрешность определения колор-эквивалента равна  $\pm 0,3^m$  для температур 3000 К и 24 000 К.

106. Эффективная температура Солнца равна  $T = 5785 \text{ К}$ . Найдите значение радиометрической величины Солнца, полагая, что редукция за пределы атмосферы равна  $0,45^m$ .

107. Излучение радионисточника Лебедь А на частотах 100 МГц создает на поверхности Земли энергетическую освещенность  $1,25 \cdot 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$ . Считая, что излучение Лебеда А можно свести к излучению однородно яркого диска диаметром  $2'$ , определить его яркостную температуру на указанной частоте.

108. Определение эквивалентной ширины линии производится по спектру, полученному на фотопластинке. Ищет ли результат:

- инструментальный профиль аппаратуры;
- погрешность в определении уровня непрерывного спектра?

109\*. Почему при переходе к очень горячим объектам (например, к рентгеновским источникам) при определении эквивалентных ширины линий, видимых в спектре, необходимо учитывать непостоянство непрерывного спектра?

110. Как зависит яркостная температура радионисточника, имеющего степенной спектр:

$$F_\nu \sim \nu^{-\alpha},$$

от длины волны, на которой ведется наблюдение?

111. Чему равен размер первой зоны Френеля при покрытии звезд Луной для  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ ?

112. Каким временным разрешением должна обладать призмная и записывающая фотометрическая аппаратура, чтобы можно было обнаружить дифракционную картину при покрытии звезд Луной?

113. Наблюдение покрытия звезды 4-й величины Луной (исправленное за поглощение в атмосфере Земли) позволило определить ее угловой диаметр:  $10^{-3}$  угловых секунд. Чему равна эффективная температура звезды?

114. Чем определяется угловое разрешение следующих трех методов определения угловых размеров звезд:

- измерение с помощью интерферометра;
- метод спекл-интерферометрии;
- наблюдения покрытий звезд Луной?

115. Вследствие эффекта фон Цейпеля быстро вращающиеся массивные звезды (класса Ве) должны иметь темную полосу вдоль экватора (см. задачу 228) и фактически могут выглядеть двойными. Ближайшая из таких звезд,  $\gamma \text{ Cas}$ , имеет видимую звездную величину  $m = 2,0$ , а показатель цвета  $B - V = -0,17^m$ . Какой базой должен обладать

интерферометр, чтобы можно было обнаружить эффект Фейнмана у этой звезды? Можно ли воспользоваться покрытием Луной или астероидом?

116. При особенно точных наблюдениях лучевых скоростей требуется учитывать поправку за движение Земли около центра тяжести системы Земля — Луна. Средняя скорость этого движения равна 0,0124 км/с. Сравните эту поправку с релятивистской поправкой (поперечный эффект Доплера) при измерении скоростей:

а) 30 км/с;

б) 300 км/с.

117. Призмная камера имеет фокусную длину 210 см. Преломляющий угол равен  $8^\circ$ . Полагая, что температурный коэффициент преломления стекла равен

$$\frac{dn}{dT} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1},$$

определить, насколько сместится линия  $H_\gamma$  при изменении температуры призмы на  $2^\circ$ . Смещение выразить в линейной мере, в шкале длин волн ( $\text{\AA}$ ) и в лучевых скоростях (км/с).

118. Эффект Доплера применим к любому периодическому процессу. Для пульсара в двойной системе таким процессом являются пульсации его излучения, обусловленные вращением нейтронной звезды. Метод измерения сдвигов в наблюдаемом периоде пульсара является в настоящее время самым точным методом измерения лучевых скоростей (в действительности точность настолько высока, что позволяет определять даже релятивистские поправки к классической формуле Доплера). Оцените точность измерения лучевой скорости при наблюдении радиопулсара PSR 1513+16 (период которого равен 0,06 с), если погрешность измерения периода составляет  $\Delta P/P \approx 10^{-10}$ .

119. Во сколько раз запуск геофизической ракеты на высоту  $H=300$  км энергетически выгоднее, чем запуск спутника такой же массы с научной аппаратурой на орбиту той же высоты?

120. Куда в основном уходит химическая энергия, выделяющаяся при сгорании ракетного топлива при выводе на орбиту спутника Земли?

121. В гамма-диапазоне направленность детекторов крайне низка. Однако при наблюдении гамма-всплесков, которые характеризуются очень крутым фронтом нарастания вспышки (иногда менее миллисекунды), локализацию источника можно осуществить, измерив время прихода фронта вспышки на разные космические аппараты. Какое ми-

нимальное количество космических аппаратов необходимо для однозначной локализации источника гамма-всплесков?

122. Рентгеновский телескоп, установленный на космической обсерватории «Эйнштейн», представляет собой сегмент параболоида с эффективной площадью  $S \approx 100 \text{ см}^2$  для пропорционального счетчика в диапазоне 0,15—4,0 кэВ. В этом диапазоне фон неба (обусловленный далекими источниками) равен  $3 \cdot 10^{-3} \text{ имп} \cdot \text{с}^{-1} / \square^\circ$ . Какое время необходимо копировать сигнал, чтобы обнаружить рентгеновский источник со светимостью, равной светимости Солнца, на расстоянии 1 кпк? Угловое разрешение счетчика  $1'$ , а квантовый выход 10%.

123. Космический телескоп с апертурой 2,4 м позволит наблюдать в широком диапазоне длин волн. С какой точностью необходимо поддерживать ориентировку телескопа для наблюдений в диапазоне от 1200 до 7000  $\text{\AA}$ ?

ГЛАВА IV  
СОЛНЦЕ

124. Полная светимость Солнца равна

$$L_{\odot} = 3,84 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с,}$$

а эффективная температура — 5785 К. Определить радиус Солнца.

125. Известно, что в годы максимума солнечной активности общая площадь пятен на его поверхности достигает нескольких процентов площади видимого диска и в то же время «солнечная постоянная» остается неизменной с точностью до 1% звездной величины. Изменится ли существенно блеск Солнца, если оно наполовину покроеся пятнами? Относительная яркость пятна составляет 0,8 от яркости невозмущенной поверхности фотосферы.

126. Поверхность Солнца вращается не в соответствии с законом вращения твердого тела: угловая скорость зависит от широты  $\varphi$  приблизительно по следующему закону:

$$\omega = (14,52^{\circ} - 2,6^{\circ} \sin^2 \varphi) \text{ сут}^{-1}.$$

Определить разность длин волн линии натрия  $D_1$  на западном и восточном крае Солнца на широте  $\varphi = 60^{\circ}$ . В каком порядке дифракционного спектра следует наблюдать эту разность, чтобы линейно она достигла 0,1 мм? Фокусное расстояние спектрографа равно 5 м, решетка имеет 600 штрихов на 1 мм.

127. Оцените величину сжатия Солнца, обусловленного его вращением. Воспользуйтесь данными предыдущей задачи, а ответ дайте для разности экваториального и полярного радиусов. Каково отличие радиусов в угловой мере, видимое с Земли?

Указание: считать массу Солнца сосредоточенной в центре.

128. Формула Саха может быть записана в виде

$$\frac{n^+}{n} P_e = f(T),$$

где  $n^+$  и  $n$  — плотность числа ионизованных и нейтральных атомов,  $P_e$  — электронное давление,  $f(T)$  — некоторая функция температуры. Выведите это выражение.

129. Преобразуйте формулу Саха к логарифмическому виду, удобному для вычислений.

130. Определить отношение числа ионизованных атомов водорода к числу нейтральных атомов при температуре  $T = 8000$  К и электронном давлении  $P_e = 2000$  дин/см<sup>2</sup> (характерные физические условия на глубине 400 км под фотосферой).

131. Известно, что главный вклад в непрерывное поглощение в видимой области спектра фотосферы Солнца дает отрицательный ион водорода  $H^-$ , потенциал ионизации которого равен 0,75 эВ. Вычислить отношение  $n_{H^-}/n_H$  на глубине, соответствующей оптической толщине  $\tau = 1$ , где электронное давление равно  $P_e = 69$  дин/см<sup>2</sup>, а температура  $T = 6460$  К. Сравните число ионов  $H^-$  с числом атомов водорода во втором возбужденном состоянии. Учтите, что статистический вес для водорода равен 2, а для отрицательного иона водорода равен 1.

132. Вычислить наименее вероятную скорость атомов железа и атомов водорода в солнечной короне ( $T = 10^6$  К). Сравнить эту скорость с параболической скоростью для Солнца.

133. Всегда ли степень ионизации падает при увеличении электронного давления?

134. Куда уходит энергия квантов, поглощенных фраунгоферовыми линиями на Солнце?

135. На рис. 12 показан спектр Солнца в видимой области. Почему в этой области солнечного спектра наиболее мощными линиями являются линии H и K Ca, а не водорода ( $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$  и т. д.), количество которого на Солнце несравненно выше?

136. Объясните, почему яркостная температура Солнца, определенная по его тепловому радиоизлучению, зависит от длины волны, на которой производится измерение, а именно: чем больше длина волны, тем выше температура?

137. Будет ли в состоянии магнитное поле напряженностью  $H = 10$  Э удерживать в протуберанце турбулентное движение, происходящее со скоростью  $v_t = 15$  км/с? Характерная величина плотности вещества в протуберанце  $\rho = 2 \cdot 10^{-14}$  г/см<sup>3</sup>.



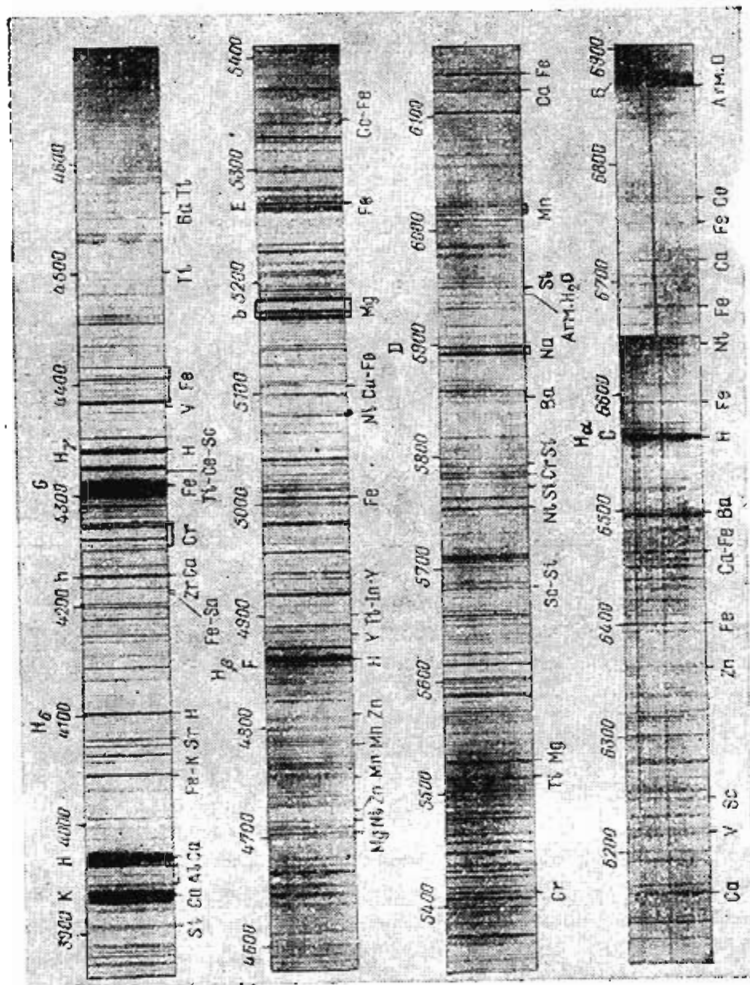


Рис. 13

138. На снимках Солнца в лучах  $H_\alpha$  (см. рис. 13) протуберанцы, проектирующиеся на диск, выглядят темными. В то же время известно, что температура плазмы внутри

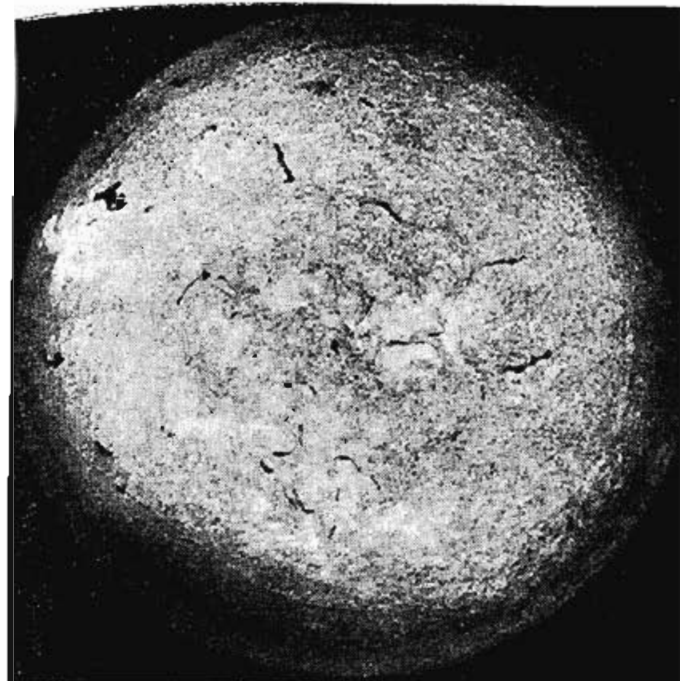


Рис. 13

протуберанца порядка  $10\,000\text{ K}$ , т. е. значительно выше температуры фотосферы. Объясните это кажущееся противоречие.

139. Показать, что полная интенсивность линии, определяемой доплеровским профилем, равна

$$I = \frac{\lambda_0 v_m \sqrt{\pi}}{c} I(\lambda_0),$$

где  $\lambda_0$  — длина волны центра линии,  $v_m$  — наивероятнейшая скорость частиц,  $c$  — скорость света,  $I(\lambda_0)$  — интенсивность в центре линии.

140. Найти полуширину линии  $\text{Fe XIV } \lambda 5303 \text{ \AA}$  солнечной короны при температуре  $1,5 \cdot 10^6 \text{ K}$ .

141. Почему в оптическом диапазоне наблюдается потемнение к краю диска Солнца, а в рентгеновском, наоборот, усиление яркости (рис. 14)?

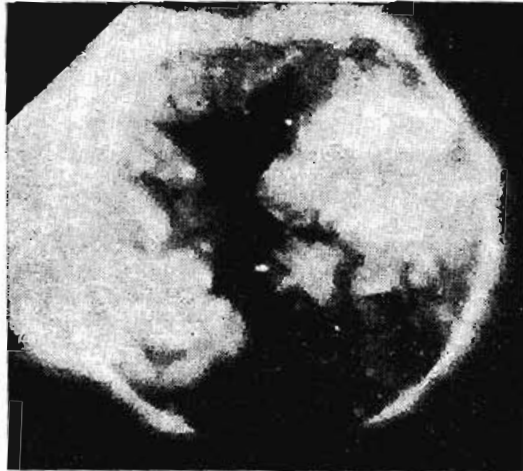


Рис. 14

142. Какова кинетическая энергия протонов и электронов, достигающих Земли спустя 26 часов после вспышки на Солнце?

143. Поток частиц солнечного ветра вблизи Земли равен  $q = 2 \cdot 10^8$  частиц/(см<sup>2</sup>·с). Найдите темп истечения вещества Солнца в единицах  $M_{\odot}$ /год и оцените количество кинетической энергии, уносимой солнечным ветром в одну секунду.

144. Можно ли зафиксировать падение железного метеорита массой в 1 т на поверхность Солнца?

145. Распределение частиц по скоростям в атмосфере Солнца близко к максвелловскому. При этом всегда есть частицы, скорость которых превышает параболическую (или скорость убегания). Нельзя ли именно этим объяснить явление солнечного ветра?

146\*. Плоскопараллельный поток заряженных частиц с массой  $m$  и скоростью  $u$  набегаёт на слой магнитного поля, силовые линии которого наклонены под углом  $\psi$  к направлению движения (см. рис. 15). Концентрация частиц в потоке равна  $n$ . Определить динамическое давление, создаваемое потоком на границе плазма — поле. Считать, что тол-

щина магнитного слоя много больше ларморовского радиуса частиц.

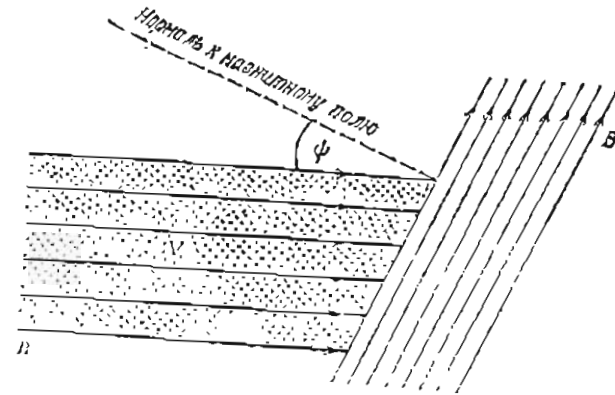


Рис. 15

147\*. Магнитное поле Земли представляет собой диполь с магнитным полем у полюсов  $B_0 = 0,3$  Э. Характерный размер  $R_m$  земной магнитосферы определяется равенством давлений магнитного поля и набегающего потока плазмы. Выразить эту величину через темп истечения Солнца  $\dot{M}$ , скорость солнечного ветра  $V$ , большую полуось земной орбиты  $a$  и напряженность магнитного поля на поверхности Земли. Ответ представить в единицах земного радиуса. Темп истечения взять из задачи 143, а скорость ветра принять равной  $V = 300$  км/с.

148. Многие аномальные явления, протекающие в атмосфере Земли, обусловлены корпускулярными потоками от Солнца, интенсивность которых резко возрастает во время солнечных вспышек. Почему, как правило, эти аномальные явления возникают после вспышек, расположенных на западном краю Солнца?

149. Максимум солнечного излучения приходится на длину волны  $\lambda_{\max} = 4600$  Å. Вычислить температуру Солнца по закону Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{C}{T_B},$$

где  $C = 0,29$ , и сравнить ее с эффективной температурой. С чем связано полученное отличие?

150. Как известно, в магнитном поле спектральные линии расщепляются в соответствии с законом (эффект Зеемана)  $\Delta\lambda = cH g \lambda^2$ , где  $\lambda$  — длина волны линии в отсутствие



магнитного поля,  $H$  — напряженность магнитного поля, постоянная  $c=4,7 \times 10^{-5}$ , если  $\Delta\lambda$  и  $\lambda$  измеряются в ангстремах, а напряженность — в эрстедах. Определить напряженность магнитного поля в пятне, если наблюдения расщепленной линии железа  $\lambda 5250,2 \text{ \AA}$  ( $g\lambda^2=83$ ) дали  $\Delta\lambda=3,9 \cdot 10^{-2}$ . Какой скорости соответствовал бы сдвиг величиной  $\Delta\lambda$ , обусловленный доплеровским смещением?

## ГЛАВА V ЗВЕЗДНЫЕ АТМОСФЕРЫ

151. Температура фотосферы карлика равна  $T_* = 8400 \text{ K}$ , а электронное давление  $\lg p_e = 2,36$ . Какова должна быть температура гиганта  $T_g$ , чтобы элементы с потенциалами ионизации  $\chi = 4 \text{ эВ}$  и  $\chi = 8 \text{ эВ}$  обладали той же степенью ионизации? Электронное давление в атмосфере гиганта равно  $\lg p_e = 2,00$ .

152. Звезды гигант и карлик обладают одинаковым спектральным классом. У какой из них выше температура?

153. Вычислить высоту однородной атмосферы для водорода на белом карлике массой в одну массу Солнца и радиусом  $R = 0,01 R_\odot$ . Температуру атмосферы принять равной  $10^4 \text{ K}$ .

154. Чем объясняется отличие в положениях звезд-субкарликов и звезд главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга — Рассела?



Рис. 16

155. На рис. 16 показан участок спектрограммы звезды. Определить, вызвано ли расширение тепловым движением или вращением звезды?

156. Каковы будут преимущества ионизации у гиганта по сравнению с белым карликом, если при обозначениях задачи 151  $T_* = 8400 \text{ K}$  и  $\lg p_e = 2,36$ , а для гиганта  $T_g = 7600 \text{ K}$  и  $\lg p_e = 1,80$ . Потенциал ионизации берется для трех случаев: 4, 8 и 12 эВ.

157. Как изменится положение звезд на диаграмме пвевт — видимая величина для шарового скопления, если:

а) расстояние до скопления увеличить в десять раз;

б) между скоплением и нами поместить облако пыли, для которого  $A_V = 5$ ?

158. Как влияет эффект потемнения к краю на диске звезды на расширение спектральных линий, обусловленное ее вращением?

159. У какой звезды — G8 III или G7 V — радиус больше?

160. Почему мы не ожидаем, что линии нейтрального железа будут заметны в спектре звезды класса B0?

161. Звезда класса B0 V наблюдается в созвездии Гончих Псов и имеет видимую звездную величину  $9,8^m$ . На каком расстоянии она находится?

162. Анализ спектра звезды позволил определить эффективную температуру и ускорение силы тяжести на ее поверхности. Из наблюдений известна видимая звездная величина  $m$  и параллакс звезды  $\pi''$ . Найдите способ определения массы звезды.

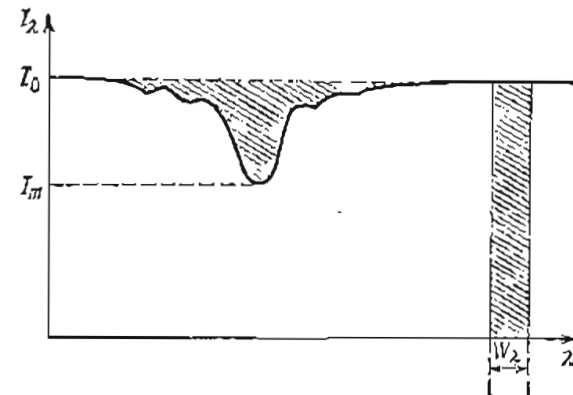


Рис. 17

163. Эквивалентной шириной линии называется ширина (в ангстремах) прямоугольника, площадь которого численно равна энергии непрерывного спектра, поглощенной всей линией (см. рис. 17), а высота — интенсивности непрерыв-

ного спектра  $I_0$ . Пусть глубина линии равна  $I_0 - I$ . Определить эквивалентную ширину линии, имеющей:

- треугольный профиль с основанием  $\Delta\lambda$ ;
- параболический профиль с шириной у основания  $\Delta\lambda$ .

164. На диаграмме Герцшпрунга — Рассела, построенной по данным наблюдений, главная последовательность выглядит не в виде тонкой нити, а в виде размытой полосы. С чем это связано?

165. Что представляет собой диаграмма Герцшпрунга — Рассела: полосу, вдоль которой эволюционируют звезды, или геометрическое место точек, в которых звезды проводят большую часть времени?

166. Вывести закон гравитационного красного смещения для квантов света, излучаемых с поверхности звезды массой  $M$  и радиусом  $R$ . Частота излученного кванта  $\nu_0$ , а частота того же кванта, измеренная удаленным наблюдателем,  $\nu$ .

У к а з а н и е: задачу решать в так называемом пост-ньютоновском приближении, в котором гравитационный потенциал принимается чисто ньютоновским, а фотону приписывается масса  $m_\nu = h\nu/c^2$ .

167. Как известно, лучевые скорости звезд определяются по эффекту Доплера. Массовые измерения лучевых скоростей белых карликов показывают систематическое удаление их со скоростью 58 км/с (Вейдеман, 1975). Что можно сказать о средней массе  $M$  белых карликов, если принять их средний радиус равным 7700 км?

168. Вычислить высоту однородной атмосферы нейтронной звезды, масса которой равна  $M = 1,5 M_\odot$ , а радиус  $R = 10$  км. Атмосферу считать состоящей полностью из железа.

169. На рис. 18 приведен спектр рентгеновского пульсара, на котором видна линия поглощения железа Fe XVII с потенциалом ионизации 6,7 кэВ. Может ли эта линия формироваться на поверхности нейтронной звезды, параметры которой равны: радиус 10 км, масса  $M = 1,5 M_\odot$ ?

170. Рентгеновские пульсары представляют собой аккрецирующие нейтронные звезды, обладающие мощными магнитными полями. Мощное магнитное поле приводит к возникновению циклотронных спектральных линий на частоте, равной гирочастоте электрона:

$$\nu = \frac{eH}{2\pi m_e c}$$

На рис. 19 показан спектр рентгеновского пульсара Геркулес X-1 (Триумпер и др., 1978). В области 30—50 кэВ

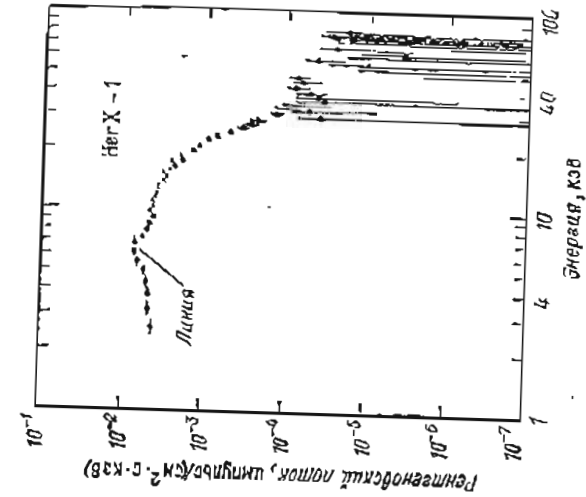


Рис. 18

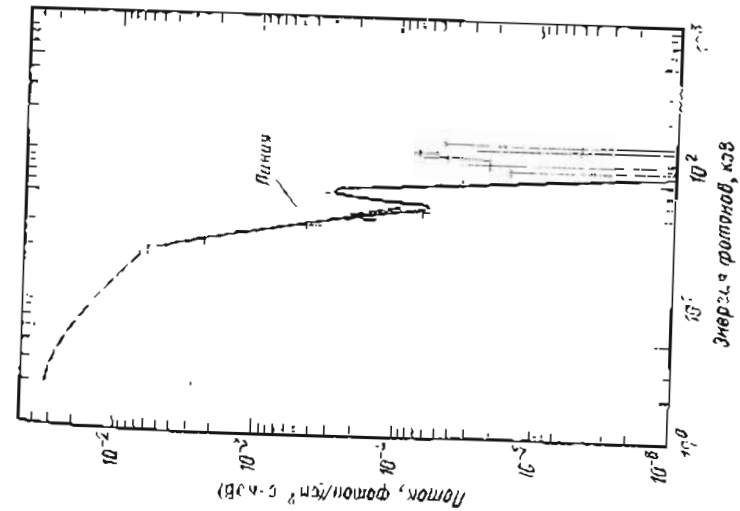


Рис. 19

наблюдается спектральная деталь. Какова должна быть напряженность магнитного поля, если принять, что эта деталь является циклотронной линией? Насколько меняет полученную оценку гравитационное красное смещение, если масса и радиус нейтронной звезды равны соответственно  $1,7 M_{\odot}$  и  $10 \text{ км}$ ?

ГЛАВА VI  
ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ И МАССЫ ЗВЕЗД

171. Угловое расстояние между компонентами визуальной двойной пары равно  $\rho'' = 21,5''$ , а параллакс  $\pi'' = 0,02'$ . Является ли пара физически двойной системой, если известно, что разность собственных движений компонент равна  $\Delta\mu = 0,01''$  в год?

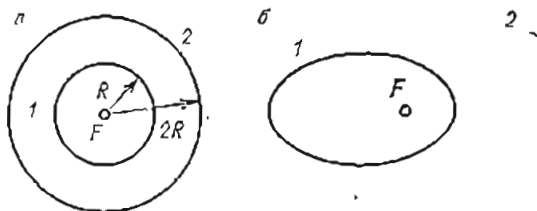


Рис. 20

172. На рис. 20а и 20б показаны абсолютные орбиты компонент двойной системы. Каково отношение масс звезд  $M_1/M_2$ , соответствующее рис. 20а? Покажите положение звезды 1 на рис. 20б.

173. На рис. 21 показана орбита звезды 1 и положение звезды 2 (строго в центре эллипса). Какой эллипс изображен — истинный или видимый?

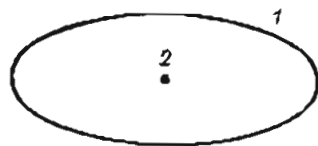


Рис. 21

174. Сколько величин определяют полностью орбиту звезды в двойной системе? Перечислите интегралы движения.

175. На рис. 22 показана кривая лучевой скорости одной из звезд пары. Как выглядит (качественно) кривая лучевой скорости второй звезды?

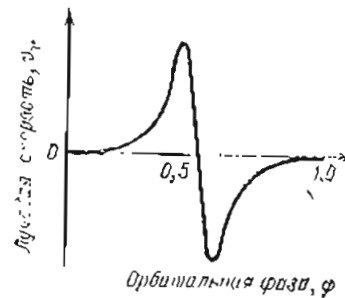


Рис. 22

176. Фотометрические наблюдения позволили построить интегральную кривую блеска двойной системы, на которой оказалось два минимума (рис. 23). Чему равно отношение эффективных температур звезд, если первичный минимум в два раза глубже вторичного?

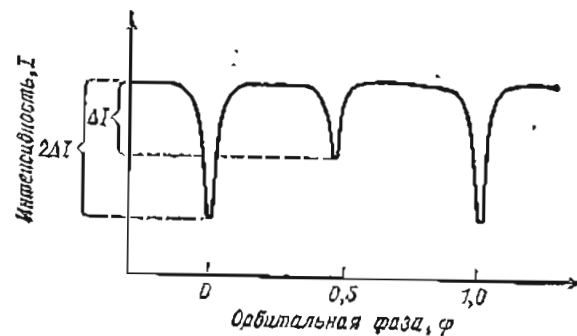


Рис. 23

Указание: считать затмение полным.

177. На кривой блеска вторичный минимум находится на фазе 0,5 (рис. 23). Что можно сказать об элементах орбиты двойной системы?

178\*. Массы компонент двойной системы равны соответственно  $M_1$  и  $M_2$ , а частота орбитального вращения  $\Omega$ . Запишите закон сохранения энергии для пробной частицы, двигающейся в поле тяготения двойной системы, в плоскости орбит звезд. Систему координат выбрать с началом в

центре масс двойной системы и жестко вращающуюся орбитальным периодом.

179\*. Составьте уравнение для определения положения точки Лагранжа  $L_1$  в двойной системе. Массы компонент  $M_1$  и  $M_2$ , а большая полуось равна  $a$ . Зависит ли расстояние точки  $L_1$  до компонент системы, выраженное в единицах большой полуоси, от абсолютных значений масс компонент?

У к а з а н и е: в точке Лагранжа равнодействующая сил равна нулю.

180. Относительные размеры шаровых компонент двойной звездной системы равны  $r_A$  и  $r_B$ . Выведите условие для величины угла наклона орбиты  $i$ , при котором систем является затменной.

181. Систему 32 Волос Вероники (32 Comae) образуют две звезды класса F5 с величинами  $m_1 = m_2 = 5,22^m$ . Наклонение орбиты принимается равным  $90^\circ$ . Фактически оно отличается от  $90^\circ$ , так как затмения в этой системе не наблюдаются. Найти наименьшее значение угла  $90^\circ - i$  исходя из того, что большая полуось орбиты в этой системе равна  $0,66$  парallax  $0,057''$ , а спектры звезд F5 V. Для уточнения полученных результатов учесть дополнительно, что орбитальной пары имеет эксцентриситет  $e = 0,37$ , а линия апси приблизительно направлена на Землю. Найти также, как долго длилось бы затмение, если бы точно выполнялось равенство  $i = 90^\circ$ . Орбитальный период двойной системы равен 26 годам.

182. Во сколько раз масса одной из компонент  $M_A$  больше значения функции масс в средней спектрально-двойной системе, у которой можно считать  $M_B/M_A = 0,7$ , а угол наклона орбиты  $i = 60^\circ$ ? На что может указывать чрезмерно большое (например, 1—3) или чрезмерно малое (например, 0,002) значение функции масс?

183. Подсчитайте отношение масс компонент двойной системы, если известно, что разность их видимых величин равна  $\Delta m$ . Считать, что зависимость «масса — светимость» имеет вид

$$L = kM^{2+p},$$

где  $k$  и  $p$  — некоторые постоянные.

184. Система  $\zeta$  Возничего ( $\zeta$  Aurigae) состоит из гиганта класса K3—K4 I и нормальной горячей звезды B8. Диаметры компонент, определенные из продолжительности затмений, оказались равны 190 и 7 солнечных радиусов

Какова может быть глубина затмений в системе  $\zeta$  Возничего при прохождении компоненты B8 перед звездой-гигантом в визуальных, фотографических и ультрафиолетовых лучах? Известно, что при затмении звезды B8 глубина затмений равна  $\Delta m_1 = 0,2^m$  в визуальной области,  $\Delta m_1 = 0,7^m$  по фотографическим пластинкам и  $\Delta m_1 = 2,2^m$  в ультрафиолетовой области спектра.

185. Рассчитайте силу тяжести в атмосфере гиганта спектрального класса K3, радиус которого равен  $R = 190 R_\odot$ . Найдите высоту однородной атмосферы для распространенных металлов.

У к а з а н и е: пренебречь возможными турбулентными движениями.

186\*. Одной из компонент двойной системы является рентгеновский пульсар (источник строго периодического рентгеновского излучения) с периодом  $P = 100$  с. Эффект Доплера, вызванный орбитальным движением пульсара, приводит к периодическому изменению моментов прихода рентгеновских импульсов, что позволяет измерять кривую лучевых скоростей пульсара. Насколько изменяется наблюдаемый период пульсара, если второй компонентой является массивная звезда с массой  $M = 20 M_\odot$ , а период двойной системы равен 20 дням. Массу пульсара принять равной  $1,5 M_\odot$ , эксцентриситет — равным нулю, а наклонение орбиты — равным  $90^\circ$ .

187. Можно ли по наблюдению моментов прихода импульсов излучения от рентгеновского пульсара определить гамма-скорость двойной системы (скорость движения центра масс двойной)?

188. Как уже упоминалось (см. задачу 186), при наблюдении рентгеновских пульсаров в двойной системе из-за эффекта Доплера меняется принимаемый период пульсара. Однако наблюдатели реально измеряют не период, а так называемую временную задержку, которая представляет собой разность между наблюдаемым моментом прихода импульса и вычисленным в предположении, что пульсар не движется. На рис. 24 представлен образец зависимости временной задержки, наблюдаемой у пульсара в Малом Магеллановом Облаке (SMC X-1). Период двойной системы равен 3,892 суток, а период вращения пульсара 0,71 с. Используя график, определите проекцию большой полуоси двойной системы и ее функцию масс. Так как в этой системе наблюдаются рентгеновские затмения, то удастся оценить угол наклона орбиты  $i = 70^\circ$ . Оцените массу оптической звезды. Массу нейтронной звезды положите равной  $1,5 M_\odot$ .

189. В массивных двойных системах, состоящих из сверхгиганта с массой порядка  $15-20 M_{\odot}$  и светимостью  $L_0 \approx 10^{38-39}$  эрг/с, и релятивистской звезды, излучающей в рентгеновском диапазоне (светимость  $L_X$ ), как правило, выполняется соотношение  $L_0/L_X \gg 1$ . В силу малых размеров и относительно малой светимости релятивистской звезды в таких системах затмения крайне слабы, а эффект отражения

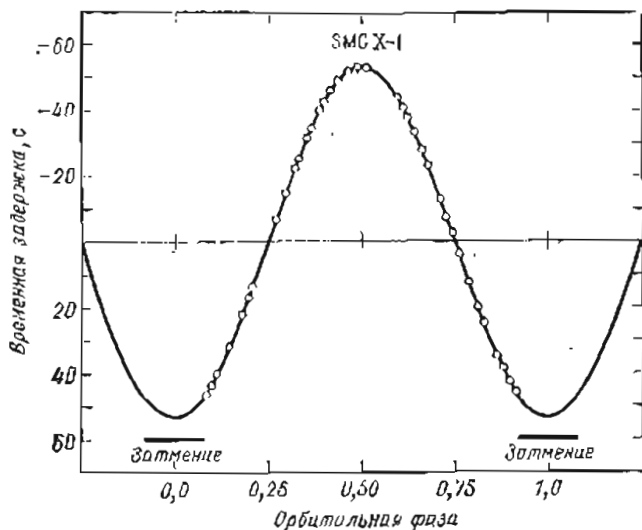


Рис. 24

практически не наблюдаем (сравните с условием следующей задачи). Однако в таких системах наличие релятивистской звезды может быть обнаружено фотометрически из-за эффекта эллипсоидальности (фотометрическая переменность обусловлена искажением формы нормальной звезды под действием приливной силы со стороны релятивистского компаньона (см. рис. 25)). Изобразите качественно кривую блеска такой системы. На каких фазах орбиты систем имеет максимальный блеск?

190. В маломассивных рентгеновских двойных системах, как правило, светимость оптической компоненты  $L_0$  гораздо меньше рентгеновской светимости вырожденной звезд  $L_X$ . Поэтому даже малая часть всего рентгеновского излучения, попадающая на оптическую компоненту, вызывает сильный разогрев ее поверхности (см. рис. 26). Это приводит к фотометрической переменности блеска двойной системы

(так называемый эффект отражения). Нарисуйте качественную кривую блеска такой системы.  
191. Оцените амплитуду эффекта отражения в звездных величинах, если известна светимость компактной звезды

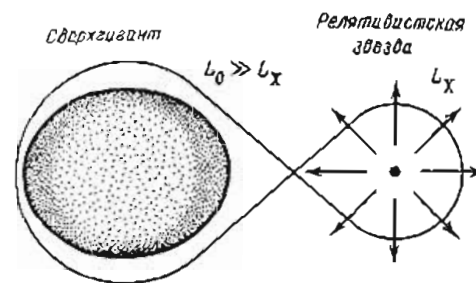


Рис. 25

$L_X$ , светимость нормальной звезды  $L_0$ , большая полуось двойной системы  $a$  и радиус нормальной звезды  $R_0$ . Числен-

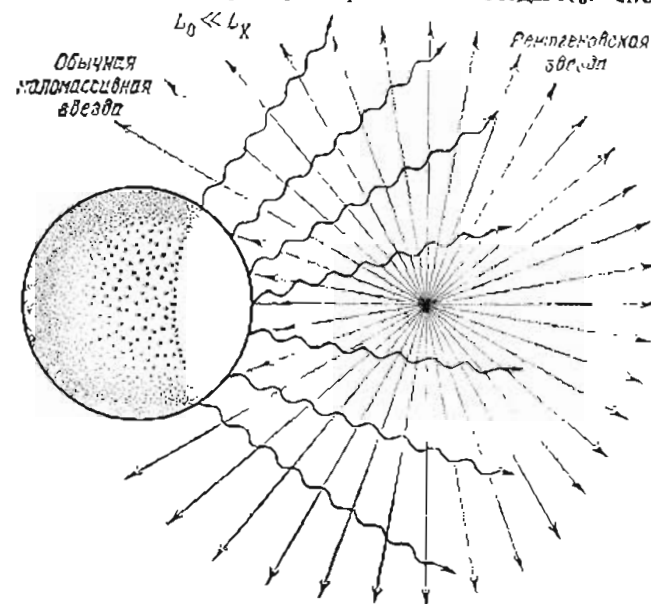


Рис. 26

ную оценку сделать для рентгеновской двойной системы  $\text{IZ Her} = \text{Her X-1}$ , в которой  $L_X/L_0 = 100$ ,  $R_0 = 3 \cdot 10^{11}$  см,  $R_X = 6 \cdot 10^{11}$  см.

192. Рентгеновский источник Cyg X-1 является вероятным кандидатом в черные дыры. Этот источник входит в массивную двойную систему, являясь спутником нормальной звезды V 1357 Cyg. На рис. 27 приведена кривая блеска двойной системы в фильтрах U, B, V. Чем обусловлено изменение блеска системы — эффектом отражения или эффектом эллипсоидальности?

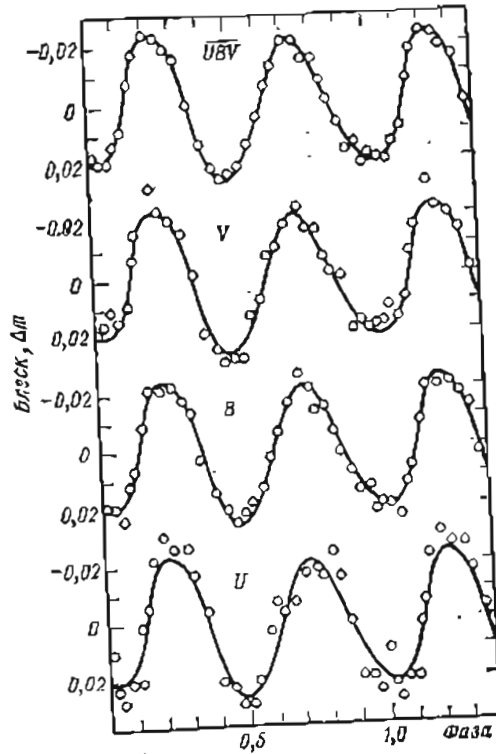


Рис. 27

193\*. Как известно, эффект абберации состоит в изменении направления распространения света, вызванном относительным движением приемника и излучателя. В нерелятивистском приближении угол поворота  $\Delta\alpha$  определяется следующим образом:

$$\Delta\alpha = \frac{v_t}{c} \approx 3,4' \frac{v_t}{300 \text{ км/с}}$$

где  $v_t$  — тангенциальная составляющая относительной скорости движения. В тесных двойных системах орбитальная скорость движения достигает нескольких сотен километров в секунду, а угол поворота световых лучей составляет несколько угловых минут. Казалось бы, что изображения звезд в таких системах должны периодически смещаться по небу на несколько угловых минут. В действительности это не так. Почему?

194. Влияет ли эффект абберации на время прихода импульса от пульсара в двойной системе?

## ГЛАВА VII

### ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД

195. Выделим внутри звезды элементарный шаровой сектор (рис. 28) с раствором телесного угла  $d\Omega$ . Найти равнодействующую сил давления  $dF$ , приложенную к этому объему.

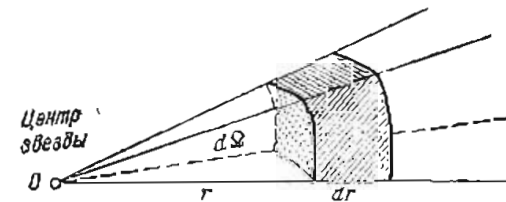


Рис. 28

196. Пусть  $X$  — масса водорода, а  $Y$  — масса гелия в одном грамме звездного вещества. Определить среднюю молекулярную массу полностью ионизованной смеси. Чему равна молекулярная масса полностью ионизованного гелия?

197. Определить степень ионизации водорода в центре ядра, используя формулу Саха. Температуру принять двой  $T = 1,5 \cdot 10^7 \text{ К}$ , а плотность  $\rho = 100 \text{ г/см}^3$ . Как согласуется полученный результат с часто встречающимся утверждением, что в центре Солнца водород полностью ионизован?

198. Если бы внутри звезды исчезло давление газа, она ждалась бы за некоторое время  $t$ , (так называемое гидродинамическое время). Найдите гидродинамическое время для Солнца и сравните его с характерным тепловым временем.

199\*. Покажите, что для изэнтропных звезд сумма энтропии  $H$  и гравитационного потенциала  $\Phi$  не зависит от радиуса:

$$H + \Phi = \text{const.}$$

200\*. Покажите, что у изэнтропной звезды, находящейся в гидростатическом равновесии, полная работа при перестановке двух элементов равной массы равна нулю.

201. В центре Солнца температура составляет примерно 15 миллионов кельвинов ( $\sim 1,5$  кэВ), а потенциальный барьер (рис. 29), который необходимо преодолеть двум протонам, чтобы вступить в термоядерную реакцию, гораздо

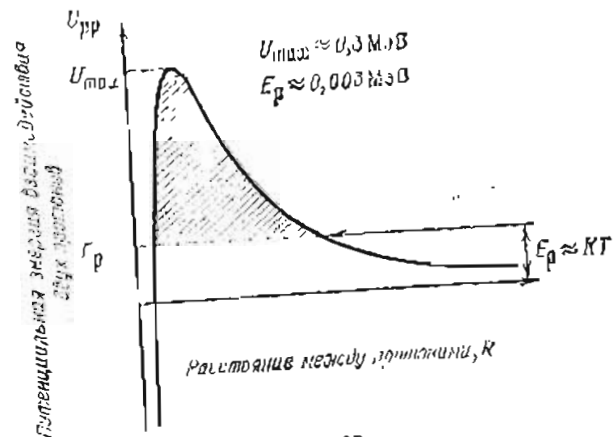


рис. 29

выше:  $\sim 0,3$  МэВ. Почему все-таки идут термоядерные реакции?

202. Вывести приближенное условие квантового вырождения электронов, используя то обстоятельство, что вырождение начинается с той плотности и температуры при которых формально на одну квантовую ячейку приходится более одной частицы.

203. Проверьте применимость модели идеального газа к центру Солнца. Проверьте также условие вырождения электронного газа для земных условий: плотность  $\rho = 5,52$  г/см<sup>3</sup> и температура  $T = 300$  К. Входит ли давление электронного газа в уравнение равновесия земной коры?

204. Пусть звезда колеблется вблизи равновесного значения радиуса  $R$ , причем  $\Delta R \ll R$ . Чему равно (приближенно) отношение энергии колебаний к полной гравитационной (или тепловой) энергии звезды?

205. Оцените вклад лучистого давления в уравнение гидростатического равновесия Солнца.

206\*. Показать, что лучистый градиент температуры в звезде определяется выражением:

$$\frac{dT}{dr} = - \frac{3\kappa\rho}{16\pi^3acT^3} L_r,$$

где  $\kappa$  — коэффициент поглощения,  $\rho$  — плотность газа,  $L_r$  — светимость звезды.

207. Каково должно быть характерное время сжатия Солнца для того, чтобы поддерживалась его наблюдаемая светимость?

208. Предельная светимость звезды (эддингтоновский предел) определяется из условия равенства гравитационной силы и силы лучистого давления. Рассчитайте эддингтоновский предел для случая томсоновского рассеяния, предполагая, что вещество звезды полностью состоит из водорода. Как изменится предел, если звезда будет состоять из гелия?

209. Найдите минимальную массу звезды, считая, что термоядерные реакции идут при температуре не менее одного миллиона кельвинов. Плотность звезды принять равной  $\langle \rho \rangle = 1$  г/см<sup>3</sup>.

210. Каким образом можно исследовать распределение вещества внутри звезды, входящей в двойную систему?

211. Оцените тепловую и гравитационную энергию изотермического белого карлика с температурой  $T = 10\,000$  К. Проверить, как согласуется полученный результат с теоремой вириала.

212. Равновесие белых карликов обеспечивается давлением вырожденного электронного газа, уравнение состояния которого имеет вид

$$P = \text{const } \rho^\gamma,$$

где  $\gamma = 5/3$  для нерелятивистского и  $\gamma = 4/3$  для релятивистского газа. Найдите зависимость радиуса белого карлика от его массы  $M$ , если электроны внутри него — нерелятивистские.

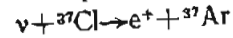
213. При увеличении массы белого карлика возрастает сила тяжести и соответственно энергия электронов, так что они становятся релятивистскими. Докажите, что существует верхний предел массы белого карлика (чандрасекаровский предел). Найдите приближенное значение этого предела, используя тем, что константа в уравнении релятивистского вырожденного электронного газа (см. задачу

212) равна

$$\text{const} = 1,2 \cdot 10^{18} \mu_e^{-4/3} \text{ (ед. CGS),}$$

где  $\mu_e$  — молекулярная масса, рассчитанная на один электрон.

214. В опыте Дэвиса, в котором впервые были обнаружены солнечные нейтрино, используется бак, содержащий 400 м<sup>3</sup> четыреххлористого углерода C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>. Изотоп <sup>37</sup>Cl составляет четвертую долю всех атомов и представлен N<sub>Cl</sub> = 2 · 10<sup>30</sup> атомами. Поперечное сечение реакции

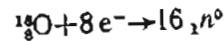


равно  $\sigma_\nu = 1,08 \cdot 10^{-42}$  см<sup>2</sup>. Поток нейтрино от Солнца, способных участвовать в этой реакции, ожидается равным  $F_\nu = 5,6 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>. Определить ожидаемое число N<sub>Ar</sub> ядер <sup>37</sup>Ar, образующихся в сутки, и сравнить его с полученным в эксперименте: 0,4 сут<sup>-1</sup>.

215. В центрах звезд с массой  $M \geq 10 M_\odot$  после исчерпания ядерных источников энергии образуется железное ядро с массой  $M_j \geq 1,5 M_\odot$ . Такое ядро неизбежно теряет устойчивость и должно сколлапсировать в нейтронную звезду (а при достаточно большой массе — в черную дыру). Оцените выделяющуюся при этом энергию. Достаточно ли этой энергии для объяснения феномена вспышки сверхновой? Примите радиус нейтронной звезды равным  $R = 10$  км.

216. В звездах с массой  $4 M_\odot \leq M \leq 8 M_\odot$  на заключительных стадиях эволюции образуется вырожденное углеродное ядро с массой  $M \approx 1,4 M_\odot$ . Термоядерный взрыв такого ядра предположительно является причиной образования сверхновых I типа и, возможно, II типа. Оцените энергию, выделяющуюся при таком взрыве. Считайте, что ядро первоначально состоит из чистого углерода <sup>12</sup>C, сгорает полностью, а продуктом взрыва является радиоактивный изотоп никеля <sup>56</sup>Ni. Энергия связи <sup>12</sup>C равна  $Q_C = -7,68$  МэВ/нуклон, а энергия связи <sup>56</sup>Ni, соответственно,  $Q_{Ni} = -8,64$  МэВ/нуклон.

217 (Ландау, 1937). Оцените минимальную массу нейтронной звезды, используя то соображение, что для превращения обычного вещества в нейтронное состояние необходимо затратить определенную энергию. Например, в реакции



на 1 грамм вещества необходимо затратить  $7 \cdot 10^{18}$  эрг. Плотность вещества в нейтронной звезде должна быть близка к ядерной,  $\rho_j = 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>.

218. Найдите начальный период обращения и величину магнитного поля вновь образовавшейся нейтронной звезды в предположении сохранения вращательного момента и в замороженности магнитного поля в процессе коллапса. Радиус звезды до коллапса  $R_0$ , период обращения  $P_0$ , а напряженность магнитного поля  $H_0$ . Численные оценки провести для случая:  $R_0 = 1 R_\odot$ ,  $P_0 = 25^d$  и  $H_0 = 100$  Э.

Указание: радиус нейтронной звезды принять равным 10 км.

219. Как изменится в процессе коллапса магнитный дипольный момент звезды и отношение полной магнитной и гравитационной энергии звезды? Магнитное поле считать замороженным. Показать, что первоначально сложное поле в процессе коллапса стремится к дипольному.

220\*. Плотность энергии равновесного излучения в связана с давлением излучения соотношением:

$$P = \frac{1}{3} u.$$

Покажите, что при медленных (обратимых) процессах излучение ведет себя подобно идеальному газу с показателем адиабаты  $\gamma = 4/3$ :

$$P V^{4/3} = \text{const},$$

где  $V$  — объем газа.

221. Сразу после образования нейтронная звезда имеет столь высокую температуру, что ее вещество находится в жидком состоянии. Однако при остывании нейтронной звезды наступает момент, когда нуклонам становится энергетически более выгодно занять упорядоченное расположение, т. е. образовать кристаллическую решетку. В результате нейтронная звезда покрывается твердой корой, толщина которой достигает 1 км. Вычислить максимально возможную высоту гор на нейтронной звезде (с типичными параметрами:  $M = 1,5 M_\odot$ ,  $R = 10$  км). Предельное напряжение, которое может выдержать кристалл равно  $P_{\text{max}} \approx 10^{12} \rho^{1/2}$  дин/см<sup>2</sup>, где  $\rho$  — плотность.

222. Атом, падающий на поверхность звезды с параболической скоростью вдоль луча зрения, излучает квант света, который уходит на «бесконечность» к наблюдателю. Определить отношение сдвига частоты квантов, испытавших красные смещения за счет гравитации и эффекта Доплера. Параболическая скорость на поверхности звезды равна  $V_p$ .

223. Современная теория строения и эволюции звезд предсказывает существование черных дыр. Для случая невращающейся звезды, внутри которой исчерпались ядер-



ные источники энерговыделения, не существует устойчивого состояния, если масса звезды больше так называемого предела Оппенгеймера — Волкова (величина предела известна недостаточно точно и оценивается в  $(2-3)M_{\odot}$ ). Звезда большей массы коллапсирует в черную дыру — объект, окруженный поверхностью, из-под которой не может выходить никакая информация (горизонт событий). Характерный размер (гравитационный радиус) горизонта событий определяется следующей формулой:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где  $M$  — масса черной дыры. Подчеркнем, что для удаленного наблюдателя коллапсирующая звезда лишь асимптотически стремится к горизонту событий.

Сравните полную энергию коллапсирующей звезды с ее гравитационной энергией.

У к а з а н и е: для гравитационной энергии используйте классическую оценку, считая радиус звезды равным  $R_g$ .

## ГЛАВА VIII НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗВЕЗДЫ

224. Предполагая, что при пульсациях цефеид величины полного относительного изменения радиуса и эффективной температуры  $\Delta R/R$  и  $\Delta T/T$  малы, вывести формулу для изменения болометрической звездной величины:

$$\Delta m_b = -2,17 \frac{\Delta R}{R} - 4,34 \frac{\Delta T}{T},$$

и подсчитать, какова должна быть амплитуда болометрической величины при  $\Delta R = R_{\odot}$  и  $R = 40 R_{\odot}$ , а  $\Delta T = -1000$  К и  $T = 5300$  К. Болометрические поправки взять из табл. I (Приложение III).

225. Оценить энергию вращения звезды класса Ве, линейная скорость вращения которой на экваторе равна  $V = 300$  км/с. Сравнить ее с другими видами энергии, содержащимися в звезде. Радиус звезды принять равным  $R = 10 R_{\odot}$  а массу — равной  $M = 10 M_{\odot}$ .

У к а з а н и е: для простоты считайте звезду однородной и твердотельно вращающейся.

226. У звезды RZ Sct эффект вращения на кривой лучевых скоростей, подобный изображенному на рис. 30, дости-

гает амплитуды 220 км/с. Главная компонента в этой системе, показывающей такой ротационный эффект, — нормальная звезда В2 с массой  $15 M_{\odot}$ . Период обращения в системе равен  $15,19^d$ . Проверить, совпадают ли периоды вращения звезды вокруг оси и ее обращения по орбите.

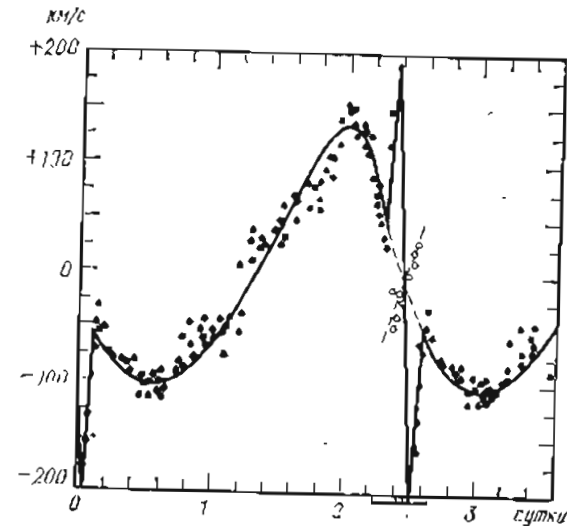


Рис. 30

227. Найдите предельное сжатие (отношение полярного и экваториального радиусов) вращающейся звезды. Считать, что форма звезды совпадает с поверхностью равного потенциала гравитационных и центробежных сил, а масса звезды сосредоточена в центре. Насколько оправдано последнее предположение?

У к а з а н и е: воспользуйтесь решением задачи 127.

228. Для вращающихся звезд с лучистым переносом тепла имеет место так называемая теорема фон Зейделя: температура в данной точке поверхности звезды пропорциональна корню четвертой степени из эффективного ускорения силы тяжести, которое определяется разностью гравитационного и центробежного ускорения. Найдите отношение температуры на полюсе к температуре на экваторе  $T_p/T_e$  для звезды  $\gamma$  Cas. Массу и радиус звезды принять равными  $M = 10 M_{\odot}$ ,  $R = 10 R_{\odot}$ , а скорость на экваторе  $v = 350$  км/с. Как выглядела бы фотосфера такой звезды с близкого расстояния?

У к а з а н и е: для упрощения расчета примите форму звезды шарообразной.

229\*. Истечение вещества из звезд-сверхгигантов, по видимому, происходит под действием сил давления излучения, поглощенного в резонансных линиях. При таком истечении скорость на бесконечности стремится асимптотически к некоторой величине  $v_\infty$  (обычно  $v_\infty = 3 v_n$ , где  $v_n$  — параболлическая скорость на поверхности звезды). Определить закон, по которому изменяется скорость в истекающем веществе  $v(R)$  при следующих условиях:

- а) радиативная сила обратно пропорциональна квадрату расстояния от центра звезды;
- б) движение вещества является бесстолкновительным;
- в) скорость на поверхности звезды равна нулю:

$$v(R_*) = 0.$$

230\*. Покажите, что в предположениях предыдущей задачи и с учетом поглощения излучения в истекающем веществе (без переизлучения) справедливо следующее соотношение:

$$\dot{M}v = \frac{L - L_{кр}}{c} (1 - e^{-\tau})$$

где  $\dot{M}$  — темп истечения звезды,  $v$  — скорость истекающего вещества,  $\tau$  — «текущая» оптическая толща в истекающей оболочке,  $L$  — светимость звезды на уровне фотосферы,  $L_{кр}$  — критическая светимость, определяемая как

$$L_{кр} = \frac{4\pi c G M}{\kappa},$$

где  $\kappa$  — коэффициент поглощения на 1 г вещества,  $M$  — масса звезды.

231. Какое из ограничений должно всегда выполняться для звездного ветра, истекающего под действием излучения звезды:

- а)  $\dot{M} \leq \frac{L}{v_\infty c}$  (сохранение импульса);
- б)  $\dot{M} \leq \frac{2L}{v_\infty^2}$  (сохранение энергии),

где  $L$  — светимость звезды на уровне, где вещество находится в состоянии гидростатического равновесия, а остальные обозначения те же, что и в предыдущей задаче.

232. Наблюдения звезды Вольфа — Райе позволили определить светимость, темп истечения и скорость истечения

вещества:  $L = 10^{30}$  эрг/с,  $\dot{M} = 10^{-5} M_\odot/\text{год}$  и  $V_\infty = 1500$  км/с. Проверьте для этой звезды выполнимость неравенств из предыдущей задачи. Объясните результат.

233\*. Эмиссионные линии формируются в радиально истекающей оболочке звезды. Каким будет профиль и ширина линии, если:

- а) скорость истечения вещества  $v$  постоянна;
- б) оптическая толщина в линии много меньше единицы?

У к а з а н и е: собственную ширину линии считать равной нулю.

234. Как известно, скорость эволюции звезды тем выше, чем больше ее масса. Почему, несмотря на это, в тесных двойных системах довольно распространена ситуация, когда спутник-субгигант обладает массой, меньшей, чем первичная компонента — сравнительно более молодая звезда (парадокс Алголя)?

235. Две звезды обладают совершенно одинаковой массой и одинаковым возрастом, но одна из них враждается. У какой из звезд запас тепловой энергии больше?

236. В двойной системе произошел консервативный перенос массы с одной компоненты на другую. Определить большую полуось двойной системы после перетекания, если в начале система обладала следующими параметрами: массы компонент  $M_A$  и  $M_B$  ( $M_A > M_B$ ), большая полуось  $a_0$ , масса каждой звезды изменилась на величину  $\Delta M$ . Проанализируйте ответ с точки зрения того, какая из звезд теряла массу.

237. Согласно современным представлениям, явление новой представляет собой результат термоядерной вспышки на белом карлике вещества, перетекшего с соседней звезды, богатой водородом. Определите массу вещества, вступившего в термоядерную реакцию, исходя из условий, что энергия вспышки новой равна  $10^{46}$  эрг.

238. Новая RR Pic 1925 г. представлялась в телескоп в 1931 г. тройной звездой: кроме главной компоненты А (8,9<sup>m</sup>) были видны компоненты (остатки расширяющейся туманности) В (11,5<sup>m</sup>) и С (12,5<sup>m</sup>) на расстоянии соответственно 0,95", и 0,98" от А. С другой стороны, спектральные наблюдения вскоре после максимума вспышки этой звезды указывали на скорости расширения оболочек до 1000 км/с. Найти верхний предел расстояния до RR Pic и минимальную абсолютную звездную величину  $M$ , если видимый ее блеск в максимуме был равен 1,0<sup>m</sup>.

239. Проверить утверждение, что Новая Лебедя 1975 г. достигла в максимуме блеска размеров  $\sim 500 R_\odot$ . Этот

вывод сделан из следующих наблюдательных данных: два раза до максимума — 29,8 августа и 30,9 августа — скорости расширения оболочек были равны 180 км/с и 2400 км/с, а звездные величины (визуальные) — соответственно 2,55<sup>m</sup> и 1,85<sup>m</sup>. Момент максимума 31,0 августа.

240. В настоящее время предполагается, что взрыв сверхновой I типа — это термоядерный взрыв компактного объекта (белого карлика) с массой  $M \approx 1,4 M_{\odot}$ . Оцените скорость разлета вещества при таком взрыве. Для этого воспользуйтесь результатом решения задачи 216 и считайте, что вся выделяемая энергия переходит в кинетическую энергию оболочки.

241. Вид кривых блеска 38 сверхновых I типа приведен на рис. 31 (Барбон и др., 1973). Источником энергии свечения оболочки сверхновой I типа, возможно, является

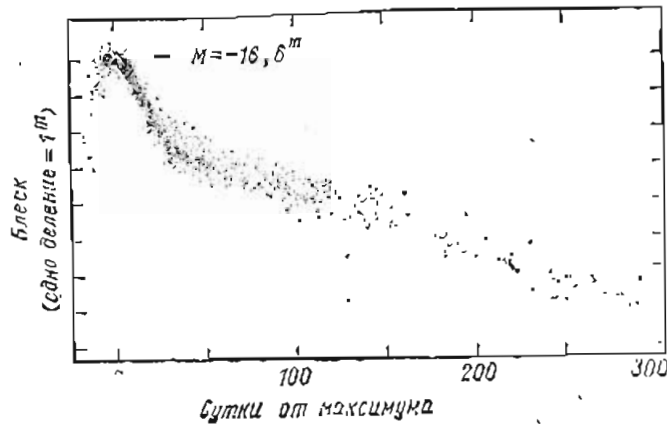


Рис. 31

$\beta^+$ -распад образующегося при взрыве радиоактивного изотопа  $^{56}\text{Ni}$ . Какое количество этого изотопа требуется для объяснения светимости сверхновой I типа в максимуме блеска, составляющей  $\sim 5 \cdot 10^{43}$  эрг/с? Период полураспада  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$  составляет  $\tau_{1/2} = 6,1$  дня, энергия распада  $\epsilon = 1,78$  МэВ.

242. Долгое время самым быстрым из известных пульсаров был радиопульсар в Крабовидной туманности: период  $P = 0,033$  с. Однако в 1982 г. был открыт еще более быстрый пульсар 1937+21 с периодом  $P = 0,0015$  с. Запись импульса этого пульсара приведена на рис. 32, согласно Беккеру и др. (1982 г.).

Скорость изменения периодов  $\dot{P}$  у этих пульсаров соответственно равна  $4,23 \cdot 10^{-13}$  и  $10^{-13}$ . Сравните магнитные поля обоих пульсаров, предполагая, что потери вращательной энергии у них обусловлены магнитодипольным излучением, мощность которого определяется формулой

$$L_{\text{из}} = (2/3) \frac{\mu^2 \omega^4}{c^3},$$

где  $\omega = 2\pi/P$  — частота вращения звезды,  $\mu = H_0 R^3/2$  — магнитный дипольный момент (ось магнитного диполя предполагается направленной перпендикулярно к оси вращения

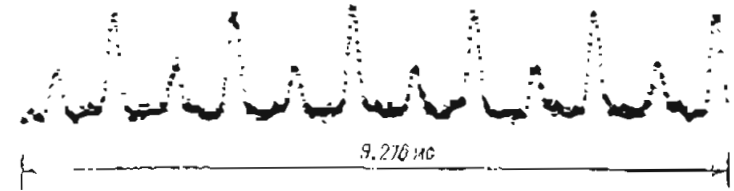


Рис. 32

звезды),  $H_0$  — напряженность магнитного поля на магнитных полюсах,  $R$  — радиус нейтронной звезды. Момент инерции нейтронной звезды принять равным  $10^{45}$  г·см<sup>2</sup>.

243. Используя значение  $\dot{P}$  из предыдущей задачи для пульсара в Крабовидной туманности, проверить, насколько совпадает его реальный возраст (вспышка сверхновой была в 1054 г.) с возрастом, определенным по магнитодипольной формуле.

244\*. Пусть потери энергии вращения пульсара определяются степенным законом торможения:

$$\frac{dI\omega}{dt} = -A\omega^n.$$

Как измерить показатель степени  $n$  по наблюдаемому изменению периода, не привлекая никаких данных о строении нейтронной звезды?

245. Простые оценки показывают (проверьте), что вращательная энергия быстрых радиопульсаров на много порядков больше вращательной энергии нормальных звезд. С чем это связано?

246\*. Предположим, что в двойной системе, состоящей из звезд сравнимой массы, произошел коллапс одной из звезд, сопровождающийся сбросом вещества. Пусть вначале орбита была круговой. Сброс вещества происходит сферически-симметрично и практически мгновенно (т. е.

за время, много меньшее, чем орбитальный период двойной системы). Какое минимальное количество вещества должно быть сброшено, чтобы двойная система распалась?

247. Пусть при условиях предыдущей задачи двойная система не распалась после сброса массы. Останется ли орбита круговой? Приобретет ли центр масс двойной системы дополнительную скорость? Как изменится ответ если время сброса вещества будет много больше периода двойной системы?

248. Аккрецией называется падение вещества на звезду под действием ее притяжения. Если падающее вещество при столкновении с поверхностью звезды высвечивает всю энергию, приобретенную под действием сил гравитации, то можно записать, что светимость аккрецирующей звезды равна

$$L = \dot{M} \frac{GM}{R},$$

где  $\dot{M}$  — темп аккреции (количество вещества, падающего в 1 с на поверхность звезды),  $M$  и  $R$  — масса и радиус звезды. Определить коэффициент энерговыделения (отношение выделившейся энергии к энергии покоя вещества, участвовавшего в процессе выделения энергии) для аккреции на нейтронную звезду с массой  $M = 1,5M_{\odot}$  и радиусом  $R = 10$  км и для аккреции на белый карлик с массой  $M = 1,4M_{\odot}$  и радиусом  $R = 5000$  км. Сравнить полученные величины с эффективностью протон-протонной реакции.

249. Рентгеновские пульсары в двойных системах представляют собой аккрецирующие нейтронные звезды. К такого типа объектам принадлежит рентгеновский пульсар Her X-1, светимость которого равна  $L_X = 10^{37}$  эрг/с. Оцените темп аккреция для этого пульсара. Ответ представить в единицах г/с и в единицах  $M_{\odot}/\text{год}$ .

250. На рис. 33, а и б приведены результаты измерений периодов пульсаров в течение нескольких лет для двух типичных представителей. Почему радиопульсары в среднем замедляют свое вращение, а аккрецирующие пульсары в среднем ускоряются?

251. Используя решение задачи 249, определите характерную шкалу времени изменения массы нормальной звезды HZ Her. Известно, что HZ Her представляет собой нормальный субгигант A7 с массой  $M = 2M_{\odot}$ . К чему ближе полученное время — к ядерному или тепловому?

252. Пусть аккрецирующая звезда обладает дипольным магнитным полем, так что напряженность магнитного поля

в плоскости магнитного экватора меняется по закону

$$H(R) = H(R_0)(R_0/R)^2,$$

где  $H_0$  — напряженность магнитного поля на поверхности нейтронной звезды,  $R_0$  — радиус звезды. Определить характерный размер магнитосферы аккрецирующей звезды

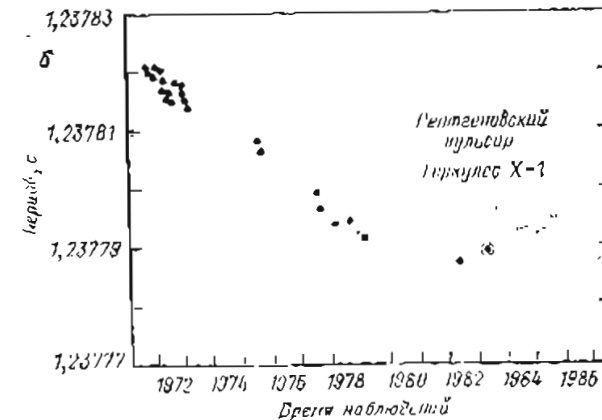
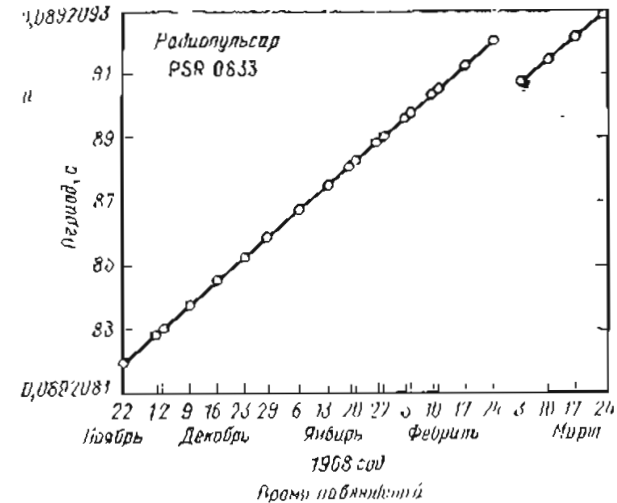


Рис. 33

(см. задачи 147 и 170). Динамическое давление падающего на звезду вещества может быть представлено выражением

$$P = \rho v^2 = \frac{\dot{M}}{4\pi R^2} \sqrt{\frac{2GM}{R}},$$

где  $\dot{M}$  — темп аккреции,  $M$  — масса аккрецирующей звезды. Численную оценку провести для пульсара Нег X-1

253. Рентгеновский источник AM Геркулеса является родоначальником особого класса маломассивных двойных систем, для которых характерно наличие белого карлика обладающего мощным магнитным полем. Сама двойная система AM Геркулеса состоит из красного и белого карлика, причем вещество перетекает от первого ко второму. Рентгеновская светимость аккрецирующего белого карлика достигает  $10^{33}$  эрг/с. Считая магнитное поле белого карлика дипольным с напряженностью у поверхности  $H_0 = 10^8$  Э найдите характерный размер магнитосферы белого карлика и сравните его с размером большой полуоси двойной системы ( $a = 10^{10}$  см).

У к а з а н и е: воспользуйтесь решением предыдущей задачи.

254. Рентгеновские барстеры представляют собой объекты, от которых наряду с постоянным рентгеновским излучением наблюдаются эпизодические вспышки более длинноволнового рентгеновского излучения. На рис. 34 пред-

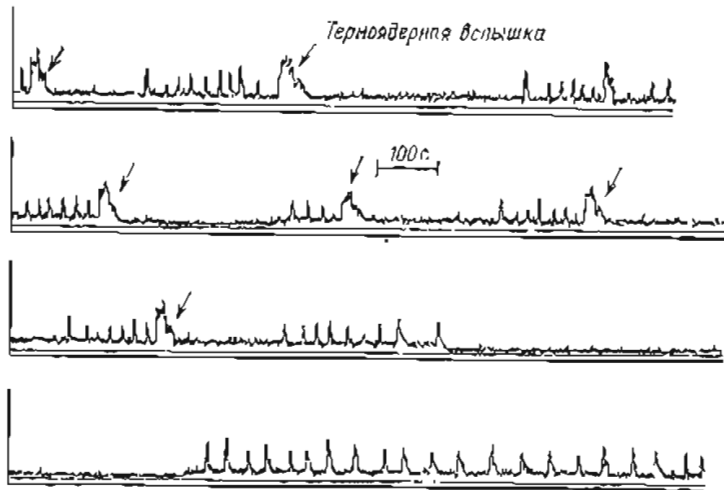


Рис. 34

ставлена запись принимаемого излучения от одного из барстеров: МХВ 1733—75. Предполагается, что это явление возникает в результате аккреции вещества на нейтронную звезду, обладающую относительно слабым магнитным полем. Постоянное рентгеновское излучение в этой модели

есть результат выделения энергии аккрецируемого вещества, а вспышки — результат термоядерного горения накопившегося на поверхности нейтронной звезды вещества. Чему равно отношение энергии, выделяемой барстером между вспышками, к энергии вспышки, если предположить, что при взрыве сгорает все накопившееся вещество?

255. Наблюдения вспышки рентгеновского барстера позволили определить его спектр и светимость. Спектр оказался чернотельным с температурой  $kT = 2$  кэВ, а светимость  $L = 10^{38}$  эрг/с. Определить радиус нейтронной звезды.

У к а з а н и е: считать, что термоядерный взрыв происходит в тонком шаровом слое на поверхности нейтронной звезды.

256. 5 марта 1979 г. был зарегистрирован один из наиболее мощных  $\gamma$ -всплесков (см. рис. 35, на котором показана

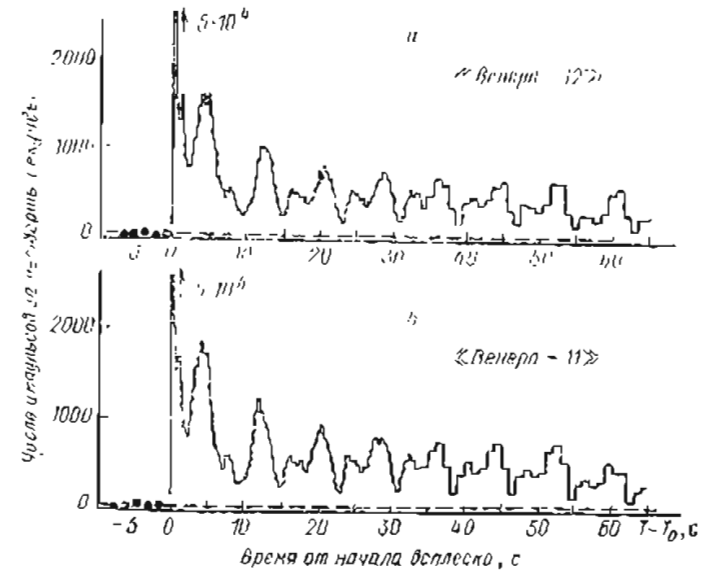


Рис. 35

запись этого всплеска согласно Мазецу и др., 1979). Полный поток энергии в гамма-диапазоне, «проинтегрированный» за время вспышки, составил  $10^{-8}$  эрг/см<sup>2</sup>, а продолжительность вспышки была 100 с. Можно ли было наблюдать визуально эту вспышку, если бы в оптическом диапазоне

не источник был в тысячу раз слабее? (О технике наблюдений у-всплесков см. задачу 121).

257. В спектре объекта SS 433 (V 1343 Орла) наблюдаются три системы линий водорода: две системы движутся по спектру в противофазе с периодом  $\sim 164$  дня и амплитудой до  $\sim 1000 \text{ \AA}$ , а третья система линий неподвижна (см. Липунов и Сурдин, 1980). Установлено, что движущиеся эмиссионные линии возникают в двух противоположно направленных струях или выбросах (см. рис. 36), направление которых меняется с периодом 164 дня. На одной из спектрограмм длина волны линии  $H_{\alpha}$ , смещенной в красную сторону, оказалась равной  $7730 \text{ \AA}$ , а смещенной в синюю сторону —  $6160 \text{ \AA}$ . Определить скорость выброшенного вещества  $v$ .

У к а з а н и е: необходимо использовать релятивистскую формулу для эффекта Доплера.

258. Нарисуйте качественно кривую лучевых скоростей источника SS 433 (см. предыдущую задачу) для трех систем линий.

259. При скорости движения вещества в струях ( $v \approx 80\,000 \text{ км/с}$ ), наблюдаемой у источника SS 433 (см. рис. 36),

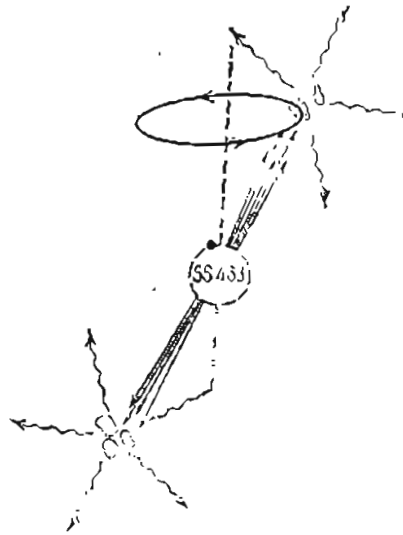


Рис. 36

важную роль начинают играть эффекты специальной теории относительности. В частности, из-за абберации вещество будет излучать преимущественно в направлении движе-

ния (эффект прожектора). Оцените, насколько поток в линиях, смещенных в синюю сторону, будет больше, чем в линиях, смещенных в красную сторону спектра?

## ГЛАВА IX

### ДИФФУЗНАЯ МАТЕРИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ

260. Пылинка с плотностью  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$  и размером  $a = 1 \text{ мкм}$  образовалась на расстоянии  $R = 5 R_{\odot}$  от звезды, которая обладает светимостью  $L = 10^{23} \text{ эрг/с}$  и массой  $M = 3 M_{\odot}$ . Определить скорость движения пылинки на бесконечности, если бы она двигалась в вакууме. Как изменится результат, если учесть наличие межзвездной среды?

261. Оптически тонкое облако плазмы, обладающее однородной излучающей способностью, имеет форму эллипсоида вращения с соотношением осей  $1 : 2$ . Чему равно отношение поверхностной яркости облака в направлениях большой и малой оси?

262. При наблюдении межзвездного водорода в линии  $21 \text{ см}$ , как правило, выпадают области в направлении центр — антицентр. С чем это связано?

263. Можно ли межзвездный газ и пыль считать однокомпонентной средой в газодинамическом смысле?

У к а з а н и е: сравните длину свободного пробега частиц с характерными размерами газового слоя.

264. Показатель преломления для радиоволн в плазме равен

$$n = \sqrt{1 - (v_0/v)^2},$$

где  $v_0$  — плазменная частота ( $v_0 = 3 \cdot 10^3 \text{ Гц}$  для средних параметров межзвездной плазмы). Определить время запаздывания радиопульсов от пульсара в Крабовидной туманности между частотами  $300$  и  $400 \text{ МГц}$ . Мера дисперсии для этого пульсара равна  $DM = 56.7 \text{ нк/см}^3$ .

265. Согласно современным представлениям, радиопульсары излучают значительную часть теряемой энергии в виде магнитодипольных электромагнитных волн на частоте вращения. Можно ли наблюдать это излучение от пульсаров с периодами вращения более  $0,01 \text{ с}$ ?

266\*. Оптически тонкое облако ионизованной плазмы имеет массу  $M$  и угловой размер  $\theta$ . Покажите, что имеет место следующее соотношение:

$$d \sim \frac{M^{2/5}}{\theta^{3/5} F^{1/5}},$$

где  $d$  — расстояние до облака, а  $F$  — поток излучения от облака, принимаемый на Земле. На этом соотношении основан метод И. С. Шкловского для определения расстояний до планетарных туманностей.

267. Полный запас кинетической энергии релятивистских электронов в Крабовидной туманности равен  $E_e \approx 2 \cdot 10^{45}$  эрг, а ее светимость  $L = 10^{38}$  эрг/с. Определить производную периода  $\dot{P}$  пульсара в туманности. Момент инерции нейтронной звезды принять равным  $I = 10^{46}$  г·см<sup>2</sup>. Сравнить полученную оценку с наблюдаемой величиной  $\dot{P}$ .

268. Определить характерную энергию релятивистских электронов в Крабовидной туманности, ответственных за ее оптическое излучение. Напряженность магнитного поля принять равной  $10^{-4}$  Э.

У к а з а н и е: длину волны принять равной  $\lambda = 6000$  Å

269. Два тела с одинаковыми поглощающими свойствами помещены на одинаковом расстоянии от звезды. Одно тело имеет форму сферы, а другое — форму куба. Какой из них будет более «горячим»?

У к а з а н и е: считать, что куб перехватывает максимальное количество энергии.

270. По современным данным средняя напряженность магнитного поля в Галактике равна  $B = 2 \cdot 10^{-6}$  Э. Это поле имеет мелкомасштабную хаотическую компоненту. Вследствие этого траектория релятивистской частицы в Галактике, как правило, «запутывается», так что по направлению ее движения совершенно невозможно восстановить место ее рождения. Вычислить критическое значение энергии частицы, для которой такое восстановление все-таки возможно.

271. Инфракрасные спектральные наблюдения центра Галактики, проведенные группой Таунса (США), указывают на вращение газовых облаков вокруг центра со скоростью  $v \approx 100$  км/с. Принимая такую интерпретацию наблюдений, оцените массу вещества, сосредоточенного в центре Галактики. Угловой размер исследованной области равен  $\theta = 20''$ .

272. Для правильного учета ослабления блеска звезд, производимого пылью, лучше всего пользоваться тем фактом, что отношение общего поглощения  $A$  к избытку цвета  $E$  приблизительно постоянно. Наблюдения дают отношение

$$\gamma = \frac{A_V}{E_{H-V}} = 3,0 \pm 0,2, \quad (*)$$

где  $A_V$  — общее поглощение в визуальных лучах. Для поглощения в фотографических лучах  $A_{pg}$

$$\gamma = \frac{A_{pg}}{E} = 4,2 \pm 0,2. \quad (**)$$

Изотопные длины волн равны: 5520 Å — для системы  $V$ , 4230 Å — для системы  $I_{pg}$ . Статистическая связь между показателем цвета  $B-V$  и  $C = I_{pg} - I_{pv}$  имеет вид

$$C = -0,09 + 0,95 (B-V).$$

Проверить, согласуются ли формулы (\*) и (\*\*), полученные независимо друг от друга из разного наблюдательного материала. Считать, что межзвездное ослабление света пропорционально  $\lambda^{-1}$ .

273. В нашей Галактике около 100 мощных (светимостью  $10^{46} - 10^{47}$  эрг/с) рентгеновских источников. Обычно утверждается, что практически все источники с такой светимостью обнаружены. Как это утверждение согласуется с оценкой оптической толщи Галактики для жесткого рентгеновского излучения?

274. Функция рассеяния  $Q$  показывает отношение эффективного сечения частицы к ее геометрическому сечению. Вычислить коэффициент ослабления  $k$ , рассчитанный на единицу массы. Размер пылинки  $a$ , а ее плотность  $\rho$ .

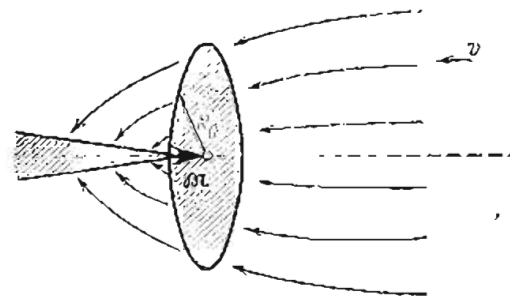


Рис. 37

275. Темп аккреции вещества  $\dot{M}$  на быстро движущийся центр массы  $M$  равен (рис. 37)

$$\dot{M} = \sigma_{gr} \rho v,$$

где  $\rho$  — плотность среды, а  $v$  — скорость тела относительно среды. Сечение гравитационного взаимодействия тела



со средней равнó:

$$\sigma_0 \approx \pi \left( \frac{2GM}{v^2} \right)^2.$$

Определите темп аккреции на одиночную нейтронную звезду, движущуюся в межзвездной среде со скоростью  $v = 100$  км/с. Плотность среды  $\rho = 10^{-24}$  г/см<sup>3</sup>, а масса нейтронной звезды равна  $M = 1,5 M_{\odot}$ . Радиус нейтронной звезды  $R = 10$  км. Можно ли обнаружить такую нейтронную звезду, если она находится на расстоянии 10 пк, а чувствительность рентгеновского детектора равна  $10^{-15}$  эрг/см<sup>2</sup>·с?

276. Космический корабль шарообразной формы (радиусом  $R$ ) равномерно движется в облаке пыли плотности  $\rho$  со скоростью  $v$ . Определите мощность двигателя. До какой температуры нагревается корабль?

У к а з а н и е: считать, что пыль налипает на шар.

277. Граница отражающей туманности, за которой туманность перестает быть заметной для некоторого телескопа (2,5-метровый телескоп), соответствует поверхностной яркости  $23,2^m$  с 1 кв. секунды дуги. Покажите, что видимая звездная величина освещающей звезды  $m_*$  связана с угловым размером туманности  $\alpha'$  следующим соотношением:

$$m_* + 5 \lg \alpha' = \frac{5}{2} \lg A + 11,6^m,$$

где  $A$  — альbedo пылевых частиц.

278. С зеркалом, имеющим диаметр 12 метров, на волне 21 см принят сигнал, мощность которого равна  $1,3 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц. Определить яркостную температуру межзвездного водорода в этой области, считая, что эффективная площадь зеркала равна его геометрической площади.

У к а з а н и е: считать, что диаграмма направленности радиотелескопа меньше угловых размеров источника.

279. Подсчитать, какова должна быть минимальная энергия электронов, способных возбудить первый и второй метастабильные уровни ионов кислорода O III и O II. Какая для этого необходима кинетическая температура  $T_*$ ?

280. Вывести формулу для геометрической длины лучезрения внутри кольцевой туманности, состоящей из оболочки, толщина которой  $d$  и внешний радиус  $r$ . Будет ли туманность выглядеть как планетарная, если плотность внутри оболочки на порядок ниже, а  $dr = 0,1$ ?

281. Как изменяется температура газа при его рекомбинации?

У к а з а н и е: проследите за судьбой энергии электронов захваченных атомами.

282. Найти средний радиус планетарной туманности, полагая для ее ядра спектральный класс O6 и абсолютную звездную величину  $M_v = 2,5^m$ .

283. Что общего между механизмами излучения планетарных туманностей и Крабовидной туманности?

284. Вычислить радиус зоны H II (зоны Стремгrena) вокруг звезды Денеб ( $\alpha$  Лебеда), спектральный класс которой A2 Ia, абсолютная звездная величина  $M_v = -7^m$ , показатель цвета  $B - V = +0,09^m$ , видимая звездная величина  $m_v = 1,3^m$ . Какой угловой диаметр будет иметь область H II вокруг этой звезды?

У к а з а н и е: концентрацию в области H II положить равной  $n = 1$ , а электронную температуру  $T_e = 10^4$  К.

285. Определить минимальный характерный размер гравитационно неустойчивой области газа  $\lambda_{дж}$  (джинсовский размер), пользуясь примерным равенством сил давления гравитации и давления газа. Плотность среды  $\rho$ , температура  $T$ .

286. Критическое значение массы гравитационно неустойчивой области с размером порядка джинсовского часто называют джинсовской массой. Оцените характерную джинсовскую массу в межзвездной среде в галактической плоскости. Рассмотрите три фазы: холодные области с температурой и плотностью соответственно:  $T = 100$  К;  $\rho = 10^{-23}$  г/см<sup>3</sup>; зоны H II, в которых  $T = 10^4$  К,  $\rho = 10^{-21}$  г/см<sup>3</sup>; горячие области, в которых  $T = 10^6$  К,  $\rho = 10^{-26}$  г/см<sup>3</sup>. Молекулярную массу принять равной  $\mu = 0,6$ .

287. Зависит ли инкремент гравитационной неустойчивости от размера возмущений, имеющих массу много больше джинсовской?

У к а з а н и е: инкрементом неустойчивости называется величина, обратная характерному времени ее нарастания. Последнее в рассматриваемом приближении примерно равно времени свободного падения.

288. Возможно ли распространение звука с длиной волны  $\lambda = 0,1$  пк в молекулярном облаке H<sub>2</sub> с температурой  $T = 100$  К и плотностью  $\rho = 10^{-20}$  г/см<sup>3</sup>?

289. На длине волны  $\lambda = 8$  мм была измерена плотность потока радионизлучения от центральной части туманности Орiona (размер  $4' \times 4'$ ), равная  $5 \cdot 10^{-24}$  Вт/(м<sup>2</sup>·Гц). Чему равна мера эмиссии туманности?

290. По результатам предыдущей задачи найти электронную концентрацию для центральной части туманности Ори-



она, считая, что вдоль луча зрения она простирается на столько же, насколько и в картинной плоскости. Расстояние до туманности принять равным 400 пк.

291. Плотность излучения туманности Телес А вблизи  $\lambda$  5500 в 2560 раз больше, чем от Солнца, для которого плотность излучения равна  $9,07 \cdot 10^{10}$  эрг/(с·см<sup>2</sup>·мкм). Расстояние до туманности принять равным 2 кпк. Подсчитать падающее на Землю излучение в единицах Вт/(м<sup>2</sup>·Гц) в области  $\lambda$  5500 и  $\lambda$  4250 Å, исходя из закона

$$F_{\nu} \sim \nu^{-\alpha},$$

где  $\alpha = 1,15$ .

292. Найти температуру тела, помещенного в окрестности Солнца. Тело обладает резко селективным характером поглощения при  $\lambda_0 = 1000$  Å:

$$\kappa_{\nu} = \kappa_0 \delta(\lambda - \lambda_0).$$

При вычислении используйте данные табл. 2 Приложения III.

293. Наблюдения первичных космических лучей показали, что электроны с энергией, большей  $0,5 \cdot 10^9$  эВ, имеют концентрацию  $n = 1,3 \cdot 10^{-12}$  см<sup>-3</sup>. По тепловому излучению Галактики определяется функция распределения электронов по энергиям:

$$N(E) dE = \frac{K}{E^{\gamma}} dE,$$

причем  $\gamma = 2,2$ . Определить коэффициент  $K$  в этой формуле

294. Дают ли релятивистские протоны измеримый вклад в тепловое радионизлучение Галактики?

295. Вывести формулу, удобную для вычисления радиуса орбиты релятивистской частицы в магнитном поле. Энергия частиц равна  $E_0$  (в единицах  $10^9$  эВ), а напряженность магнитного поля  $H_0$  (в единицах  $10^{-6}$  Э). Радиус орбиты частицы дать в парсеках.

296. Покажите, что облако горячей плазмы при данной мере эмиссии имеет максимальную поверхностную яркость когда его оптическая толщина близка к единице.

297. Расстояние между пластинами эталона Фабри — Перо равно 0,5 мм, фокусное расстояние объектива камеры 50 мм.

Найти:

1) радиусы первого и второго кольца изображения туманности в лучах  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 6562,808$  Å),

2) дисперсию в кольцах;

3) расположение колец в лучах  $\lambda$  6584 Å по отношению к кольцам  $H_{\alpha}$ ;

4) изменение радиусов этих колец при лучевых скоростях газа в туманности 10, 50, 100, 300 км/с;

5) какой скорости по лучу зрения соответствует перемещение всей системы колец на одно?

298. Формула для частоты  $\nu_{nk}$  перехода с уровня  $n$  на уровень  $k$  имеет вид

$$\nu_{nk} = z^2 R_{\infty} c \left[ \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right],$$

где  $z$  — эффективный заряд ядра,  $R_{\infty}$  — постоянная Ридберга. Объяснить, почему так близки частоты для перехода 110—109 при рекомбинационных переходах у таких совсем разных атомов, как H, He, C, а именно 5008,923; 5010,964; 5011,417 МГц соответственно. В то же время переход 524—523 у атомов H, He, с одной стороны, и у O VI, с другой, характеризуется различными частотами: 45,837; 45,856 и 1650,99 МГц. Объясните и это.

## ГЛАВА X

### ГАЛАКТИКИ И МЕТАГАЛАКТИКА

299. Как зависит поверхностная яркость дисковой галактики (с 1 квадратной секунды дуги) от угла наклона плоскости галактики к лучу зрения?

Указание: поглощением газа и пыли можно пренебречь.

300. Найти поверхностную яркость (с 1 угловой квадратной секунды) спиральной галактики  $m$ . Средняя плотность звезд  $n_*$ , а средняя видимая звездная величина  $m_*$ . Толщина галактического звездного диска  $H$ , наклон к лучу зрения  $i$ , а расстояние до галактики  $d$ .

301. Кривой вращения галактики (обычно спиральной) называется график зависимости линейной скорости вращения от линейного или углового расстояния от центра галактики в плоскости ее симметрии. На рис. 38 приведены три характерные кривые вращения спиральных галактик. На кривой  $a$  замечен вторичный минимум. Кривая вращения отражает распределение гравитационного потенциала по диску галактики, которое в свою очередь определяется распределением плотности вещества в диске. Каким должно быть распределение плотности вещества по радиусу, чтобы на кривой вращения появился вторичный минимум?

302. На кривых вращения (рис. 38) вблизи центра галактик, как правило, имеется почти линейный («твердотельный») участок, когда  $V = \text{const} \cdot R$ . Покажите, что если в центре не имеется массивного компактного объекта, то на кривой вращения всегда должен быть «твердотельный» участок, на котором вращение напоминает вращение твердого тела.

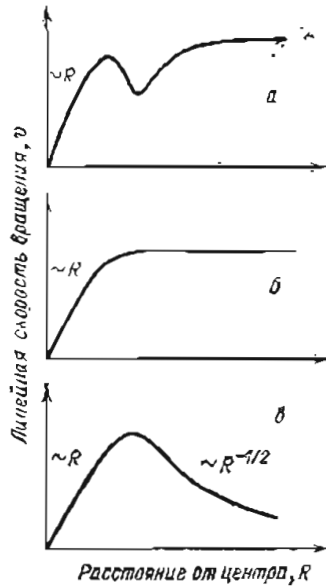


Рис. 38

303. Естественно ожидать, что на больших расстояниях от центра галактики кривая вращения должна асимптотически описываться кеплеровским законом:  $V \sim R^{-1/2}$  (см. рис. 38 в). Однако наблюдения (см. рис. 38 а и б) часто дают на больших расстояниях  $v = \text{const}$ . По какому закону меняется плотность вещества на больших расстояниях таких галактик? Для простоты примите распределение вещества сферически-симметричным.

304. Максимальное сжатие эллиптических галактик равно

$$\frac{a-b}{a} \cdot 10 = 6.$$

Сравните это значение с максимальным сжатием вращающейся звезды (задача 227), масса которой сосредоточена в центре. С чем может быть связано различие в значении сжатия звезды и галактики?

305. Как известно, в спиральных галактиках газопылевой слой имеет толщину примерно на порядок меньше, чем звездный диск. Что можно сказать о соотношении хаотических скоростей в газовом и звездном дисках?

306. Используя решение предыдущей задачи, ответьте на вопрос: что быстрее вращается вокруг центра галактики — газ или звезды?

307. За какое характерное время замыкался бы спиральный рисунок галактики, если бы он отражал собой реальное распределение массы по галактике?

308. Масса галактики  $M_{31}$ , как полагают, составляет

$10^{11} M_{\odot}$ , а размер 15—20 кпк. Сравните гравитационную и кинетическую энергию звезд (характерная скорость в галактике — 200 км/с).

309. Является ли «постоянная» Хаббла постоянной?

310. Убедитесь в том, что расширение Вселенной по закону Хаббла

$$v = HR,$$

где  $v$  — скорость взаимного удаления галактик, находящихся на расстоянии  $R$ ,  $H$  — постоянная Хаббла, не меняет изотропии Вселенной.

311. Классический метод измерения расстояний во Вселенной в своей основе опирается на закон «период — светимость» для цефеид. Во сколько раз изменится постоянная Хаббла, если нуль-пункт зависимости «период — светимость» сдвинется на одну звездную величину в сторону больших светимостей?

312. Как известно, хаббловское расширение является фундаментальным свойством Вселенной и впервые было предсказано А. А. Фридманом как частное решение уравнений общей теории относительности. Влияет ли хаббловское расширение на величину расстояния:

- до Луны;
- до центра Галактики;
- до галактики в созвездии Андромеды;
- до центра местного сверхскопления?

313. Со времени открытия закона Хаббла величина постоянной Хаббла уточнялась несколько раз и имела следующие значения:  $H = 500, 100, 50$  (км/с)/Мпк. Оцените аксиальный характерный возраст Вселенной, используя все три значения. Как согласуются полученные значения с возрастом Земли, определенным независимым методом (см. задачу 386)?

314. Известно, что пекулярные скорости галактик имеют характерную величину 100 км/с. Найдите минимальную видимую звездную величину, которую должна иметь галактика типа нашей (абсолютная звездная величина  $M = -19^m$ ), чтобы можно было определить расстояние до нее, используя спектральные наблюдения и закон Хаббла. Постоянную Хаббла принять равной  $H = 100$  (км/с)/Мпк.

315. Оценить число галактик в скоплении Девы, испытывающих парные столкновения. Плотность числа галактик в этом скоплении принимается равной  $2 \cdot 10^3$  Мпк $^{-3}$ , а общее их число 2500. Размер сечения взаимодействия принять равным 10 кпк, а характерную скорость — равной 1000 км/с.

316. Излучательная способность оптически тонкой полностью ионизованной водородной плазмы равна

$$\epsilon \approx 1,43 \cdot 10^{-24} \cdot n^2 T_e^{1/2} \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^3),$$

где  $T_e = T/10^8$  К,  $n$  — температура и плотность плазмы. В богатых скоплениях галактик характерные параметры межгалактического газа имеют значения  $T = 10^8$  К,  $n = 10^{-3}$  см $^{-3}$ , а характерный размер равен  $R = 0,5$  Мпк. Считать, что оптическая толщина межгалактического газа определяется томоновским рассеянием и полную светимость скопления.

317. Используя решение предыдущей задачи, оценить максимальное красное смещение, на котором еще можно наблюдать рентгеновское излучение богатых скоплений галактик. Чувствительность рентгеновского телескопа принять равной  $10^{-12}$  эрг/(с  $\cdot$  см $^2$ ). Постоянную Хаббла считать равной  $H = 100$  (км/с)/Мпк.

318. Можно ли оптическими методами наблюдать линии  $H_\alpha$  в спектре квазара с красным смещением  $z = 2,5$ ? Как водородную линию удобно наблюдать в этом случае?

319. В ядрах квазаров иногда наблюдаются так называемые сверхсветовые выбросы вещества. Измерения скорости производятся следующим образом: методом сверхдальней интерферометрии измеряется угловое расстояние между выбросами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  в два различных момента времени  $t_1$  и  $t_2$ .

По красному смещению с помощью закона Хаббла определяется расстояние до квазара  $d$ . Скорость выбросов вычисляется по формуле

$$V_j = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} d,$$

которая в некоторых случаях в 4–5 раз превышает скорость света. С чем может быть связан этот парадоксальный результат?

320. Наиболее вероятной кинематической моделью, объясняющей явление сверхсветовых скоростей (см. предыдущую задачу), является следующая модель (см. рис. 39). Излучающая область выбрасывается из центра квазара со скоростью, близкой к скорости света. Если направление выброса близко к лучу зрения, то скорость, измеренная описанным в предыдущей задаче методом, оказывается

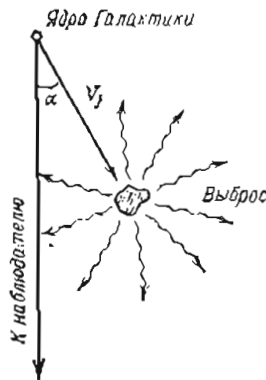


Рис. 39

большее скорости света. Проанализируйте этот эффект и выведите формулу, связывающую наблюдаемую скорость  $v$  с собственной скоростью выброса  $v_j$  и углом  $\alpha$ .

321. Светимость некоторых квазаров достигает  $10^{47}$  эрг/с. Физические процессы, приводящие к столь мощному энерговыделению, определены пока не выяснены. Рассчитайте, какое количество вещества необходимо затратить каждую секунду, чтобы обеспечить такую светимость:

а) термоядерным горением;

б) аккрецией на релятивистский объект (см. задачу 248).

Ответ выразить также в единицах  $M_\odot$ /год.

322. Оцените характерную массу ядра сейфертовской галактики, полагая, что наблюдаемые широкие эмиссионные линии возникают в квазистационарной оболочке газа вокруг ядра размером 0,1 пк.

323. Возможным источником активности ядер галактик и квазаров является аккреция вещества на массивную черную дыру. Минимальный размер излучающей области в этом случае порядка гравитационного радиуса черной дыры:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где  $M$  — масса черной дыры. Максимальная светимость в этом случае обычно принимается равной эддингтоновскому пределу светимости (см. задачу 208):

$$L_{Ed} = \frac{4\pi GMc}{\kappa_T},$$

где  $\kappa_T$  — сечение томоновского рассеяния. Используя модель аккреции для квазара 3С 273, определить минимальную массу черной дыры и минимальное время переменности. Светимость квазара принять равной  $L = 10^{47}$  эрг/с.

324. Всегда ли степенной вид спектра свидетельствует о тепловом (например, синхротронном) природе излучения объекта?

325. Для анализа крупномасштабных свойств Вселенной часто используют функцию распределения числа радионисточников по потоку, которая представляет собой зависимость числа радионисточников  $N$ , имеющих поток меньше  $S$ , от величины потока  $S$ . Определить функцию распределения для случая, когда все источники радионизлучения распределены в пространстве однородно и изотропно и обладают одинаковой светимостью. Изменится ли функция  $N(S)$ , если светимости источников случайным образом отличаются?

У к а з а н и е: пространство считать евклидовым.

326. Как влияет космологическое красное смещение наблюдаемый вид спектра источника, если:

- а) собственный спектр источника чернотельный;
- б) спектр источника степенной?

327. Космологическое расширение Вселенной имеет ньютоновскую аналогию. Рассмотрите расширение однородного самогравитирующего шара плотностью  $\rho$  (шар можно рассматривать как часть однородной Вселенной). Найдите критическую плотность  $\rho_{кр}$  такую, что при  $\rho < \rho_{кр}$  шар будет расширяться до бесконечности, а при  $\rho > \rho_{кр}$  расширение обязательно сменится сжатием. Известно, что в момент времени  $t = t_0$  скорость расширения шара  $V_0$  связана с его радиусом соотношением:

$$V_0 = HR_0 \text{ и } \rho = \rho_0,$$

где  $H$  — аналог постоянной Хаббла. Найдите  $\rho_{кр}$  для  $H = 100 \text{ (км/с)/Мпс}$ .

328. Реликтовое излучение представляет собой чернотельное излучение с температурой  $T \approx 2,7 \text{ К}$ , равномерно заполняющее Вселенную. В то же время излучение звезд имеющих гораздо более высокие температуры ( $T \approx 10\,000 \text{ К}$ ) также образует электромагнитное фоновое излучение, а, как известно, планковские кривые не пересекаются, казалось бы, в любом диапазоне излучение звезд должно полностью «забивать» реликтовое излучение. Тем не менее в сантиметровом диапазоне реликтовое излучение было открыто. Объясните этот парадокс.

329 (И. Д. Новиков). Чему равен поток реликтового излучения через единичную площадку, расположенную межзвездном пространстве?

330. Пекулярное движение Земли относительно реликтового фона создает так называемую дипольную анизотропию реликтового излучения: в направлении на апекс движения из-за эффекта Доплера температура излучения несколько выше, чем в противоположном направлении. Разность температур в направлении на апекс и антиапекс оказалась равной  $\Delta T = 1,08 \cdot 10^{-2} \text{ К}$ . Чему равна пекулярная скорость Земли? Температуру реликтового излучения принять равной  $T = 2,7 \text{ К}$ .

331. Измеренный поток излучения от туманности Андромеды на частоте  $\nu = 1400 \text{ МГц}$  составляет  $175 \cdot 10^{-22} \text{ Вт/Гц}\cdot\text{м}$ . Принимая спектральный индекс излучения туманности равным  $\alpha = -1$ , определить, во сколько раз излучение в диапазоне  $1 \text{ см} - 10 \text{ см}$  меньше ее болометрического излучения,

определенного с помощью табл. 1. Воспользоваться данными табл. 3 (см. Приложение III). Найти для этой туманности отношение  $M/L_\odot$  в солнечных единицах.

332. Синхротронные потери излучения электронов определяются формулой

$$\frac{dE}{dt} = -1,6 \cdot 10^{-15} \epsilon^2 H^2 \text{ эрг/с},$$

где  $\epsilon = E/m_e c^2$ . Найдите связь между временем существования релятивистской частицы и ее энергией. Оцените характерное время синхротронных потерь для электрона с энергией  $E = 10^{12} \text{ эВ}$ , движущегося в магнитном поле с напряженностью  $H = 10^{-4} \text{ Э}$ . В какой области спектра излучает такой электрон?

333. Два квазара разделены угловым расстоянием в  $1''$ . При какой массе они могли бы быть гравитационно связанными, если их красные смещения равны  $z_1 = 0,436$  и  $z_2 = 0,437$ ? Постоянную Хаббла принять равной  $H = 100 \text{ (км/с)/Мпк}$ .

334. Если между квазаром и нами по лучу зрения расположена галактика, то возможен эффект гравитационной линзы — в поле тяготения галактики световые лучи искривляются. Это может привести к появлению дополнительных изображений самого квазара. Рассчитайте вероятность того, что на луче зрения «мы — квазар» окажется галактика. Красное смещение квазара равно  $z = 0,5$ . Размер галактики принять равным  $2R = 20 \text{ кпк}$ , а плотность числа галактик  $n = 1 \text{ Мпк}^{-3}$  (постоянная Хаббла  $H = 100 \text{ (км/с)/Мпк}$ ).

335. В моделях активных ядер галактик и квазаров, предполагающих наличие массивной черной дыры, рассматривается следующий физический процесс: разрыв нормальных звезд приливным воздействием черной дыры (аккреция вещества разрушенной звезды приводит к поддержанию активности квазара). Определите максимальную массу черной дыры, способной разрушать звезды типа Солнца.

Сравните ответ с задачами 353 и 375.

336. В скоплениях галактик, богатых горячим газом, в результате комптоновского рассеяния «холодные» кванты реликтового излучения приобретают энергию от «горячих» электронов межгалактического газа. В результате спектр реликтового излучения искажается, так что при наблюдении реликтового фона в сантиметровом диапазоне в направлении скопления антенная температура оказывается ниже,

чем в других направлениях (эффект Сюняева — Зельдович). Какого знака должна быть величина эффекта  $\Delta T$  при приближении в «виновской» области спектра реликтовых фонов?

337. При движении точечной тяготеющей массы  $M$  среде с плотностью  $\rho$  и характерной дисперсией скорости  $\Delta v$  на тело действует сила динамического трения (С. Ч. Драсекар, 1943). Появление этой силы легче всего понять в системе отсчета, связанной с массой  $M$  (см. рис. 37). Частицы среды под действием силы притяжения искривляют свои траектории таким образом, что позади тела плотности больше, чем впереди. Избыток «плотности» посредством тяготения тянет тело назад (рис. 37). Если скорость тела  $u \gg \Delta v$ , сила динамического трения будет равна

$$F_{\text{дин}} = \alpha \rho v^2 \sigma_0, \quad \sigma_0 = \pi \left( \frac{2GM}{v^2} \right)^2,$$

где безразмерный коэффициент  $\alpha \approx 1$ ,  $\sigma_0$  — сечение гравитационного взаимодействия. Определить, влияет ли существенно динамическое трение на движение шаровых скоплений в нашей Галактике. Принять среднюю плотность «звездной» среды  $10^{-23}$  г/см<sup>3</sup>, скорость движения скопления  $v = 300$  км/с, а его массу  $M = 10^6 M_{\odot}$ .

У к а з а н и е: считать, что динамическое трение оказывает влияние, если за время жизни Галактики скорость шарового скопления уменьшается вдвое.

## ГЛАВА XI

### СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА. ПЛАНЕТЫ И ИХ СПУТНИКИ

338. Почему в первой четверти освещенность от Луны более чем в 2 раза слабее, чем в полнолунии?

339. Оцените отношение орбитального момента Юпитера к вращательному моменту Солнца. Для Солнца вращательный момент оценивать в предположении его однородности. Считать, что Солнце вращается как твердое тело угловой скоростью, наблюдаемой на экваторе Солнца. Возьмите табличными данными.

340. Чем обусловлено расширение спектральных линий, образующихся в атмосферах планет (сравните со звездными спектральными линиями)?

341. Можно ли определить направление вращения планеты с помощью радиолокационных наблюдений?

342. Найдите распределение плотности и давления в а-

тмосфере планеты, предполагая, что перенос тепла в ней осуществляется конвективными движениями. Средняя молекулярная масса  $\mu$ , ускорение силы тяжести  $g$ . У поверхности давление и плотность газа равны соответственно  $P_0$  и  $\rho_0$ .

343. Решите предыдущую задачу для случая изотермической атмосферы. Какое из двух приближений — адиабатическое или изотермическое — лучше описывает реальные атмосферы планет?

344. Во сколько раз магнитосфера Меркурия меньше магнитосферы Земли? Из измерений, проведенных на космических аппаратах, известно, что магнитный дипольный момент Меркурия в 2500 раз меньше земного. Экранирует ли магнитосфера Меркурия его поверхность от солнечного ветра?

345. На поверхности Венеры давление атмосферы достигает 100 атм. Чем в основном обусловлено столь большое отличие от земных условий: различием в плотности? температуре? молекулярной массе?

346. С какой скоростью будет падать парашютист в атмосфере Венеры, если известно, что на Земле эта скорость равна 5 м/с? Можно ли обойтись без парашюта?

347. При какой скорости движения в атмосфере Венеры самолет будет испытывать ту же подъемную силу, что и на Земле? Отношение плотностей в атмосфере Венеры и Земли равно  $\rho_V/\rho_{\oplus} = 100$ .

348. Синодический  $S$  и звездный период  $P$  вращения планеты, как известно, связаны соотношением

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} + \frac{1}{P},$$

где  $T$  — период обращения Земли вокруг Солнца. Влияет ли на эту связь наклон оси вращения к плоскости орбиты планеты?

349. С чем может быть связано отличие магнитных полей Земли и Венеры?

350. Чем определяется высота гор на планетах? Где горы, состоящие из одних и тех же пород, могут быть выше: на Земле или на Марсе?

351\* (Шварцман В. Ф.). Как известно, явление приливов на Земле обусловлено влиянием Луны и Солнца. Это влияние в данной точке поверхности Земли проявляется как колебание ускорения силы тяжести. Длительное измерение этих колебаний позволяет выявить различные гармоники с соответствующими временными переменности. Впол-

не естественно, что среди характерных периодов появляется, например, синодический период обращения Земли с носителем Луны или Солнца. Измерения показывают так: наличие колебания с периодом, равным звездным суткам. Объясните наличие этой гармоник.

352. Какова максимальная высота гор на поверхности Марса; Земли; Венеры; Луны? Теплота плавления скальных пород  $Q$ , ускорение силы тяжести  $g$ . Для численных расчетов принять  $Q=60$  кал/г для кварца.

353. Расстояние, начиная с которого притягивающее тело разрушает другое самогравитирующее тело, называемая приливным предельным радиусом  $R_0$  (около 1850 г). Найти приливный радиус  $R_p$  планеты для спутника с плотностью  $\rho_c$ . Радиус и плотность планеты соответственно  $R_n$  и  $\rho_n$ .

354. Найти приливный радиус Сатурна и сравнить с размером колец Сатурна.

355. Гигантский астероид с массой  $M_a$  и скоростью врезается в поверхность планеты. Определить максимальный угол схода оси вращения планеты. Момент инерции планеты  $I$ , радиус  $R$ , период вращения  $P$ .

356. Используя решение предыдущей задачи, оценить массу астероида, способного сдвинуть ось вращения Луны на  $1^\circ$ . Скорость астероида принять равной 70 км/с.

357. Почему у Луны не наблюдается эффект потемнения к краю?

358 \*. При падении метеорита на поверхность планеты или спутника образуется кратер диаметром  $D$ , который связан с кинетической энергией метеорита  $E$  соотношением

$$D = kE^{1/3},$$

где  $k$  — некоторая постоянная. Объясните это соотношение.

359 \*. Спутник Юпитера Ио вращается вокруг планеты внутри магнитосферы. Как известно, при движении проводника в переменном магнитном поле в нем возникает э. д. с. и соответственно электрический ток. Оценить э. д. индукции, если период обращения спутника  $P_c$ , его радиус  $R$ , а величина магнитного дипольного момента планеты. Считать, что ось диполя лежит в плоскости экватора вращения планеты, вращающейся с периодом  $P_n$ , а плоскость орбиты спутника совпадает с плоскостью экватора вращения планеты.

360. В магнитосфере Юпитера движется электрон энергией 5 МэВ. Определить, в каком диапазоне электр-

магнитных волн он излучает. Считать, что движение происходит в плоскости магнитного экватора на расстоянии трех радиусов планеты. Магнитный дипольный момент Юпитера равен

$$\mu = 4 \Theta \cdot R_{\text{д}}^3,$$

где  $R_{\text{д}}$  — радиус Юпитера.

361. Определить характерный размер магнитосферы Юпитера (в радиусах планеты), если магнитный дипольный момент планеты в  $10^4$  раз больше, чем у Земли. Размер земной магнитосферы равен  $8 R_{\oplus}$  (см. задачу 147).

362. Определить геометрическое альbedo для абсолютно белой ортотропной поверхности.

363. Принимая геометрическое альbedo равным 0,2, найти абсолютную величину  $g$  астероидов, имеющих диаметры 50, 20,5 и 2 км. Найти их звездные величины в среднем противостоянии, считая, что среднее значение большой полуоси орбиты для них равно 2,9 а. е.

364. Пользуясь данными табл. 4 и 5 Приложения III, найти звездную величину Марса в эпохи противостояний — среднего, афелийного, а также перигелийного.

365. Показать, что если площадка планеты имеет ту же поверхностную яркость, что и внефокальное изображение звезды  $m$ -й величины при диаметре изображения  $d''$ , то в стилибах эта яркость будет равна

$$B = \frac{47,2}{2,512^{m/d^2}}.$$

Определить отношение этой яркости к яркости выставленной рядом перпендикулярно к потоку абсолютно белой площадки.

366. Пользуясь данными, приведенными в табл. 4 и 5, определить, какой видимый блеск имел бы Юпитер, если бы он находился на орбите, занимаемой ныне Венерой, — в верхнем соединении, в квадратуре и в элонгации  $30^\circ$  от Солнца.

367. Определить максимальный эксцентриситет земной орбиты, при котором жизнь на ее поверхности в известной нам форме могла бы еще существовать.

368. Почему для оценки давления атмосферы планеты применяется барометр — anerоид, а не ртутный барометр?

369. Найти максимальное смещение спектральных линий, образующихся в атмосфере Марса, относительно теллурических линий в области  $7200 \text{ \AA}$ , когда Марс находится в квадратуре. Какое смещение при этом покажут линии солнечного спектра Марса?

370. Наклон линий солнечного спектра, наблюдаем в спектре восточного и западного краев Юпитера, указывает на скорость вращения 24,4 км/с (на экваторе). Определить радиус Юпитера, если наблюдаемый на экваторе его период вращения равен  $9^h 50,5^m$ .

371. Сравнить собственное тепловое излучение Венеры с падающим на нее солнечным излучением в трех длин волн:  $\lambda = 5$  мкм, 10 мкм и 15 мкм, принимая температуру Венеры равной 600 К. Для учета солнечного облучения инфракрасной области исходить из величины потока границе земной атмосферы  $F_\lambda = 4 \cdot 10^7$  эрг/(см<sup>2</sup>·с) на интервале длин волн  $\Delta\lambda = 1$  см при  $\lambda = 5$  мкм и применить формулу Рэлея — Джинса:

$$F_\lambda d\lambda \sim T\lambda^{-4} d\lambda.$$

Для излучения планет эта формула непригодна.

372. Если адиабатический градиент температуры для смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$  близок к 10 К на километр, то какова должна быть высота нижней границы облаков Венеры? Принять, что температура облачного слоя равна 235 К, а температура поверхности планеты 700 К. Во сколько раз изменится давление на этом интервале? Будут ли соответствовать этому выводимые из наблюдений давления — 170 мбар для уровня облаков и 70 кг/см<sup>2</sup> для поверхности планеты?

373. Исходя из давления у поверхности Марса 25 мбар найти, на какой высоте плотность атмосферы Марса становится больше плотности атмосферы Земли. Высоту однородной атмосферы Марса принять равной 11 км.

374. Определить радиус и среднюю температуру астероида Евгения по следующим исходным данным:  $A_r = 0,05$ ,  $q = 0,52$  ( $A_r$  — альbedo,  $q$  — фазовый интеграл). Расстояние от астероида до Солнца  $r = 2,6$  а. е., а расстояние до Земли  $\Delta = 1,62$  а. е. При этом были получены следующие значения звездных величин на длинах волн 10 мкм, 20 мкм:  $m_{10} = -0,32^m$  и  $m_{20} = -3,01^m$ . Эти величины имеют калибровку: звезде нулевой величины при 10 мкм соответствует поток  $1,14 \cdot 10^{-16}$  Вт·см<sup>-2</sup>·мкм<sup>-1</sup>, а при 20 мкм — поток  $8,07 \cdot 10^{-16}$  Вт·см<sup>-2</sup>·мкм<sup>-1</sup>. Солнечная постоянная равна  $Q = 1360$  Вт/м<sup>2</sup>.

375. Радиус Роша, рассчитанный в задаче 353, применим лишь к жидким телам (точнее, к телам, равновесие которых поддерживается за счет самогравитации). В твердых телах (таких, как астероиды или метеориты) равновесие обеспечивается кристаллической структурой. Определите максимальный размер каменистого спутника с плотностью  $\rho =$

$\approx 3$  г/см<sup>3</sup>, который не будет разрушен вблизи поверхности Земли. Внутренние силы сцепления спутника равны  $10^9$  дин/см<sup>2</sup>.

## ГЛАВА XII

### СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА. КОМЕТЫ, АСТЕРОИДЫ И МЕТЕОРНЫЕ ТЕЛА

376. Плотность частиц в хвосте кометы  $n = 10^1 - 10^2$  см<sup>-3</sup>. Голова кометы может достигать размеров Солнца, а хвост порой имеет длину более 1 а. е. Оцените длину свободного пробега в голове и хвосте кометы. Можно ли считать эти образования сплошной средой?

377\*. Во сколько раз реактивное ускорение кометы, обусловленное выбросом вещества в некотором направлении за счет накопленной солнечной энергии, эффективнее, чем прямая передача импульса за счет светового давления? Скорость выбрасываемого вещества  $v$ .

378. На рис. 40 показаны три траектории частиц кометного хвоста, по которым они движутся вокруг Солнца. Что можно сказать о величине  $R$  — отношении отталкивающей и притягивающей силы?

379. В некоторых хвостах комет эффективное ускорение в тысячи раз превосходит гравитационное ускорение. Рассчитайте окончательную скорость движения пылинки, начавшей свое движение с расстояния 1 а. е. от Солнца. Эффективное ускорение превосходит гравитационное в  $R = 1000$  раз.

380. Какова должна быть плотность кометного вещества, если предположить, что кометы имеют межзвездное происхождение и если исходить из того, что в среднем в Солнце каждый год «врезается» одна комета массой  $10^{12}$  г? (Такой поток массы примерно соответствует ежегодной потере солнечного вещества в виде ветра.) Принять, что относительная скорость комет и Солнца равна  $v_{\text{отн}} = 20$  км/с.

381. Какова вероятность столкновения орбитальной станции (сечение  $\sim 50$  м<sup>2</sup>) в течение 100 дней полета с метеорным телом, которое при входе в атмосферу Земли имело бы абсолютную звездную величину  $M \leq 5^m$ ? Известно, что

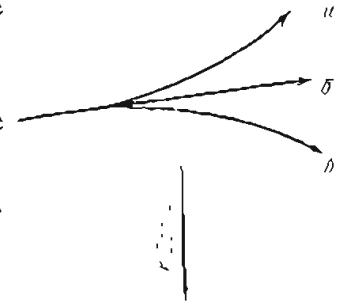


Рис. 40



суточное число метеоров ярче  $M \leq 5^m$  приблизительно равно  $2 \cdot 10^8$ .

382. Наблюдения метеора позволили определить скорость его входа в атмосферу Земли, которая оказалась равной 80 км/с. Что можно сказать о его происхождении?

383. Что произойдет с листком бумаги, брошенным орбитальной станцией?

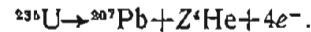
384. Скорости, с которыми метеориты входят в атмосферу Земли, достигают 70 км/с. Как известно, хаотическое движение молекул и ионов с такими скоростями соответствует температуре

$$T \approx \mu \frac{v^2}{3k} \approx 10^6 \text{ К},$$

где  $k$  — универсальная газовая постоянная,  $\mu$  — молекулярный вес,  $v$  — скорость. Однако температура метеора определенная по его спектру, соответствует  $T = 3000^\circ$ . Объясните столь низкое значение температуры.

385. Возраст метеоритов определяется по количеству продуктов распада того или иного радиоактивного элемента. Однако дело осложняется тем, что число радиоактивных атомов изменяется под воздействием космических лучей. Определить закон, по которому со временем меняется соотношение концентраций продуктов распада к концентрация распадающихся ядер.

386. Оценить возраст Земли  $t_{\oplus}$ , рассматривая распад урана:



Период полураспада  $t_{1/2} = 7,1 \cdot 10^9$  лет. Измерения дают соотношение числа распавшихся атомов к числу оставшихся атомов этого изотопа урана 15,73:0,0725.

387. Метеорит с плотностью  $\rho_m$  и поперечником  $R$  влетает в атмосферу Земли, которую в данной задаче будем рассматривать как однородный слой с характерным размером, равным высоте однородной атмосферы  $H$ . Найдите какого размера должен быть метеорит, чтобы он, пролетев над поверхностью Земли, вновь ушел в космическое пространство. Эффектами нагревания и разрушения метеорит пренебречь.

388. Зависит ли длина пути торможения тела, влетающего в атмосферу Земли, от его начальной скорости, если последняя значительно превосходит вторую космическую скорость? (Сравните с предыдущей задачей.)

389\*. Пусть длина метеоритного слоя в афелии ( $r = r_a$ ) равна  $l_a$  и значительно меньше самого афелийного расстоя-

ния. Как зависит длина метеорного роя от расстояния до Солнца при движении роя по орбите?

390. Пылинка движется по круговой орбите вокруг Солнца. Из-за давления света эффективная сила притяжения оказывается уменьшенной. Будет ли изменяться момент импульса пылинки относительно Солнца?

391. Исходя из среднего размера головы кометы  $D = 50\,000$  км и ее массы  $10^{16}$  г, оценить среднюю плотность вещества в ней на периферии головы и вблизи центра на расстоянии 5000 км. Считать, что скорость истечения вещества вдоль хвоста не меняется.

392. Масса пылевого хвоста кометы Мркоса 1957 г. была равной  $2 \cdot 10^{14}$  г. Считать, что длина видимого хвоста равна



Рис. 41

$12^\circ$  на расстоянии 1,1 а. е., аппроксимируя комету конусом и взяв отношение поперечного размера к продольному из рис. 41, вычислить среднее расстояние между пылинками. Радиус пылинки  $a = 0,3$  мкм и плотность  $\rho_p = 2,8$  г/см<sup>3</sup>.

393. Из ядра кометы выбрасывается в сторону Солнца со скоростью  $v_0$  частица, испытывающая отталкивающее ус-



коренне  $1-\mu$ . Найти максимальное расстояние  $\xi$ , на которое частица удалится от ядра. Расстояние до Солнца

394. У кометы Мркоса 1957 г. максимум яркости паралической головы кометы в лучах NaI соответствовал расстоянию  $\xi = 2000$  км от ядра в сторону Солнца, когда комета была на расстоянии  $r = 0,58$  а. е. от Солнца. Отталкивающее ускорение для атомов Na составляет  $1-\mu = 55$ . Определите скорость выброса частиц из ядра.

395. Метеорный поток Леонид, регистрируемый сейчас около 17 ноября, наблюдался арабами в 902 г. н. э. около 23 октября. Небольшая часть этого сдвига во времени обусловлена реальными изменениями орбиты Леонид. Причина главной части сдвига лежит гораздо ближе к нас. Какова она?

396. Устойчивое эхо от метеорного следа наблюдало на волне 8 м в течение 30 секунд при дальности отражающего следа 180 км. Одновременные визуальные наблюдения показали пролет метеора на высоте  $30^\circ$  от горизонта. Найти ограничение на линейную электронную концентрацию следа и подсчитать мощность эха, если мощность передатчика 100 кВт, а коэффициент направленности антенны  $G = 5$ .

397. Наблюдатель регистрирует в среднем 10 метеоров час в пределах поля зрения  $60^\circ$ , что дает на высоте 80 м площадь  $5000$  км<sup>2</sup>. Определить общее число метеоров, видимых на всей Земле за сутки. Определить размеры метеорных тел для звездной величины  $m = 0^m, 4^m, 12^m$  и  $14^m$ , полагая их плотность равной  $3$  г/см<sup>3</sup>.

398. Закон распределения числа метеорных частиц по размерам имеет вид

$$n(a) da = n(a_0) \left(\frac{a}{a_0}\right)^B da.$$

Как выглядит закон распределения по массам частиц?

399. Для ускорения космических аппаратов иногда применяют следующий эффект. Траектория аппарата выбирается таким образом, что при пролете мимо одной из планет он приобретает дополнительную скорость. Объясните этот эффект с точки зрения законов сохранения энергии и импульса.

400. Чем обусловлено равновесие как отдельного тела а) метеорита; б) астероида; в) планеты; г) нормальной звезды; д) белого карлика?

(Имеется в виду то обстоятельство, что тело не коллапсирует и не разрушается.)

1. Ответ: в центре виефокального изображения появляется темное круглое пятно. Такое пятно, например, можно увидеть при наблюдениях в телескоп-рефлектор, где роль экрана играет вторичное зеркало. Фокальное изображение станет менее ярким, но не менее резким.

2. Ответ: полагая средний диаметр Луны равным  $30'$ , получим, что фокусное расстояние равно  $5,7$  м. Для более точного определения фокусного расстояния необходимо знать положение Луны на ее орбите, поскольку эксцентricность ее орбиты приводит к изменению углового диаметра на  $\sim 1/7$  часть. Для иллюстрации на рис. 42 показаны снимки Луны, полученные в перигее и апогее на одном и том же телескопе.

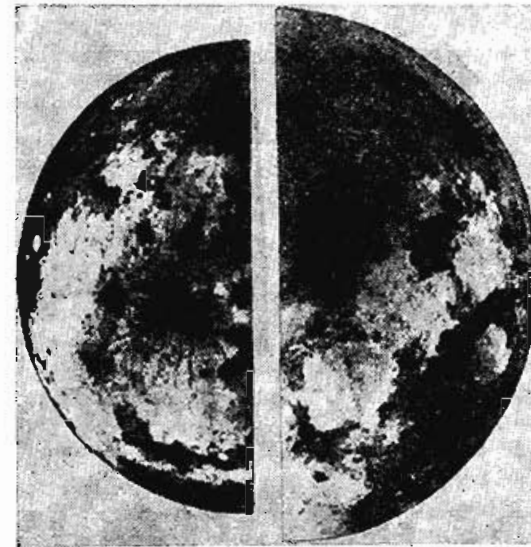


Рис. 42

3. Ответ: либо телескоп является рефрактором, либо рефлектором с четным числом зеркал.

4. Ответ: да, по определению.

6. Ответ: можно получить увеличение в 7,5 раз; при эи внутри нормального зрачка будет попадать ~10% света, перехватыва мого объективом.

6. Ответ: выходной зрачок расположен на расстоянии  $x$  (рис. 43), равном

$$x = f \left( 1 + \frac{f}{F} \right).$$

7. Ответ: фокусное расстояние окуляра, соответствующее равн ярчковому увеличению, равно 9 см. Начиная с увеличения в 60 р окуляр Рамсдена не сможет показывать весь диск Луны.

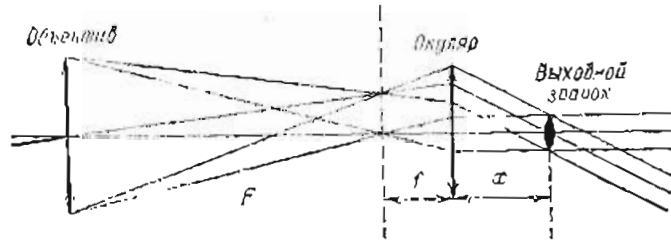


Рис. 43

8. Ответ: изображение Солнца в фокусе такого телескопа буд иметь диаметр 55 см.

9. Ответ: линейные размеры равны соответственно: для Луны 17,2 см; для Юпитера — 4,3 мм; для Марса — 0,82 мм.

10. Ответ: шаг винта микрометра необходимо выбрать равн 0,36 мм.

11. Ответ: да.

12. Ответ: фокусное расстояние окуляра необходимо выбра равным 24 см; эквивалентное фокусное расстояние 125 см; отношен диаметра к фокусу равно 2. Поле зрения у такой системы состав ляет 6°. Такое поле зрения ни один из трех типов окуляров не мож обеспечить.

13. Ответ:  $10 \text{ дб} = 2,5^m$ .

14. Ответ: светосила телескопа менее 1/15.

15. Ответ: оптическая мощь телескопа пропорциональна соо ветственно в случаях.

а)  $\sim D^2$ ;

б)  $\sim (D/F)^2$ ;

в)  $\sim D^2/F$ .

16. Ответ: необходимо удалить слой стекла толщиной  $\Delta$ , рав ной (см. КПА)

$$\Delta = \frac{D}{(n-1) 2048 m^3} \approx 0,29 \text{ мм.}$$

17. Ответ: а) да; б) нет.

18. Ответ: максимальный размер поля зрения равен  $\sim 30$

19. Ответ: изменение фокусного расстояния равно

$$\Delta F = \alpha \Delta T / (n-1).$$

При нагревании фокус увеличивается.

20. Ответ: светосила «сплошного шмидта» больше в  $n$  раз ( $n$  сколько светосила пропорциональна углу сходимости лучей в фокусе

21. Ответ: для непросветленной оптики потери составляют 12,3%, а для просветленной — 13,8%.

22. Ответ: при фотографировании протяженных объектов или больших областей неба более удобен телескоп системы Ричи — Креть ена, поэтому его необходимо применять в случае а). Для случая б), в особенности при наблюдениях с ФЭУ, не требуется большое поле зре ния и можно воспользоваться телескопом системы Кассегрена.

23. Ответ: а) околополярная область; б) область вблизи зенита.

24. Ответ: фокус первой линзы К8 равен  $0,44F$  (где  $F$  — фо кусное расстояние объектива). Разность кривизн

$$C_1 = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = 4,40.$$

фокус второй линзы Ф4 равен  $-0,788 F$ , а разность кривизн

$$C_2 = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = -2,04.$$

Такой объектив для линий С и F будет уничтожать хроматическую абер рацию.

25. Ответ: отличие глубины параболоида от сферы равно

$$MM' = \frac{1}{64} \frac{y^4}{F^3}.$$

26. Ответ: светосила телескопа должна удовлетворять следую щему неравенству:

$$(F/D) \geq \left( \frac{D}{5 \lambda} \right)^{1/3}.$$

Полробнее см. КПА.

27. Ответ: при произвольном угле падения  $l$  сдвиг равен

$$\left( 1 - \frac{\cos l}{\sqrt{n^2 - \sin^2 l}} \right) \delta.$$

В рассматриваемом случае искривление поля зрения равно 0,006  $\delta$ .

28. Ответ: 1) дифракция света на краю объектива; 2) рассея ние на пылинках, дефектах полировки и пузырьках в оптике; 3) рассе янный свет неба; 4) свет, отраженный от задней, а затем от передней поверхностей объективной линзы; и, наконец, самое главное — 5) изо бражение самого Солнца. В космосе достаточно поставить экран «ис кусственная Луна» на некотором расстоянии перед объективом.

29. Ответ: фокусные расстояния трех линз равны соответствен но, 220 см, 10 см и 15 см. Величина сферической аберрации равна 2,2°.

30. Ответ: область пропускания в случае а) примерно равна 2000—2700 мкм; в случае б) совпадает с областью пропускания КС 14. Линию  $L_\alpha$  можно наблюдать через стекло СЗС 21.

31. Ответ: фокус камеры спектрографа 5 м, фокус коллиматора принимаем равным этой же величине. Диаметр коллиматора 3,3 см, длина ребра призмы 6,3 см. Диаметр камеры 3,3 см.

32. Ответ: разрешающая сила спектрографа равна  $R = 1,35 \cdot 10^4$ .

33. Ответ: в трех предложенных случаях будет проникать соот ветственно 20%, 10% и 5% света.

34. Ответ: дифракционная решетка должна иметь 490 штрихов; при этом расстояние между линиями патриа равно 0,3 мм.

35. Ответ: общая длина спектра в третьем порядке видимого излучения равна  $2 \times 14,4$  м; разрешающая сила  $R = 7,8 \cdot 10^4$  дисперсия 0,7 А/мм.

36. Ответ: пластинка покрывает на небе площадь  $11,9^\circ \times 11,9^\circ$  линейная дисперсия вблизи линии  $H_\gamma$  равна 1060 А/мм.

37. Ответ: поправка равна  $11^\circ 24,02'$ .

38. Ответ: из-за уменьшения дисперсии в красной области при уменьшении дисперсии не компенсируется падением чувствительности фотомультипликатора в красной области).

39. Ответ: края должны быть параллельны друг другу с точностью 0,05 мкм.

40. Ответ: в радиодиапазоне относительная ширина полосы пропускания  $\Delta\lambda/\lambda \approx 7 \cdot 10^{-4}$ , что немного больше, чем в оптическом диапазоне ( $\Delta\lambda/\lambda = 3 \cdot 10^{-4}$ ).

41. Ответ: наилучшее угловое разрешение равно

$$\frac{\lambda}{2R_\oplus} \approx 0,018''$$

а погрешность согласования должна быть не хуже  $10^{-3}$  с.

42. Ответ: на рис. 44 показано перемещение  $T$ -образной антенны, вызванное вращением Земли. В точках  $A$  и  $B$  короткая сторона антенны (основание буквы  $T$ ) расположена

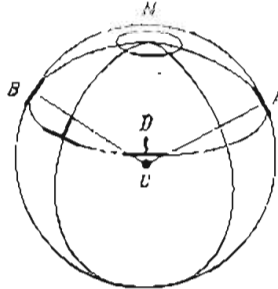


Рис. 44

вдоль одного и того же большого круга в плоскости  $CAV$ . Длинная же сторона в точке  $B$  параллельна своему положению в точке  $A$  и обе перпендикулярны к положению в точке  $D$ . Это означает, что по мере вращения Земли антенна «разрезает» источник по различным позиционным углам. Попробуйте вывести соответствующие формулы.

43. Ответ: отличие будет равно: а)  $0,050^m$ ; б)  $0,075^m$ ; в)  $0,100^m$ .

44. Ответ: полный поток, излучаемый площадкой, равен  $(2/3)\pi S B_\nu$  (см. «Энциклопедия космоса» и Соболев, 1985).

45. Ответ: для описания поля излучения достаточно одного понятия интенсивности. Фактически задание поверхностной яркости эквивалентно заданию граничного условия для нахождения поля излучения.

46. Ответ: пока фонарь имеет угловые размеры, доступные разрешению глаза, глаз воспринимает поверхностную яркость в качестве меры блеска; поверхностная яркость не зависит от расстояния.

47. Ответ: оптика не меняет интенсивности излучения. В этом можно убедиться, рассмотрев, например, уравнение переноса. Однако в среде с показателем преломления, не равным единице (например, внутри льда), интенсивность меняется (см. Соболев, 1985).

48. Ответ: поверхностная яркость Солнца  $1,63 \cdot 10^8$  нит, а Луны —  $4 \cdot 10^3$  нит.

49. Ответ: поток солнечного излучения (на  $1 \text{ см}^2$ ) равен

$$\frac{1}{4} \sigma T_\odot^4 (D/F)^2, \quad D/F \ll 1.$$

50. Ответ: максимальная температура равна  $T = \frac{T_\odot}{2} \sqrt{Y/m}$ ,

$m \gg 1$ .

51. Ответ: максимальная температура равна эффективной температуре Солнца. Это следует, например, из термодинамических соотношений с учетом ответа к задаче 47 или из решения двух предыдущих задач.

52. Ответ: освещенность от Луны будет равна 0,044 лк.

53. Ответ: а) да; б) нет.

54. Ответ: число квадратных градусов во всей сфере  $4\pi: (\pi/180)^2 = 41252,96$  кв. градусов;

55. Ответ: соответственно  $25^m$  и  $5^m$ .

56. Ответ: разность величин составляет 0,02 $^m$ .

57. Решение. Освещенность от ночного неба на дне фабричной трубы равна

$$F = \frac{\pi D^2}{4H^2} B \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ лк.}$$

Вега создает освещенность  $1,87 \cdot 10^{-4}$  лк, т. е. примерно в 10 раз больше.

58. Решение. Очевидно, все реально существующие колодцы и трубы дают поле зрения, заведомо большее угловой минуты. Так как угловое разрешение глаза порядка  $1'$ , то, «влезая» в колодец, мы не улучшаем существенно отношение сигнала к шуму в пределах видимого размера звезды. Однако в условиях темноты резко возрастает чувствительность глаза и он способен уловить сигнал, превышающий шум всего лишь на 5%. Яркость неба, приведенная в условии задачи, соответствует  $-5,2^m$  с 1 квадратной минуты, а 5% этого значения дает предельную видимую днем звездную величину, т. е.  $-1,9^m$ . Учитывая, что у людей с острым зрением угловое разрешение может быть в 2 раза лучше принятого, значение предельной величины получаем близким к  $0^m$ . Это уже означает, что в принципе можно было бы видеть Арктур ( $-0,1^m$ ), Капелла ( $-0,7^m$ ) и Сириус ( $-1,4^m$ ) (не говоря уже о планетах, таких как Венера (от  $-3,3^m$  до  $-4,4^m$ ), Марс (от  $-1,1^m$  до  $-2,8^m$ ) и Юпитер (от  $-1,4^m$  до  $-2,5^m$ )). Однако вероятность того, что в поле зрения трубы или колодца с относительно небольшим отверстием, достаточным для адаптации глаза, случайно попадет столь яркая звезда или планета, исчезающе мала. Так что сообщения о возможных наблюдениях звезд днем из колодца являются следствием недоразумения. Вполне возможно, что ряд «наблюдателей» принимали за звезды частички пыли или сажи, колеблющиеся в створе колодца или трубы. Более подробное обсуждение этих вопросов можно прочесть в Quart. J.R.A.S., 1983, v. 24, p. 3.

59. Ответ: нет, учитывая широту места наблюдения.

60. Ответ: предельная звездная величина равна: а)  $-5,5^m$ ; б)  $-2,2^m$  и в)  $3,0^m$ .

61. Ответ: освещенность с учетом поглощения в атмосфере равна  $5 \cdot 10^{-11}$  лк, а звездная величина  $m = 10,3$ .

62. Решение. Максимум солнечного спектра приходится на длину волны 4600 Å. Это означает, что мы видим предметы, отражающие кванты, излученные в области спектра близкой к Рэлей-Джинсовской области, где интенсивность излучения падает с ростом длины волны. Глаз это падение компенсирует ростом чувствительности. Ночью же глаз должен фиксировать предельно слабые потоки и поэтому подстраивается к максимуму спектра.

63. Ответ: телескоп улучшает их видимость за счет увеличения видимого размера.

84. Ответ: минимальное количество энергии с учетом временного разрешения глаза 0,15 с равно  $3 \cdot 10^{-11}$  эрг (предельная звездная величина прячется равной 6<sup>m</sup>).

85. Ответ: экспозиция изменится соответственно в 2,7 раз, 9,2 раза и в 45 раз.

86. Ответ: предельная звездная величина пластинок увеличится на  $p$  звездных величин.

87. Ответ: фотоэмульсия, соответствующая штрихпунктирной линии, проявливается оптимальным условиям в 4 раза, а соответствующая сплошной линии — в 4000 раз (рис. 8).

88. Решение. Вуаль, вызванная фоном неба, появится на фотопластинке тем раньше, чем больше светосила камеры. Можно воспользоваться приближенной формулой (КОА), пригодной для эмульсии с очень высокой чувствительности:

$$\lg t_{\max} = 0,6 - 2,325 \lg (D/F),$$

где  $t_{\max}$  выражено в минутах. Это дает для 5-метрового телескопа 64 мин, а для 6-метрового телескопа — 1 час 40 мин. В действительности формула не учитывает очень многих факторов и дает лишь приближенную оценку. Например, реально для 6-метрового телескопа время  $t_{\max} \approx 40^m$ .

89. Ответ: нужно выбрать фотоэмульсию с параметрами, соответствующими случаю в).

70. Ответ: яет, поскольку квантовый выход прибора характеризует отношение полезной информации на выходе к информации на входе прибора.

71. Ответ: в случае а) необходимо увеличить время экспозиции в 2,512 раза, а в случае б) — в  $(2,512)^2$  раз.

72. Ответ: необходимое время накопления  $t$  равно

$$t = \frac{2n_1 - n_2}{n_2^2 e^2}.$$

78. Ответ: если не применяется дополнительный возвратный потенциал (под действием которого все электроны летят в одну и ту же сторону), максимальный квантовый выход оказывается равным 1/2.

74. Ответ: величина фототока равна для звезды 7-й величины  $3,8 \cdot 10^{-6}$  мА; для звезды 10-й величины —  $2,4 \cdot 10^{-7}$  мА и для звезды 15-й величины —  $2,4 \cdot 10^{-8}$  мА.

75. Ответ: квантовый выход катода, характеристики которого приведены на рис. 9, оказывается равным 9%.

76. Ответ: время накопления, требуемое заданной точностью, равно 24,4 мин.

77. Ответ: селеновый элемент даст фототок, величина которого равна  $6,3 \cdot 10^{-7}$  мА.

78. Ответ: в энергетических единицах освещенность для трех перечисленных температур будет равна соответственно:  $2,8 \cdot 10^4$  эрг/(см<sup>2</sup>·с),  $2,8 \cdot 10^2$  эрг/(см<sup>2</sup>·с) и  $2 \cdot 10^{-2}$  эрг/(см<sup>2</sup>·с).

79. Ответ: минимальный диаметр телескопа равен: а) 7,3 м; б) 3,2 м; в) 2,3 м.

80. Ответ: предельная мощность сигнала, обнаруживаемого приемником, равна  $8 \cdot 10^{-12}$  Вт =  $8 \cdot 10^{-9}$  эрг/с.

81. Ответ: приведенная чувствительность соответствует предельной звездной величине 30,1<sup>m</sup>.

82. Ответ: мощность энергии, выделяемой на сопротивлении, равна  $1,5 \cdot 10^{-16}$  Вт.

83. Ответ: для Веги светимость равна  $3 \cdot 10^{33}$  эрг/с, для рентгеновского источника Sco X-1 —  $5 \cdot 10^{37}$  эрг/с, а для источника радиоизлучения Cyg A —  $10^{46}$  эрг/с.

84. Ответ: светимость источника в три раза превосходит светимость Солнца, т. е. примерно равна  $1,2 \cdot 10^{34}$  эрг/с.

85. Ответ: в спектре звезды класса B2e имеются эмиссионные линии; звезды B0k — хорошо заметные линии Ca II H и K; A4s — заметны особенно резкие линии; звезда сA4 имеет особенно тонкие и темные линии.

86. Ответ: на рис. 45 прямая 2 соответствует наблюдению в горлах. Если продолжение пересекается с осью ординат в той же точке, что и заданная прямая 1.

87. Ответ: в зените звездная величина Арктура  $m(z=0) = 0,044$ ; вне атмосферы  $m_{\infty} = -0,212 \pm 0,002$ . Знаменатель коэффициента прозрачности для приведенных наблюдений  $\rho = 0,79$ .

88. Ответ: оптическая толщина атмосферы для визуальных наблюдений  $\tau = 0,21$ .

89. Решение. Оптическая толщина атмосферы равна

$$\tau = \int_0^{\infty} \sigma_T \frac{\rho}{m_p} \mu_c dh = \frac{\mu_c \sigma_T \rho_0}{m_p} \int_0^{\infty} e^{-\frac{h}{H}} dh = \frac{\mu_c \sigma_T \rho_0}{m_p} H,$$

где  $m_p$  — масса протона,  $\mu_c$  — среднее число нуклонов на один электрон. Полагая  $\mu_c = 2$ , получим  $\tau \approx 300$ .

90. Ответ: такой ход температуры соответствует адиабатической модели атмосферы (см. задачу 342).

91. Ответ: поверхностная яркость ночного неба в линии  $\lambda = 5577 \text{ \AA}$  равна  $10^{-9}$  сб.

92. Решение. Рассеянное излучение, имея равновесный спектр (или по крайней мере близкий к равновесному), сильно неравновесно из-за дилуции (разрежения). В этом легко убедиться, подсчитав эффективную температуру «комнатного» рассеянного света, которая характеризует плотность энергии излучения. Действительно, эффективная температура (без учета поглощения в атмосфере) равна

$$T_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{a}} T_{\odot} \approx 280 \text{ К.}$$

где  $a$  — большая полуось орбиты Земли. Как видим,  $T_{\text{эф}}$  много меньше  $T_{\odot} = 5785 \text{ К}$ . Последняя температура в данном случае описывает спектральное распределение.

93. Ответ: константа Клинга  $K = 1,08^m \pm 0,04^m$ .

94. Ответ: степень поляризации выражается через гиперболический тангенс величины  $\Delta m_p$ , взятой с некоторым коэффициентом, а именно:

$$P = \tanh(0,461 \Delta m_p).$$

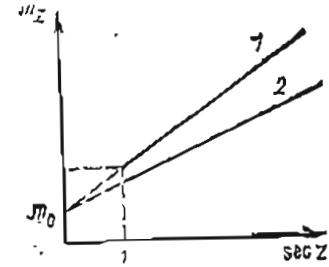


Рис. 45

95. Ответ: средняя звездная величина, соответствующая среднему энергетическому потоку от звезды, будет равна

$$\Delta \bar{m} = -2,5 \lg \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{-\frac{\Delta m_i}{2,5}}.$$

В пределе малых  $\Delta m_i$  получаем приближенно

$$\Delta \bar{m} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta m_i.$$

96. Ответ: интегральный поток с единицы площади (закон Стефана — Больцмана) равен

$$F = \frac{2\pi^5}{15} \frac{kT^4}{h^3 c^2}.$$

а закон смещения Вина имеет вид

$$\lambda_{\max} = \frac{0,2014hc}{kT} = \frac{0,288 \text{ см} \cdot \text{К}}{T}.$$

97. Ответ: очевидно, интегральный поток излучаемой энергии не зависит от того, какой функцией мы пользуемся. Однако изменится постоянная в законе смещения Вина, а именно, для функции  $B_\nu$ :

$$\lambda_{\max} = \frac{0,510 \text{ см} \cdot \text{К}}{T}.$$

98. Ответ: интенсивность излучения в максимуме функции Планка равна

$$B_\lambda(\max) = 210,57 \frac{h^5}{h^4 c^5} T^5.$$

99. Ответ: отношение предложенных величин для двух звезд равно: а) 16; б) 0,5; в) 32; г) 2.

100. Ответ: спектр в вишневой области имеет вид

$$N(E, T) \sim E^2 e^{-E/kT}.$$

101. Ответ: закон смещения Вина для функции  $N(E, T)$  имеет вид

$$E_{\max} = 1,594 kT.$$

102. Ответ: яркостная («черная») температура связана с истинной температурой  $T$  соотношением

$$T_s = \frac{T}{\left(1 - \frac{kT\lambda}{hc} \ln a\right)},$$

где  $a$  — функция поглощения (см. К(Л)).

103. Решение. Нет, поскольку в Рэлеи-Джинсовской области спектра его наклон практически не зависит от температуры.

104. Ответ: освещенность, создаваемая звездой вблизи Земли в диапазоне длин волн  $d\lambda$ , есть

$$dF_\lambda = 2\pi \frac{R^2}{D^2} \frac{hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1}.$$

105. Ответ: ошибка определения температуры звезды в двух приведенных случаях будет соответственно равна 40 К и 320 К.

106. Ответ: радиометрическая величина Солнца  $m_r = -27,21$ .

107. Ответ: яркостная температура радиогалактики Лебедь А равна  $1,5 \cdot 10^9$  К.

108. Ответ: результат не искажается в случае а) и искажается в случае б).

109. Ответ: расширение линий связано в большинстве случаев с тепловым движением излучающего газа. Так как скорость теплового движения пропорциональна корню из температуры, то относительная ширина линии

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \sim T^{1/2}.$$

Это означает, что чем горячее источник, тем сильнее сказывается изменение уровня непрерывного спектра на ширине линии.

110. Ответ: яркостная температура  $T_s$  связана с длиной волны соотношением

$$T_s \sim \lambda^2 - \alpha.$$

111. Ответ: размер первой зоны Френеля для дифракции на лунном крае равен  $\sim 10$  м.

112. Решение. Характерное линейное расстояние между максимумами дифракционной картинки на поверхности Земли равно 10 м (см. предыдущую задачу). Тень пробегает по поверхности Земли со скоростью порядка 1 км/с. Временное разрешение должно быть по крайней мере в несколько раз меньше, чем время пролегания дифракционной картины между двумя максимумами, т. е.  $< 10^{-3}$  с.

113. Ответ: эффективная температура звезды равна  $T = 3700$  К.

114. Ответ: предельное разрешение для методов а) и б) ограничено дифракционным пределом телескопа или интерферометра: для метода а) угловое разрешение ограничено фотометрической точностью наблюдения дифракционной картины.

115. Решение. Угловой диаметр звезды примерно равен  $0,001''$ . Чтобы обнаружить темную полосу, необходимо по крайней мере разрешить диаметр звезды. Так как предельное разрешение интерферометра равно (см. КОА)

$$d'' = \frac{6,7}{D(\text{см})},$$

то необходима база  $D > 57$  м. Луной воспользоваться нельзя, а астероидом можно.

116. Ответ: релятивистский поперечный эффект Доплера, соответствующий скорости 30 км/с, равен  $0,0015$  км/с, т. е. в случае а) его считать не надо; в случае б) он становится уже значительным —  $0,150$  км/с.

117. Ответ: линия  $H_\gamma$  сместится в линейной мере на  $0,003$  мм, в шкале длин волн — на  $0,15 \text{ \AA}$  и в шкале лучевых скоростей — на  $10,2$  км/с.

118. Ответ: погрешность измерения лучевой скорости равна  $3$  см/с.

119. Ответ: запуск геофизической ракеты по крайней мере на порядок энергетически выгоднее, чем запуск спутника на орбиту той же высоты.

120. Ответ: энергия уходит на поднытие топлива и диссипирует в тепло.

121. Ответ: для однозначной локализации гамма-всплеска необходимо по крайней мере три космических аппарата. При этом, конечно, остается неопределенность, связанная с точностью определения момента прихода импульса — «квадрат ошибки».

122. Ответ: время накопления, найденное из того условия, что отношение сигнала к шуму будет порядка единицы, равно (см. задачу 72)

$$t \approx 5,5 \text{ ч.}$$

123. Ответ: гораздо меньше  $1,22 \lambda/D \approx 0,013''$ . В действительности планируется стабилизация на уровне  $0,002''$ .

124. Ответ: радиус Солнца равен  $6,94 \cdot 10^{10}$  см.

125. Решение. Блеск Солнца изменится крайне слабо, так как пятна окружены более горячими (по сравнению со средней температурой фотосферы) и, следовательно, более яркими областями. Эти области компенсируют уменьшение светового потока в пятне. По этой причине солнечная постоянная мало зависит от количества солнечных пятен.

126. Ответ: разность длин волн на разных краях Солнца

$$\Delta \lambda = \frac{2\omega R_{\odot}}{c} \lambda \cos \varphi \approx 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ \AA.}$$

Для того чтобы линейное расстояние между линиями соответствовало приведенному, необходимо наблюдать в 10-м порядке спектра.

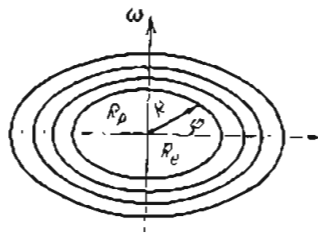


Рис. 46

127. Решение. Поверхность Солнца представляет собой поверхность равного потенциала гравитационных и центробежных сил  $\Phi$  (см. рис. 46). Если считать массу сосредоточенной в центре (приближение Роша), то потенциал имеет вид

$$\Phi = -\frac{GM}{R} - \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \cos^2 \varphi.$$

Приравняв значения  $\Phi$  на полюсе и на экваторе, получаем

$$\frac{GM}{R_p} = \frac{GM}{R_e} + \frac{1}{2} \omega^2 R_e^2.$$

где  $R_e$  и  $R_p$  — экваториальный и полярный радиусы Солнца. Пренебрегая членами более высокого порядка малости, получаем

$$\Delta R = R_e - R_p = R_{\odot} \left( \frac{v_{\text{rot}}}{v_p} \right)^2 \approx 5,7 \text{ км,}$$

где  $v_{\text{rot}} = \omega R_{\odot}$  — линейная скорость вращения на экваторе, а  $v_p$  — параболическая скорость для Солнца.

В угловой мере сжатие Солнца оценивается как  $0,008''$ .

128. Решение. Ионизационное равновесие обеспечивается равенством числа актов ионизации нейтральных атомов под действием излучения, протекающих в единицу времени, числу актов рекомбинации. Скорость ионизации пропорциональна концентрации нейтральных атомов и плотности излучения, которая представляет собой некоторую функцию температуры излучения,  $f_1(T_H)$  (при условии, что излучение чернотельно). Скорость рекомбинаций пропорциональна вероятности столкновений электронов и ионов, т. е. произведению их концентраций  $n_1$  и  $n_e$ , а также некоторой функции температуры плазмы  $T_n, f_2(T_n)$ . В рав-

новесии должно выполняться равенство

$$f_1(T_H) n = f_2(T_n) n_e n_e.$$

Если вещество и излучение находятся в термодинамическом равновесии, то  $T_H = T_n$  и мы получаем искомое выражение.

129. Ответ: уравнение Саха может быть приведено к виду

$$\lg \frac{n^+}{n} p_e = \lg \frac{2u_1}{u_0} + \frac{5}{2} \lg T - \chi \frac{5040}{T} - 0,48,$$

где  $u_1$  и  $u_0$  — статистические веса возбужденного и основного состояний, а  $\chi$  — потенциал ионизации в единицах эВ.

130. Ответ: в плазме с приведенными параметрами отношение числа ионизованных атомов водорода к числу нейтральных атомов равно  $n^+/n \approx 0,003$ .

131. Ответ: отношение числа нейтральных атомов водорода к числу отрицательных ионов водорода равно  $n_H/n_{H^-} \approx 1,7 \cdot 10^7$ ; отношение же числа отрицательных ионов к числу атомов водорода во втором возбужденном состоянии сравнимо с единицей, точнее,  $n_{H^-}/n_2 \approx 2$ .

132. Ответ: наименьшая скорость для атомов железа равна  $17$  км/с, а для атомов водорода  $130$  км/с. Обе скорости значительно меньше параболической, которая равна  $620$  км/с.

133. Ответ: степень ионизации уменьшается с увеличением электронного давления только тогда, когда это давление обусловлено возрастанием электронной концентрации, а не возрастанием температуры.

134. Ответ: энергия квантов, поглощенных во фраунгоферовых линиях, перерабатывается в энергию квантов непрерывного спектра (за счет истинного поглощения и рассеяния, а затем — истинного поглощения).

135. Ответ: в видимой области спектра находятся линии балмеровской серии водорода, возникающие при переходе со второго уровня. Количество атомов водорода, находящихся на втором уровне, мало ( $\sim 10^{-7}$  от количества невозбужденных атомов). Линии же кальция являются резонансными и не требуют возбуждения. Поэтому, несмотря на относительно малое содержание кальция, интенсивность его линий оказывается выше водородных. Конечно, линии кальция по интенсивности не идут ни в какое сравнение с линиями водорода лаймановской серии, лежащими в ультрафиолетовом диапазоне. Естественно, самой интенсивной линией в спектре Солнца является линия  $L_{\alpha}$ .

136. Ответ: радиоизлучение на разных длинах волн приходит с разных геометрических глубин и несет информацию о температуре в различных слоях солнечной короны. Самое длинноволновое излучение приходит от верхних слоев короны, где температура максимальна. Описанный эффект — хороший пример того, как тепловое излучение объекта имеет вовсе нетепловой спектр (т. е. спектр, не описываемый одной конкретной температурой).

137. Ответ: да, поскольку давление магнитного поля значительно превосходит динамическое давление турбулентных движений:

$$H^2/8\pi \gg \rho v^2.$$

138. Ответ: это объясняется тем, что протуберанец имеет оптическую толщину в непрерывном спектре много меньше единицы и излучение, приходящее от фотосферы, не успевает термализоваться. В лучах  $H_{\alpha}$  толща достаточно высока и протуберанец, рассеивающий  $H_{\alpha}$ -кванты, выглядит более темным (другими словами, линия  $H_{\alpha}$  здесь видна в поглощении).

139. Указание: при интегрировании воспользуйтесь тем,

$$\int_0^{\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}.$$

140. Ответ: полуширина линии Fe XIV солнечной короны отклонена тепловыми движениями и равна  $\delta\lambda \approx 0,9 \text{ \AA}$ .

141. Ответ: потемнение к краю обусловлено тем, что при наблюдении у края луч зрения пронизывает менее глубокие (геометрически) и, следовательно, более холодные слои Солнца по сравнению с центром Солнца. Рентгеновское излучение формируется в солнечной короне, где оптическая толщина много меньше единицы. Следовательно максимальная яркость в рентгеновских лучах будет в том направлении, где максимальна мера эмиссии  $\int n^2 dl$ , а именно вблизи солнечного края.

142. Ответ: энергия электронов 7,3 эВ, а энергия протонов 1836 раз больше, т. е. равна 13,4 кэВ.

143. Ответ: темп истечения равен  $\dot{M} \approx 1,5 \cdot 10^{-14} M_{\odot}/\text{год}$ , энергия, уносимая в единицу времени («механическая» светимость) равна

$$L_{\text{м}} = \frac{\dot{M} v^2}{2} \approx 5 \cdot 10^{27} \text{ эрг/с},$$

где  $v_0 = v/10^8 \text{ см/с}$  — скорость солнечного ветра.

144. Ответ: падение метеорита указанной массы на поверхность Солнца обнаружить современными средствами невозможно. В это можно убедиться разными путями. Например, можно сравнить число атомов железа на луче зрения, испарившихся при падении метеорита с числом атомов солнечного железа, обеспечивающих наиболее яркую линию.

145. Ответ: такое объяснение неверно. Это ясно, например из следующего: скорость солнечного ветра в сотни раз превосходит тепловую скорость атомов в атмосфере Солнца ( $T \approx 6000 \text{ К}$ ); при максимальном распределении число частиц, имеющих скорости больше параболической, по отношению к общему числу частиц имеет множитель  $e^{-10^{000}}$ ! Такой механизм истечения не эффективен.

146. Ответ: давление набегающего потока плазмы равно (формула Ньютона)

$$P = 2mn \cos^2 \phi.$$

«Двойка» появляется из-за отражения частиц от слоя, а множитель  $\cos^2 \phi$  — за счет увеличения площади и уменьшения проекции импульса.

147. Ответ: понимая под характерным размером магнитосферы расстояние от центра диполя до подсолнечной точки магнитосферы (см. рис. 47), получаем

$$R_m = \left( \frac{a^2 B_p^2}{4\dot{M} v} \right)^{1/6} \approx 8R_{\oplus}.$$

148. Ответ: силовые линии магнитного поля Солнца изогнуты из-за его вращения таким образом, как показано на рис. 48. Заряженные частицы, двигаясь вдоль силовых линий, уклоняются так, что до нас в основном доходят лишь частицы от вспышек на западном крае Солнца.

149. Ответ: температура, вычисленная по закону смещения Вина, оказывается равной  $T = 6300 \text{ К}$ . Она не совпадает с эффективной температурой Солнца, так как спектр его не является в точности

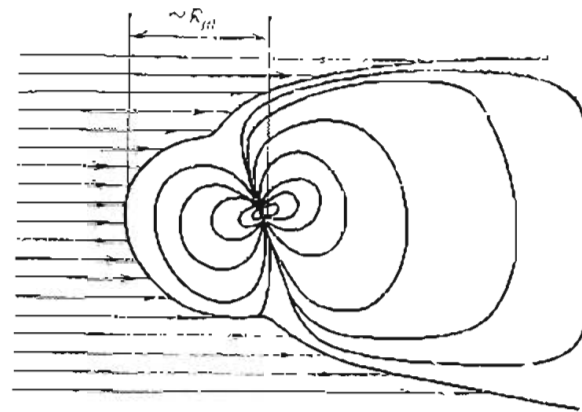


Рис. 47

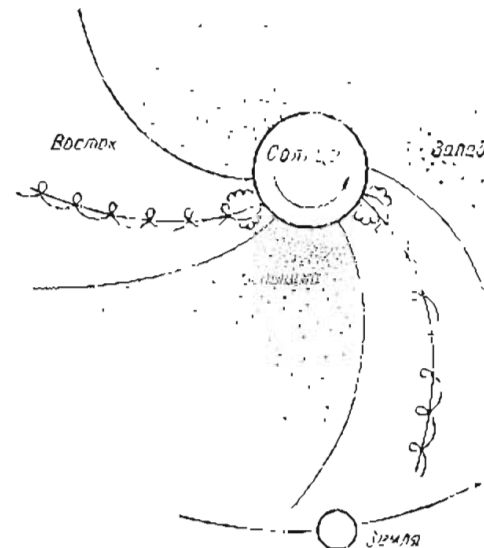


Рис. 48

чернотельным (последнее связано с существованием границы звезды, на которой нарушается условие термодинамического равновесия).

150. Ответ: напряженность магнитного поля в пятне равна 10 Э. Разность длин волн расщепленных линий соответствует скорости 2 км/с.

151. Ответ: для потенциала ионизации  $\chi = 4 \text{ эВ}$  температура гиганта должна быть равна  $T_{\Gamma} = 7600 \text{ К}$ , а для  $\chi = 8 \text{ эВ}$  температура равна  $T_{\Gamma} = 7900 \text{ К}$ .



152. **Решение.** Температура гиганта ниже температуры карлика. Уменьшение степени ионизации, вызванное более низким значением температуры, компенсируется более высокой концентрацией электронов. Однако это справедливо в том случае, если спектральный класс определяется по линиям элементов с достаточно низкими потенциалами ионизации.

153. **Ответ:** высота однородной атмосферы белого карлика для водорода равна  $H=30$  м. На самом деле белые карлики содержат в атмосфере более тяжелые элементы, для которых высота однородной атмосферы меньше. Впрочем, в тесных двойных системах вещество, обогащенное водородом, может накапливаться за счет перетекания с соседней непроэволюционировавшей звезды. По-видимому, термоядерное загорание вещества, перетекающего с соседней компоненты, и приводит к явлению вспышки новой.

154. **Ответ:** субкарлики беднее металлами, которые в значительной степени определяют поглощение. При более низком коэффициенте поглощения излучение приходит от более глубоких (геометрически) слоев, где температура выше. Поэтому субкарлики при одинаковой со звездами главной последовательности светимости обладают более высокой температурой.

155. **Решение.** При тепловом расширении спектральных линий различных химических элементов величина расширения различна и немонокотным образом изменяется вдоль спектра. Поэтому расширение линий, изображенных на спектрограмме, связано не с вращением, а с тепловыми движениями атомов в атмосфере. По этой же причине можно было бы отбросить как причину расширения и турбулентные движения в атмосфере звезды.

156. **Ответ:** для элементов с потенциалом ионизации  $\chi=4$  эВ ионизация сильнее у гиганта, а для  $\chi=8$  эВ и  $\chi=12$  эВ — у карлика.

157. **Ответ:** а) звезды переместятся параллельно оси звездной величины вниз на 5 звездных величин; б) звезды переместятся на 5 величин и вправо, в зависимости от цвета каждой звезды.

158. **Ответ:** эффект потемнения к краю уменьшает расширение линий, связанное с вращением звезды.

159. **Ответ:** Радиус звезды G8 III больше.

160. **Ответ:** при температуре  $T=25\,000$  К, характерной для звезды В0, железо полностью ионизовано.

161. **Ответ:** для звезды в созвездии Гончих Псов с приведенными в условии характеристиками расстояние равно 300 пк.

162. **Ответ:** масса звезды может быть определена по формуле

$$M = \frac{L}{4\pi\sigma T^4 G} L_{\odot} \cdot 10^{0.4(M_{\odot} - m + 4.3 \lg \pi)},$$

где  $M_{\odot}$  — абсолютная звездная величина Солнца,  $L_{\odot}$  — светимости Солнца.

163. **Ответ:** эквивалентная ширина линии в случае а) равна

$$W_{\lambda} = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \frac{\Delta\lambda}{2};$$

в случае б)

$$W_{\lambda} = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \Delta\lambda.$$

164. **Ответ:** в основном это связано с отличиями в возрасте звезд, химическом составе и с погрешностями в определении расстояний.

165. **Ответ:** главная последовательность представляет собой геометрическое место точек, в котором звезды проводят большую часть

времени (конечно, имеются в виду звезды, не исчерпавшие ядерных источников энергии).

166. **Ответ:** относительное изменение частоты вследствие гравитационного красного смещения равно

$$\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = \frac{GM}{c^2 R} = \frac{R_g}{2R},$$

где  $R_g$  — так называемый гравитационный радиус.

167. **Ответ:** средняя масса белых карликов равна  $M = 1M_{\odot}$ .

168. **Ответ:** высота однородной атмосферы у нейтронной звезды равна 7,4 мм (сравните с высотой однородной атмосферы белого карлика, вычисленной в задаче 153).

169. **Ответ:** нет, эта линия на поверхности нейтронной звезды с приведенными выше параметрами сформироваться не может. По-видимому, она возникает вдали от нейтронной звезды, на границе ее магнитосферы (см. задачи 170, 262).

170. **Ответ:** без учета гравитационного красного смещения (которое достигает 10–20% (см. задачу 168)) напряженность магнитного поля оценивается как  $(3-5) \cdot 10^{11}$  Э.

171. **Ответ:** нет, поскольку для того, чтобы система имела полную отрицательную энергию (т. е. являлась гравитационно-связанной), сумма масс компонент должна быть больше  $250 M_{\odot}$ . В радиусе  $\leq 50$  парсек, да, по-видимому, и во всей Галактике, таких звезд нет.

172. **Ответ:** отношение масс компонент  $M_1/M_2=2$ , а положение звезд показано на рис. 49.

173. **Ответ:** на рисунке изображен видимый эллипс относительной круговой орбиты.

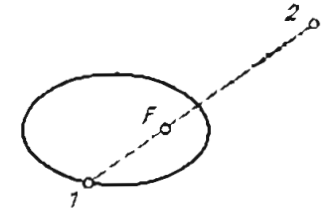


Рис. 49

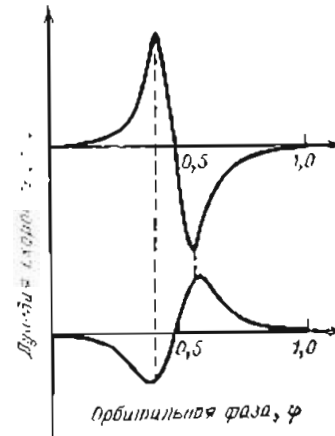


Рис. 50

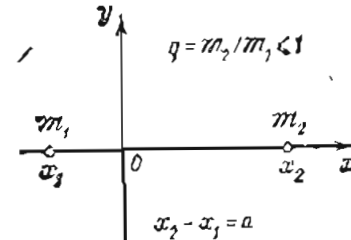


Рис. 51

174. **Ответ:** семь параметров полностью определяют орбиту звезды в двойной системе. Интегралы движения следующие: интеграл момента количества движения (3 параметра), интеграл энергии (1 параметр), интеграл Лапласа (3 параметра).

175. **Ответ:** качественная кривая лучевой скорости второй компоненты показана на рис. 50.



176. Ответ: отношение эффективных температур звезд равно  $\sqrt[4]{17}$ .  
 177. Ответ: либо эксцентриситет равен нулю, либо (что менее вероятно) долгота периастра равна  $90^\circ$  или  $270^\circ$ .

178. Ответ: выберем систему координат, жестко вращающуюся с периодом двойной системы, и с началом в центре масс (см. рис. 51). Для движения в плоскости орбиты интеграл энергии имеет вид

$$-\frac{GM_1}{r_1} - \frac{GM_2}{r_2} - \frac{\Omega^2(x^2 + y^2)}{2} + \frac{v^2}{2} = \text{const.}$$

Первые два члена описывают потенциальную гравитационную энергию пробного тела; третий член — потенциал центробежных сил; четвертый член представляет собой кинетическую энергию пробного тела единичной массы.

179. Р с ш е н и е. Примем обозначения, как и в предыдущей задаче (см. рис. 51). В точке Лагранжа  $L_1$  равнодействующая всех сил, действующих на пробную частицу, равна нулю, т. е.

$$\frac{GM_1}{r_1} - \frac{GM_2}{r_2} - \Omega^2 x = 0,$$

где  $x$  — координата точки  $L_1$ . Вводя безразмерные величины  $\xi_1 = r_1/a$ ,  $\xi_2 = r_2/a$  и  $q = M_2/M_1$ , где  $a$  — большая полуось орбиты системы, получаем уравнение для определения положения внутренней точки Лагранжа в виде

$$\frac{1}{\xi_1^2} - \frac{q}{\xi_2^2} - (1+q)\xi_1 + q = 0.$$

Отсюда видно, что положение точки Лагранжа, выраженное в единицах большой полуоси, определяется только отношением масс компонент (подробнее см. Цесевич, 1971).

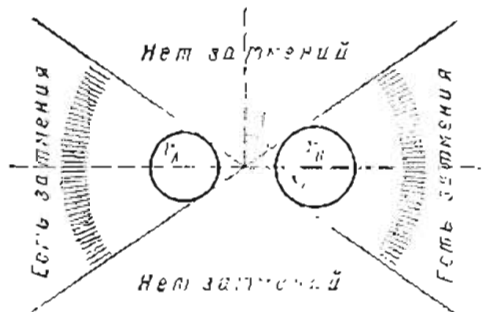


Рис. 52

180. Ответ: двойная система является затменной, если

$$\cos i \leq r_A + r_B$$

(см. рис. 52).

181. Ответ: наименьшее значение угла  $90^\circ - i \approx 2,8'$ . Затмение длится бы 1,5 дня ( $e=0$ ).

94

182. Ответ: в среднем  $M_A$  больше  $f(M_B)$  в 13 раз. Большое значение функции масс

$$f(M_B) = \frac{M_B^2 \sin^3 i}{(M_A + M_B)^2}$$

говорит о большой массе звезды  $M_B$ , а малое значение — о малости звезды  $B$  или о том, что угол наклона орбиты системы  $i \approx 0^\circ$ .

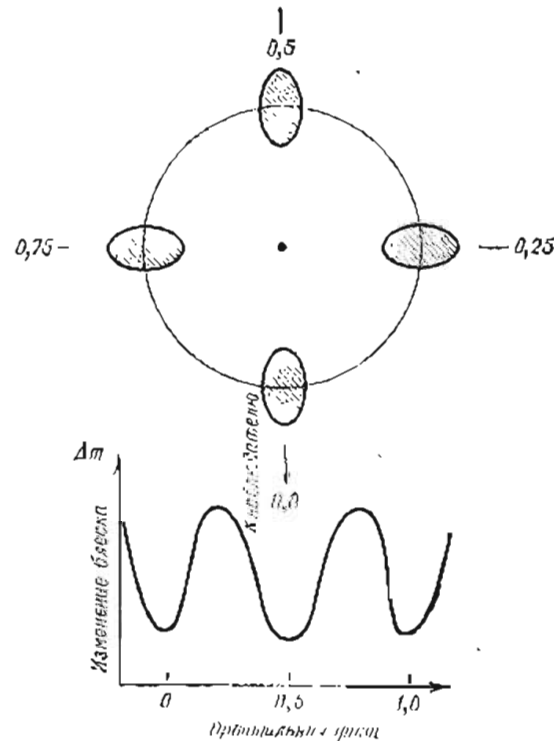


Рис. 53

183. Ответ: отношение масс равно

$$\frac{M_B}{M_A} = 10 \frac{\Delta m_A + \Delta m_B(A) - \Delta m_B(B)}{2,5(3+p)}$$

где  $\Delta m_B(A)$  и  $\Delta m_B(B)$  — болометрические поправки соответственно для звезд  $A$  и  $B$ .

184. Ответ: глубина затмения в том или ином диапазоне определяется выражением

$$\Delta m_s = -2,5 \lg \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_k} \right)^2 \cdot 10^{-\frac{\Delta m_1}{2,5}} \right],$$

где  $R_r$  и  $R_k$  — радиусы голубой и красной звезд,  $\Delta m_1$  — глубина зат-

мения при прохождении звезды-гиганта перед звездой В8. В визуальных лучах  $\Delta m = 0,001$ . В других фильтрах глубина затмения значительно меньше, так что затмение в них практически не обнаружим.

185. Ответ: для распространенных металлов высота однородной атмосферы лежит в пределах от  $10^6$  до  $10^7$  км.

186. Ответ: полная амплитуда колебаний периода рентгенового пульсара достигает 0,15 с.

187. Ответ: для определения скорости движения центра ма этой информации недостаточно.

188. Ответ: большая полуось орбиты равна  $35 R_{\odot}$ , а масса нормальной звезды  $M_0 = 180 M_{\odot}$ .

189. Ответ: качественная кривая блеска показана на рис. 5. Она представляет собой двойную волну. Глубины минимумов в первом приближении одинаковы. Максимум блеска приходится на фазы 0,25 и 0,75.

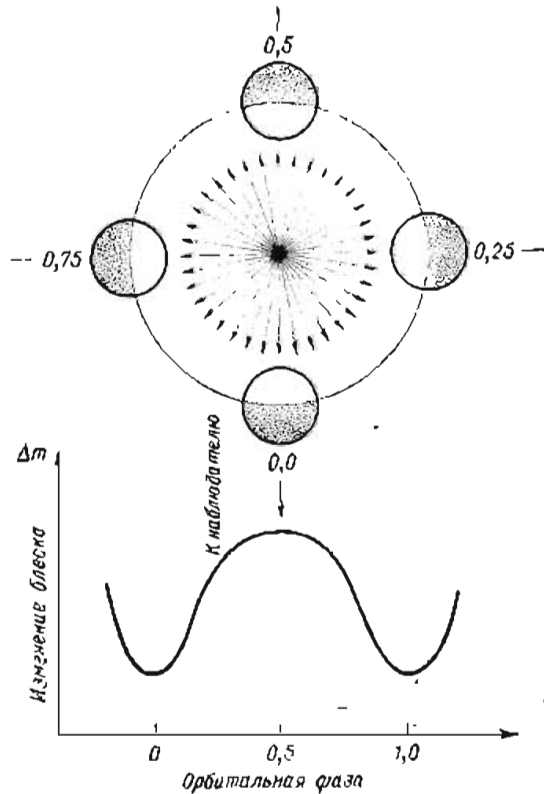


Рис. 54

190. Ответ: кривая блеска качественно показана на рис. 5. Она имеет один максимум на фазе 0,5.

191. Ответ: амплитуда эффекта отражения оценивается следующим образом:

$$\Delta m \approx -2,5 \lg 4 \frac{L_0}{L_v} \left( \frac{u}{R_0} \right)^2.$$

Для системы HZ Her/Her X-1 получаем  $\Delta m \approx 2$ , что близко к наблюдаемой величине (см. рис. 55, на котором представлены кривые блеска Her X-1 в фильтрах U, B и V).

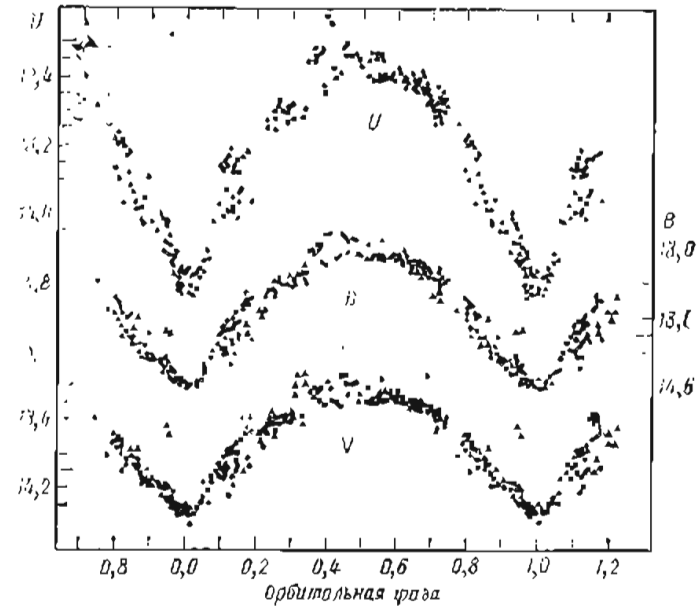


Рис. 55

192. Ответ: изменение блеска этой системы обусловлено эффектом эллипсоидальности нормальной звезды.

193. У к а з а н и е. Рассмотрите случай «остронаправленного» излучателя.

194. Ответ: да, эффект aberrации приводит к периодическим отклонениям момента прихода импульса по сравнению с вычисленным постоянным периодом.

195. Ответ: сила газового давления, приложенная к элементарному шаровому сектору, равна

$$F = r^2 d\Omega dR \frac{dP}{dR}.$$

Решение этой задачи показывает, что при написании уравнения равновесия внутри звезды в обычной форме:

$$\rho \frac{dP}{dR} = - \frac{G \Sigma(R)}{R^2}$$

(где  $M(R)$  — масса звезды, заключенная внутри радиуса  $R$ ), существующим оказывается предположение о ласкалевском характере давления газа. Уравнение гидростатического равновесия приобретает другую форму, если давление зависит от направления, как это имеет место в кристаллах, или при наличии крупномасштабного магнитного поля (подробный разбор можно найти в книге Зельдовича и др., 1981).

196. Ответ: средний молекулярный вес равен

$$\langle \mu \rangle = \frac{2}{1 + 3x + 0,5y}.$$

Для полностью ионизованного гелия  $\mu = 4/3$ .

197. Ответ: степень ионизации, оцененная по формуле С (см. задачу 129), равна  $n^+/n \approx 4$ , что противоречит утверждению о полной ионизации в центре Солнца. Противоречие связано с тем, что в рассматриваемых условиях формула Саха в обычном виде неприменима так как при столь высоких плотностях и давлениях происходит ионизация «давлением».

198. Ответ: Солнце сжалось бы за время, равное

$$t_r = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{R_{\odot}^3}{2GM_{\odot}}} \approx 30 \text{ мин.}$$

Тепловое же время для Солнца равно  $\sim 10^7$  лет (см. задачу 207). Отпроще всего получить, воспользовавшись третьим законом Кеплера

199. Решение. Следуя Зельдовичу и др. (1981), доказательство проведем следующим образом. По определению энтальпии  $dH = T dS - \frac{1}{\rho} dP$ , где  $T$ ,  $S$ ,  $\rho$  и  $P$  — температура, энтропия, плотность и давление газа. Так как звезда изэнтропна, то  $dH = \frac{1}{\rho} dP$ . Используя

условие гидростатического равновесия  $\frac{1}{\rho} \nabla P = -\nabla \varphi$ , получим  $\Delta(H + \varphi) = 0$ , откуда и следует, что  $H + \varphi = \text{const}$ .

200. Решение (см. Зельдович и др., 1981). Возьмем 1 г холодногo вещества на бесконечности и поместим его в звезду на расстоянии от центра. Работа сил гравитации при этом равна  $\varphi(R)$ . Для того что этот грамм вещества находился в равновесии с окружающим веществом его нужно нагреть до температуры  $T$  и сжать до плотности  $\rho$ , т. е. совершить работу, равную внутренней энергии  $E$ . Кроме того, необходимо произвести работу  $Pv$  (где  $v = 1/\rho$  — удельный объем), освобождая плотность, в которую мы поместим наш элемент. Тогда полная работа будет равна

$$\varphi + E + Pv = \varphi + H.$$

Величина в правой части постоянна для звезды с изэнтропным предельным (см. предыдущую задачу). Очевидно, меняя местами элементы, мы не затратим никакой работы.

201. Ответ: протоны преодолевают высокий энергетический барьер за счет квантового туннельного эффекта, так что можно сказать, что звезды светят «благодаря» сугубо квантовым эффектам.

202. Решение. В шестимерном фазовом пространстве импульсов и координат объем одной фазовой ячейки равен  $h^3$ . Полный фазовый объем газа примерно равен

$$V_{\text{фаз}} = \frac{4\pi}{3} \langle p \rangle^3 V \approx \frac{4\pi}{3} (V m_e kT)^3 V.$$

где  $\langle p \rangle$  — средний импульс частиц,  $V$  — пространственный объем,  $T$  — температура,  $m_e$  — масса электрона. Следовательно, условие вырождения имеет вид

$$\rho \geq m_p \frac{4\pi (V kT m_e)^3}{3h^3},$$

где  $m_p$  — масса протона.

203. Ответ: внутри Солнца газ не вырожден. В земных условиях электроны вырождены. Однако равновесие коры определяется силами полной решетки.

204. Ответ: отношение энергии колебаний к полной энергии звезды есть величина  $\sim (\Delta R/R)^2$ . Это ясно, поскольку равновесное состояние звезды соответствует минимуму полной энергии, т. е. в равновесном состоянии первая производная от полной энергии обращается в нуль.

205. Решение. Отношение лучистого давления к газовому в центре Солнца можно оценить «в лоб»:

$$\frac{P_r}{P_g} = \left[ \frac{\rho (RT/\mu)}{dT^4} \right]^{-1} \approx 5 \cdot 10^{-4}.$$

Более точно это соотношение может быть найдено как отношение светимости Солнца к эддингтоновскому пределу светимости (см. задачи 206 и 208):

$$\frac{P_r}{P_g} = \frac{L_{\odot}}{L_{Ed}} \approx 3 \cdot 10^{-4}.$$

206. Решение. Воспользуемся уравнением переноса:

$$\nabla I_{\nu} = -\kappa_{\nu} \rho I_{\nu} + \alpha_{\nu} \rho \left( \nabla \equiv \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} \right),$$

где  $I_{\nu}$  — интенсивность излучения,  $\rho$  — плотность вещества,  $\kappa_{\nu}$  — коэффициент поглощения,  $\alpha_{\nu}$  — излучательная способность. Следуя закону Кирхгофа

$$\alpha_{\nu} = \kappa_{\nu} B_{\nu},$$

где  $B_{\nu}$  — функция Планка, получаем

$$I_{\nu} = -\frac{1}{\kappa_{\nu} \rho} \nabla I_{\nu} + B_{\nu}.$$

Подсчитаем полный поток излучения, проинтегрировав по углу и частоте:

$$\begin{aligned} L_r &= \int I_{\nu} \cos \theta d\Omega dv = \int \frac{1}{\kappa_{\nu} \rho} \cos \theta \frac{dI_{\nu}}{dT} \frac{dT}{dr} d\Omega dv = \\ &= -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{\kappa_{\nu}} \cos^2 \theta \frac{dI_{\nu}}{dT} d\Omega dv \right] \frac{dT}{dr} = -\frac{dT}{dr} \cdot \frac{4\pi}{3} \int \frac{1}{\kappa_{\nu} \rho} \frac{dI_{\nu}}{dT} dv. \end{aligned}$$

С другой стороны, полная плотность излучения есть

$$e = \frac{4\pi}{c} \int I_{\nu} dv.$$

Следовательно,

$$\int \frac{dI_{\nu}}{dT} dv = \frac{c}{4\pi} \frac{de}{dT}.$$

Вводя средний коэффициент поглощения (росселандово среднее):

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{\int \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{dI_\nu}{dT} d\nu}{\int \frac{dI_\nu}{dT} d\nu},$$

получаем

$$F_r = -\frac{c}{3\kappa\rho} \frac{dp}{dr}.$$

Учитывая, что

$$p = aT^4$$

и

$$F_r = \frac{L}{4\pi r^2},$$

получаем искомое уравнение.

207. Ответ: характерное время сжатия, оно же тепловое время оно же время Кельвина — Гельмгольца, оценивается как  $3 \cdot 10^7$  лет. При сжатии Солнца выделяется энергия:

$$\frac{dE}{dt} \approx -\frac{d}{dt} \left( -\frac{GM_\odot^2}{R} \right) = \frac{GM_\odot}{R_\odot} \left| \frac{\dot{R}}{R} \right| \approx E/t_{\text{KH}} = L_\odot,$$

$E$  — полная энергия Солнца.

208. Ответ: для звезды, полностью состоящей из водорода эддингтоновский предел светимости равен

$$L_{\text{Ed}} = \frac{4\pi GM\mu p c}{\sigma T} \approx 1,3 \cdot 10^{33} \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \text{ эрг/с.}$$

где  $\sigma T$  — сечение томсоновского рассеяния. Для гелия предел в два раза выше.

209. Ответ: полагают, что масса звезды  $M_{\text{min}} \approx 0,02 M_\odot$ .

210. Ответ: в двойной системе несимметрично распределенное вещество звезды создает гравитационное поле, характер которого э

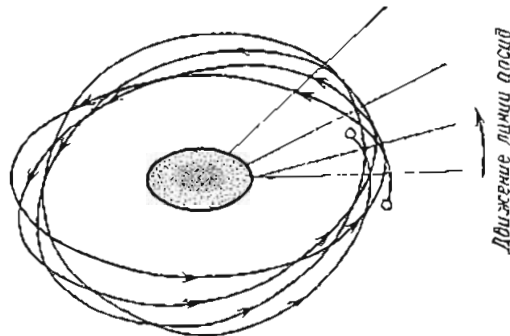


Рис. 56

висит от степени концентрации вещества звезды к ее центру, и которое отличается от гравитационного поля точечной массы. Это в первом приближении приводит к вращению линии апсид, которое можно наблюдать

в затменных двойных системах. Фактически траектории движения звезд (движения центра масс) становятся незамкнутыми (см. рис. 56).

211. Ответ: у белого карлика тепловая энергия оказывается существенно меньше гравитационной. Это вполне естественно, поскольку равновесие белых карликов обеспечивается давлением вырожденного электронного газа, а не тепловыми движениями.

212. Ответ: для белых карликов с полностью вырожденным нерелятивистским электронным газом зависимость «масса — радиус» имеет вид

$$R \sim M^{-1/3}.$$

При выводе можно воспользоваться уравнением гидростатического равновесия (см. задачу 196), заменив  $dI/dR \rightarrow 1/R$ .

213. Ответ: предельная масса приближенно равна

$$M_{\text{Ch}} \approx 3\mu_e^{-2} M_\odot.$$

Точное решение задачи дает

$$M_{\text{Ch}} = 5,75 \mu_e^{-2} M_\odot.$$

214. Ответ: ожидаемое число ядер  $^{27}\text{Al}$  в сутки равно

$$N_A = N_{\text{Cl}} \sigma_\nu t \cdot F_\nu \approx 1,1 \text{ сут}^{-1},$$

что в  $\sim 2,5$  раза превышает наблюдаемую величину.

216. Ответ: выделяемая таким образом энергия равна

$$\Delta E \approx \frac{GM^2}{R} \approx 6 \cdot 10^{33} \text{ эрг.}$$

что значительно превосходит наблюдаемую энергию вспышки сверхновой,  $\sim 5 \cdot 10^{50}$  эрг.

218. Ответ: энергия взрыва равна

$$\Delta E = N_A M (Q_{\text{C}} - Q_{\text{Ni}}) \approx 2,6 \cdot 10^{32} \text{ эрг.}$$

где  $N_A$  — число протонов.

217. Решение. Для образования нейтронного вещества с массой  $M$  (в массах Солнца) необходима энергия  $1,4 \cdot 10^{52} M$  эрг. Очевидно, именно такую работу необходимо затратить гравитационной силе, чтобы сжать вещество. Работа сил гравитации при сжатии до размеров нейтронной звезды оценивается как  $\sim 10^{52} M^{5/3}$  эрг. Отсюда получаем минимальную массу нейтронной звезды

$$M_{\text{min}} \approx 0,03 M_\odot.$$

Конечно, это не означает, что если масса нормальной звезды больше пайленового предела, то звезда обязательно превратится в нейтронную (после исчерпания источников энергии). Дело в том, что при массе  $M \leq 1,5 M_\odot$  (предел Чандрасекара — Ландау) энергетически более выгодным оказывается образование белого карлика. Это означает, что для образования «легкой» нейтронной звезды необходимы достаточно специфические условия.

218. Ответ: период вращения нейтронной звезды составляет

$$P_{\text{нз}} = P_\odot (R_{\text{нз}}/R_\odot)^2 \approx 4 \cdot 10^{-1} \text{ с.}$$

а напряженность магнитного поля на ее поверхности

$$H \approx H_0 \left( \frac{R_\odot}{R_*} \right)^2 \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ Э.}$$

219. Ответ: магнитный дипольный момент уменьшается пропорционально радиусу звезды. Отношение гравитационной энергии звезды к ее магнитной энергии в процессе сжатия остается постоянным (это, в частности, означает, что магнитное поле не в состоянии препятствовать коллапсу). Отношение каждого следующего мультипольного магнитного момента к предыдущему пропорционально радиусу сжимающейся звезды и все время уменьшается. Таким образом, по мере сжатия все большую роль начинает играть дипольная составляющая магнитного поля. В этом смысле коллапс можно назвать «очищающим» магнитного поля звезды. Конечно, на поверхности сжимающейся звезды вклад мультиполей не изменяется.

220. У к а з а н и е: пусть полость с идеально отражающими стенками заполнена равновесным излучением. Рассмотрите следующий адиабатический процесс — медленное изменение объема полости — и воспользуйтесь первым началом термодинамики:

$$dU = T dS - p dV,$$

где  $U = aT^4$  — плотность энергии излучения.

221. Ответ: максимальная высота гор на поверхности нейтронной звезды оценивается как  $H \approx 20 r_n^{1/3}$  см (сравните с задачами 350, 352) где  $r_n = \rho / 10^8 \text{ г/см}^3$  — плотность коры.

222. Ответ: отношение гравитационного красного смещения к эффекту Доплера равно

$$\frac{(\Delta\lambda)_{\text{гр}}}{(\Delta\lambda)_{\text{Д}}} = \frac{1}{2} \left( \frac{v_n}{c} \right),$$

где  $v_n$  — параболическая скорость для звезды.

223. Ответ: полная энергия черной дыры сравнима с ее гравитационной энергией. Это показывает, что значение гравитационного радиуса может быть оценено из тех соображений, что и классический радиус электрона (который оценивается из равенства полной и электромагнитной энергии).

224. Ответ: амплитуда колебаний болометрического блеска цефеиды оценивается как  $\Delta m_b \approx 0,7^m$ .

225. Ответ: отношение вращательной энергии к гравитационной примерно равно

$$\frac{E_{\text{вр}}}{E_{\text{гр}}} \approx \left( \frac{l \omega^2}{2} \right) / \left( \frac{GM_*^2}{R_*} \right) \approx \left( \frac{v}{v_n} \right)^2 \approx 1/4,$$

где  $v_n$  — параболическая скорость на поверхности звезды,  $l$  — момент инерции звезды. Тепловая энергия — того же порядка.

226. Ответ: скорость вращения на экваторе звезды равна  $v_{\text{вр}} = 110 \text{ км/с}$ . При радиусе звезды  $R = 10 R_\odot$  период оказывается равным 6 сут., т. е. он существенно меньше орбитального.

227. Ответ: предельное сжатие звезды равно  $2/3$ . При этом форма поверхности звезды близка к так называемому предельному эллипсоиду Роша (см. рис. 57).

228. Ответ: отношение температуры на полюсе звезды к температуре на экваторе оказывается равным  $T_n/T_s = 1,3$ . Это сравнимо

с контрастом температуры, наблюдаемым на Солнце (в солнечном пятне и на фотосфере). Вдоль экватора должна быть темная полоса (см. рис. 58).

229. Ответ: при сделанных предположениях закон изменения скорости имеет вид

$$v(R) = v_\infty \sqrt{1 - R_*/R},$$

где  $R_*$  — радиус звезды.

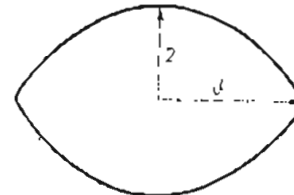


Рис. 57

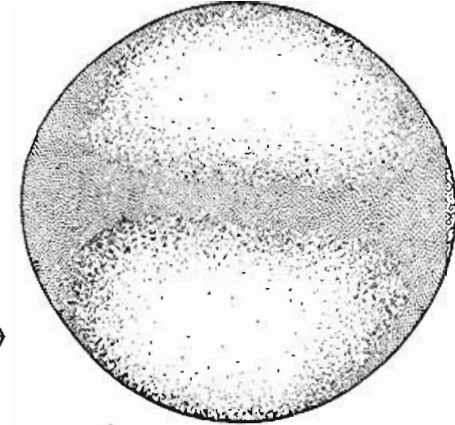


Рис. 58

230. Решение. Уравнение движения имеет вид

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{(\alpha - 1) G M_*}{R^2} e^{-\tau},$$

где  $\alpha = L/L_{\text{кр}}$ . Умножая числитель и знаменатель левой части на  $\mu$  и используя уравнение неразрывности

$$\dot{M} = 4\pi R^2 \rho v,$$

где  $\rho$  — плотность вещества, получаем

$$\dot{M} \times \frac{dv}{dt} = 4\pi (\alpha - 1) G M_* e^{-\tau}.$$

Интегрируя, получаем искомое соотношение:

$$\dot{M} v = \frac{L - L_{\text{кр}}}{c} (1 - e^{-\tau}).$$

231. Ответ: в соответствии с законом сохранения энергии должно выполняться неравенство б).

232. Ответ: неравенство а) не выполняется. В реальных условиях важную роль играет градиент давления и диффузия квантов (сравните с условиями, приведенными в тексте задачи 229).

251. Ответ: изменение массы нейтронной звезды происходит за характерное время  $\sim 3 \cdot 10^9$  лет, что ближе к ядерной шкале времени  
 252. Ответ: характерный размер магнитосферы (альвеновский радиус) равен

$$R_A \approx 2,6 \cdot 10^8 \dot{M}_{17}^{-2/7} H_{12}^{4/7} m^{-1/7} R_6^{12/7},$$

где  $\dot{M}_{17} = \dot{M}/10^{17}$  г/с,  $H_{12} = H/10^{12}$  Э,  $m = \dot{M}/\dot{M}_\odot$  и  $R_6 = R/10^6$  см. Для пульсара Her X-1  $R_A \approx 5000$  км.

253. Ответ: формально альвеновский радиус оказывается равным  $4,4 \cdot 10^{10}$  см, т. е. больше размеров двойной системы. Это означает, что магнитное поле контролирует перетекание вещества в двойной системе.

254. Ответ: отношение энергий равно отношению коэффициентов энерговыделения в результате аккреции на нейтронную звезду и в результате термоядерных реакций, т. е. равно  $\sim 100$ . Именно такая величина характерна для большинства наблюдаемых барстеров.

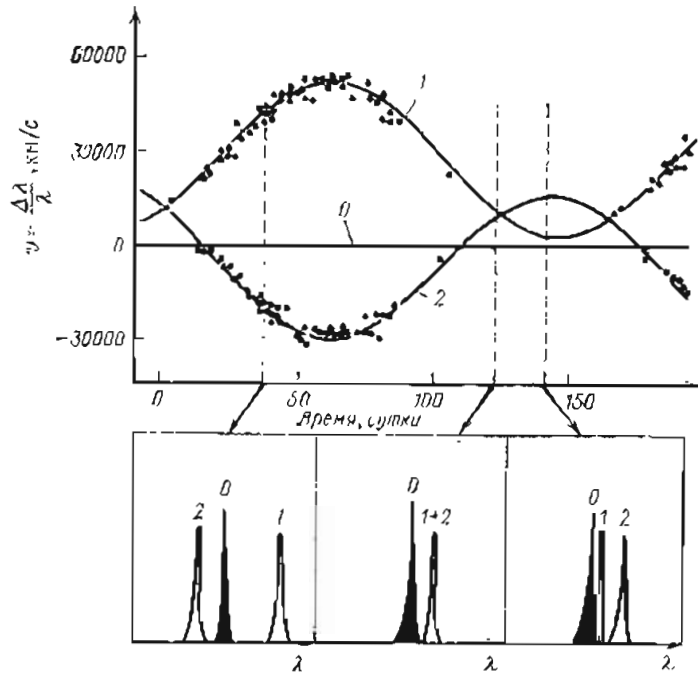


Рис. 60

255. Ответ: радиус нейтронной звезды равен 8 км.  
 256. Ответ: в оптике в интегральном свете звездная величина вспышки равнялась бы  $m=5$ , т. е. вспышка была бы видна.  
 257. Ответ: скорость движения вещества в струях равна  $v = 70\,000$  км/с.  
 258. Ответ: на рис. 60 показаны кривые лучевых скоростей SS 433, построенные по трем компонентам линии водорода  $H_\alpha$ . Одна из

компонент, обозначения 0, не испытывает смещений. Две другие (1 и 2) смещаются в противофазе с периодом 164 дня. Внизу показано расположение компонент линии  $H_\alpha$  на спектрограмме в различные моменты времени (более подробно об этом см. Липунов и Сурдин, 1980). Компонента 0 смещена из-за поперечного эффекта Доплера.

259. Ответ: при скорости  $v/c \approx 0,27$  в нашей системе отсчета лучи будут отклоняться на 10–20%, и «по ходу» будет излучаться на несколько десятков процентов больше энергии. Следовательно, «синие» компоненты линий должны быть ярче «красных» на несколько десятков процентов. Эффект должен быть переменным с периодом 164 дня и максимальным в момент максимального расхождения смещенных линий.

260. Ответ: уравнение движения пылинки при отсутствии сопротивления среды имеет вид

$$\left(\frac{\pi}{6} a^3 \rho\right) \frac{dv}{dt} = -\frac{GM}{R^2} \left(\frac{\pi}{6} a^3 \rho\right) + \frac{L}{4\pi R^2 c} \left(\frac{\pi a^2}{4}\right);$$

интегрируя, получаем

$$v_\infty = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \sqrt{\frac{3L}{16\pi GM a c} - 1} \approx 960 \text{ км/с.}$$

Для учета влияния среды в уравнение движения необходимо добавить силу «сопротивления»:

$$F_c = -\pi a^2 \rho_{\text{ср}} v^2,$$

где  $\rho_{\text{ср}}$  — плотность среды.

261. Ответ: отношение яркости в указанных направлениях равно 2.

262. Ответ: на линии центр — антицентр лучевая компонента скорости обращается в нуль и резко возрастает поглощение в линии 21 см.

263. Ответ: да, поскольку длина свободного пробега оказывается гораздо меньше толщины газопылевого слоя.

264. Ответ: время запаздывания импульсов на указанных частотах  $\Delta t = 1,14$  с.

265. Ответ: для пульсаров с указанными периодами частота магнитодипольного излучения оказывается меньше плазменной частоты в межзвездной среде. В таких условиях электромагнитные волны распространяться не могут.

266. Указание. Учтите, что излучательная способность пропорциональна квадрату плотности вещества плазмы (см. Соболев, 1985).

267. Решение. Из уравнения диссипации вращательной энергии получаем ( $dI\omega^2/2 = L$ )

$$\dot{P} = \frac{L}{4\pi^2 I} P^3 \approx 9 \cdot 10^{-14},$$

что близко к наблюдательному значению.

268. Ответ: характерная энергия электронов, излучающих в оптическом диапазоне, равна  $5 \cdot 10^{11}$  эВ.

269. Ответ: более горячим будет куб.

270. Ответ: энергия частицы должна удовлетворять неравенству

$$E > 2 \cdot 10^{16} d \text{ эВ,}$$

где  $d$  — расстояние до источника в кпк.

251. Ответ: изменение массы нейтронной звезды происходит за характерное время  $\sim 3 \cdot 10^9$  лет, что ближе к ядерной шкале времени  
 252. Ответ: характерный размер магнитосферы (альевновский радиус) равен

$$R_A \approx 2,6 \cdot 10^8 \dot{M}_{17}^{-2/7} H_{12}^{4/7} m^{-1/7} R_6^{12/7},$$

где  $\dot{M}_{17} = \dot{M}/10^{17}$  г/с,  $H_{12} = H/10^{12}$  Э,  $m = \dot{M}/\dot{M}_\odot$  и  $R_6 = R/10^6$  см. Для пульсара Her X-1  $R_A \approx 5000$  км.

253. Ответ: формально альевновский радиус оказывается равным  $4,4 \cdot 10^{10}$  см, т. е. больше размеров двойной системы. Это означает, что магнитное поле контролирует перетекание вещества в двойной системе.

254. Ответ: отношение энергий равно отношению коэффициентов энерговыделения в результате аккреции на нейтронную звезду и в результате термоядерных реакций, т. е. равно  $\sim 100$ . Именно такая величина характерна для большинства наблюдаемых барстеров.

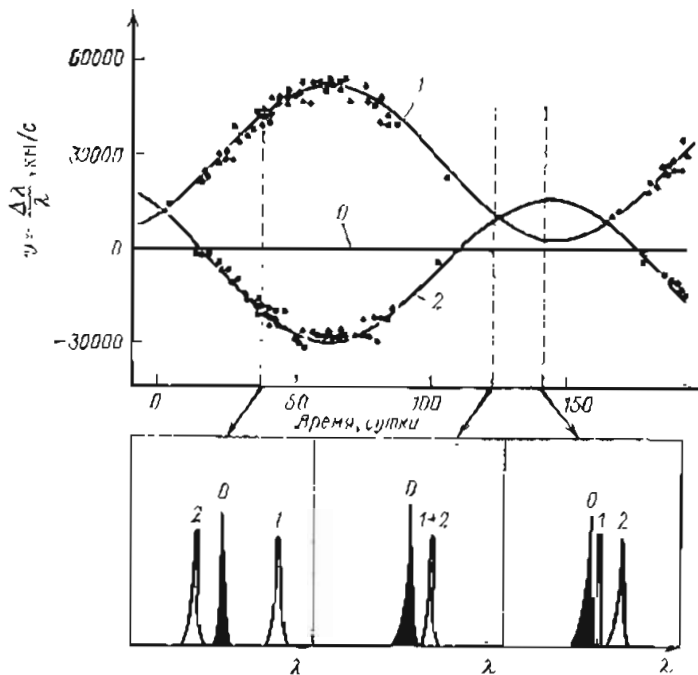


Рис. 60

255. Ответ: радиус нейтронной звезды равен 8 км.  
 256. Ответ: в оптике в интегральном свете звездная величина вспышки равнялась бы  $m=5$ , т. е. вспышка была бы видна.  
 257. Ответ: скорость движения вещества в струях равна  $v = 70\,000$  км/с.  
 258. Ответ: на рис. 60 показаны кривые лучевых скоростей SS 433, построенные по трем компонентам линии водорода  $H_\alpha$ . Одна из

компонент, обозначения 0, не испытывает смещений. Две другие (1 и 2) смещаются в противофазах с периодом 164 дня. Внизу показано расположение компонент линии  $H_\alpha$  на спектрограмме в различные моменты времени (более подробно об этом см. Липунов и Сурдин, 1980). Компонента 0 смещена из-за поперечного эффекта Доплера.

259. Ответ: при скорости  $v/c \approx 0,27$  в нашей системе отсчета лучи будут отклоняться на 10–20%, и «по ходу» будет излучаться на несколько десятков процентов больше энергии. Следовательно, «синие» компоненты линий должны быть ярче «красных» на несколько десятков процентов. Эффект должен быть переменным с периодом 164 дня и максимальным в момент максимального расхождения смещенных линий.

260. Ответ: уравнение движения пылинки при отсутствии сопротивления среды имеет вид

$$\left(\frac{\pi}{6} a^3 \rho\right) \frac{dv}{dt} = -\frac{GM}{R^2} \left(\frac{\pi}{6} a^3 \rho\right) + \frac{L}{4\pi R^2 c} \left(\frac{\pi a^2}{4}\right);$$

интегрируя, получаем

$$v_\infty = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \sqrt{\frac{3L}{16\pi GM a c} - 1} \approx 960 \text{ км/с.}$$

Для учета влияния среды в уравнение движения необходимо добавить силу «сопротивления»:

$$F_c = -\pi a^2 \rho_{\text{ср}} v^2,$$

где  $\rho_{\text{ср}}$  — плотность среды.

261. Ответ: отношение яркости в указанных направлениях равно 2.

262. Ответ: на линии центр — антицентр лучевая компонента скорости обращается в нуль и резко возрастает поглощение в линии 21 см.

263. Ответ: да, поскольку длина свободного пробега оказывается гораздо меньше толщины газопылевого слоя.

264. Ответ: время запаздывания импульсов на указанных частотах  $\Delta t = 1,14$  с.

265. Ответ: для пульсаров с указанными периодами частота магнитодипольного излучения оказывается меньше плазменной частоты в межзвездной среде. В таких условиях электромагнитные волны распространяться не могут.

266. Указание. Учтите, что излучательная способность пропорциональна квадрату плотности вещества плазмы (см. Соболев, 1985).

267. Решение. Из уравнения диссипации вращательной энергии получаем ( $dI\omega^2/2 = L$ )

$$\dot{P} = \frac{L}{4\pi^2 I} P^3 \approx 9 \cdot 10^{-14},$$

что близко к наблюдательному значению.

268. Ответ: характерная энергия электронов, излучающих в оптическом диапазоне, равна  $5 \cdot 10^{11}$  эВ.

269. Ответ: более горячим будет куб.

270. Ответ: энергия частицы должна удовлетворять неравенству

$$E > 2 \cdot 10^{16} d \text{ эВ,}$$

где  $d$  — расстояние до источника в кпк.



271. Ответ: масса вещества, сосредоточенного в центре Галактики, оценивается как

$$M \approx \frac{v^2 d \theta}{G} \approx 2 \cdot 10^6 M_{\odot},$$

где  $d \approx 10$  кпк — расстояние до центра Галактики.

272. Ответ: приведенные в условии задачи формулы согласуются в пределах указанных ошибок.

273. Решение. Главный вклад в поглощение жесткого (с энергией более 10 кэВ) рентгеновского излучения вносит томсоновское рассеяние. Оптическая толщина Галактики по томсоновскому рассеянию гораздо меньше единицы:  $\tau_T \approx \kappa_T \rho d \approx 4 \cdot 10^{-2} \ll 1$  ( $\kappa_T \approx 0,36 \text{ см}^2/\text{г}$  — сечение томсоновского рассеяния). Поэтому можно утверждать, что все яркие рентгеновские источники в Галактике видны.

274. Ответ: коэффициент рассеяния, рассчитанный на единицу массы, равен

$$K = \frac{3Q}{4a\rho}.$$

275. Ответ: если вся излучаемая энергия идет в рентгеновском диапазоне, то поток от нейтронной звезды превзойдет чувствительность аппаратуры и нейтронная звезда может быть обнаружена.

276. Ответ: мощность двигателя космического корабля  $W$  равна

$$W = \rho v^2 R^2,$$

а его температура

$$T = \left[ \frac{\rho v^3}{4\sigma} \right]^{1/4},$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана.

277. Указание. Воспользуйтесь тем обстоятельством, что при всех возможных комбинациях в расположении освещающей звезды и туманности по отношению к земному наблюдателю наибольшая возможная яркость туманности есть

$$B_{\max} = \frac{AI}{4\pi},$$

где  $I$  — интенсивность света, падающего от звезды.

278. Ответ: яркостная температура межзвездного водорода равна 19 К.

279. Ответ: энергия электронов должна быть не меньше, чем 2,5 эВ. Электронная температура должна быть равна

$$T_e \approx \frac{m_e v^2}{2k} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ К}.$$

280. Ответ: геометрическая длина луча зрения внутри туманности равна

$$l = 2 \left\{ \sqrt{r^2 - x^2} - \sqrt{(r-d)^2 - x^2} \right\},$$

где  $x$  — прицельное расстояние луча зрения до центра туманности; при заданных соотношениях плотностей туманность будет выглядеть как планетарная.

281. Ответ: рекомбинация способствует повышению температуры вследствие увеличения средней молекулярной массы молекулярная

масса увеличивается в 2 раза, а излучается меньше половины тепловой энергии.

282. Ответ: средний радиус планетарной туманности оценивается как 0,1 пк.

283. Ответ: она, и другая светятся за счет переработки в оптический диапазон энергии, поступающей от центральной звезды, которая гораздо слабее излучает в видимой области спектра.

284. Ответ: угловой диаметр области H II вокруг звезды  $\alpha$  Cyg равен  $2''$ .

285. Ответ: характерный критический размер (джипсовская длина волны) равен

$$\lambda_{\text{дж}} \approx \left( \frac{3RT}{\pi \rho \mu g} \right)^{1/2} \approx 1,5 \cdot 10^8 T_4^{1/2} \rho_{-24}^{-1/2} \text{ пк},$$

где  $T_4 = T/10^4 \text{ К}$ ,  $\rho_{-24} = \rho/10^{-24} \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 0,6$  — средняя молекулярная масса для межзвездной среды.

286. Ответ: для холодных областей  $M_{\text{дж}} = 2 \cdot 10^3 M_{\odot}$ , для зон H II  $M_{\text{дж}} = 2 \cdot 10^7 M_{\odot}$  и для горячих областей  $M_{\text{дж}} = 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ .

287. Ответ: в рассматриваемом ограничении инкремент неустойчивости не зависит от длины волны возмущения.

288. Ответ: распространение звука возможно, поскольку длина волны звукового колебания меньше джипсовской длины волны.

289. Ответ: мера эмиссии равна  $EM \approx 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-6}$ .

290. Ответ: электронная концентрация равна  $\sim 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ .

291. Ответ: поток энергии через единицу площади в предложенных длинах волн равен: для  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$  —  $3,1 \cdot 10^{-26} \text{ Вт/м}^2\text{Гц}$ ; для  $\lambda = 4250 \text{ \AA}$  —  $4,2 \cdot 10^{-26} \text{ Вт/м}^2\text{Гц}$ .

292. Ответ: тело нагреется до температуры  $T = 3350 \text{ К}$ .

293. Ответ: нормировочный коэффициент  $K = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3} (\text{эВ})^{1,2}$ .

294. Ответ: излучение протонов в  $m_p/m_e$  раз меньше, и поэтому их вклад незначителен.

295. Ответ: радиус орбиты электрона, движущегося поперек силовой линии магнитного поля, равен

$$R = 0,2 E_v H_{-6}^{-1} \text{ пк}.$$

296. Указание. воспользуйтесь уравнением переноса. По мере увеличения  $\tau$  (при  $\tau \ll 1$ ) яркость растет, потому что растет число излучающих атомов на луче зрения. Однако при  $\tau > 1$  это уже не так, излучение приходит лишь из поверхностных слоев ( $\tau \approx 1$ ).

297. Ответ: 1) радиусы первого и второго колец соответственно равны 1,55 мм и 2,39 мм; 2) дисперсия соответственно равна 4,07 Å/мм и 6,27 Å/мм; 3) радиусы колец линии 6584 больше колец H $\alpha$ ; 4) для первого кольца сдвиг составит  $5,5 \cdot 10^{-2}$  мм; 0,23 мм, 0,46 мм и 1,4 мм, а для второго кольца в 2 раза больше; 5) перемещение всей системы колец на одно соответствует скорости 197 км/с.

298. Ответ: столь сильное отличие для иона O IV связано с тем, что он имеет большой эффективный заряд.

299. Ответ: при уменьшении угла наклона поверхностная яркость возрастает.

300. Ответ: поверхностная яркость с 1 квадратной секунды равна

$$m = 26,6^m + m_0 - 2,5 \lg \frac{H d^2 n_0}{\cos i}$$

Конечно, эта формула верна до тех пор, пока угол  $i$  далек от  $90^\circ$ .

301. Ответ: появление вторичного максимума связано с немонокотным распределением вещества в диске галактики. Например, если в центре диска галактики имеется (наряду с центральным ядром) по нижелее плотности звезд, то на кривой появится вторичный максимум.

302. Решение: Вблизи центра галактики по условию плотность стремится к некоторому конечному значению  $\rho_0$ , а распределение плотности не имеет особенностей. Внешние слои при этом в силу симметрии (важно, что вблизи центра можно говорить уже о сферической симметрии) не влияют на движение в центре. Скорость вращения при этом есть

$$v = (GM(R)/R)^{1/2},$$

Подставляя

$$M(R) = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_0,$$

получаем, что при  $R \rightarrow 0$

$$v = \text{const} \cdot R,$$

т. е. в центре вращение твердотельно.

303. Ответ: плотность вещества падает обратно пропорционально квадрату расстояния.

304. Ответ: максимальное сжатие звезды, масса которой сосредоточена в центре, равно  $1/3 \cdot 10 \approx 3,3$ , т. е. гораздо меньше, чем у эллиптических галактик. Тем не менее известно, что плотность вещества быстро падает при удалении от центра. Значит, сжатие эллиптических галактик (и это подтверждается наблюдениями) не связано с их вращением.

305. Ответ: хаотические скорости звезд примерно на порядок больше скорости звука в газе.

306. Ответ: быстрее вращается газовая составляющая галактики.

307. Ответ: спиральный «узор» замывается бы дифференциальным вращением за время, близкое к периоду вращения галактики, т. е. за несколько сотен миллионов лет.

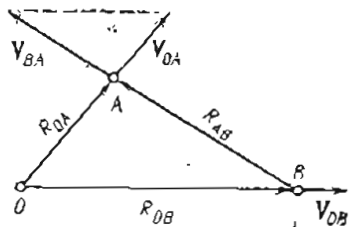


Рис. 61

от «главного» наблюдателя  $O$  со скоростями, пропорциональными расстояниям  $OA$  и  $OB$ , соответственно. Легко видеть, что два треугольника, образованные радиус-векторами и скоростями, подобны, так что точки  $A$  и  $B$  удаляются друг от друга по тому же закону. Ясно, что подобие со временем не изменится.

311. Ответ: постоянная Хаббла уменьшится в  $\sqrt{2,512}$  раза.

312. Ответ: в космологическом расширении не участвуют гравитационно связанные системы (т. е. системы с полной отрицательной

энергией). (Наше существование, как и существование звезд и галактик, связано именно с отклонением от фридмановской модели.) Поэтому расстояния до Луны, до центра Галактики и до галактики  $M31$  ни в какой мере не подвержены космологическому расширению.

Расстояние до центра сверхскопления растет из-за космологического расширения, хотя отчасти это расширение компенсируется взаимным притяжением нашей Галактики и сверхскопления.

313. Ответ: для значения постоянной Хаббла  $H = 500$  (км/с)/Мпс возраст Вселенной оказывается  $2 \cdot 10^9$  лет, что меньше возраста Земли, определенного методом радиоактивного распада (см. задачу 388). Следует, однако, подчеркнуть, что возраст Вселенной зависит также от так называемого «лямбда-члена», который мы приняли равным нулю (см. Зельдович и Новиков, 1975).

314. Ответ: для определения расстояния по закону Хаббла необходимо, чтобы хаббловская скорость была по крайней мере на порядок больше хаотической. Это условие выполняется, если видимая звездная величина галактики больше  $\sim 8,5^m$ . Конечно, для надежного определения необходимы гораздо более жесткие условия.

315. Ответ: общее число столкнувшихся галактик (в предположении однородности) составляет 150. Конечно, это довольно грубая оценка, так как необходимо учитывать неоднородность распределения галактик в скоплениях и неравномерность их движения. Однако уже отсюда видно, что столкновение галактик в скоплениях — довольно частое явление.

316. Ответ: оптическая толща по томсоновскому рассеянию оказывается гораздо меньше единицы,  $\tau_T = 10^{-2}$ , а полная светимость скопления равна  $L \approx 2 \cdot 10^{44}$  эрг/с.

317. Ответ: максимальное красное смещение, на котором еще можно наблюдать рентгеновское излучение межгалактического газа в скоплениях галактик с приведенной чувствительностью, равно  $z_{\text{max}} \approx 0,4$ .

318. Ответ: наиболее удобной для наблюдений линией является линия  $L_{\alpha}$ , длина волны которой с учетом красного смещения будет равна 4252,5 Å.

319. Ответ: возможны по крайней мере два объяснения: а) выбросы представляют собой геометрическое место свдвигающихся точек, не связанных причинно друг с другом; б) описанная процедура определения скорости в действительности некорректна (см. следующую задачу).

320. Ответ: наблюдаемая скорость выбросов в предложенной модели равна

$$v = \frac{v_j \sin \alpha}{1 - \frac{v_j}{c} \cos \alpha}.$$

321. Ответ: расход «топлива» равен

$$\dot{M} \approx 10^{26} \eta^{-1} \text{ г/с} \approx 1,5 \eta^{-1} M_{\odot} / \text{год}.$$

где  $\eta$  — к. п. д. процесса. Для аккреции черной дырой  $\eta \approx 0,1 - 0,3$ , а для термоядерных реакций  $\eta = 0,01$ .

322. Ответ: массу ядра сейфертовской галактики можно оценить с помощью выражения

$$M \approx \frac{v^2}{G} \cdot R \approx 2 \cdot 10^8 M_{\odot}.$$

323. Ответ: масса черной дыры должна быть не меньше  $8 \cdot 10^6 M_{\odot}$  а минимальное время переменности порядка  $2,1^h$ .

324. Ответ: нет. Например, когда источник излучения имеет градиент температуры по фотосфере, спектр источника представляется суммой тепловых спектров с разными температурами и в результате может оказаться степенным (именно такой вид спектра формируется в внешних частях аккреционных дисков). Степенной спектр также формируется при рассеянии квантов с малой энергией на горячей плазме со сдвигом частоты (обратный комптон-эффект).

325. Ответ: функция распределения числа источников по потоку имеет вид

$$N(S) \approx S^{-3/2}.$$

Вид распределения остается таким же и в случае неодинаковых источников.

326. Ответ: а) спектр излучения остается чернотельным, и температура уменьшается по закону

$$T = T_0 / (1+z);$$

б) спектр излучения в этом случае остается степенным с тем же наклоном.

327. Ответ: критическая плотность равна

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 2 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3.$$

Интересно отметить, что в точном решении уравнений Эйнштейна для однородной и изотропной Вселенной, полученном А. А. Фридманом, критическое значение плотности определяется таким же выражением.

328. Ответ: излучение звезд из-за диллюции сильно неравновесно (сравните с задачей 92) и его антенная температура гораздо меньше температуры реликтового излучения.

329. Ответ: поток реликтового излучения равен нулю.

330. Ответ: peculiarная скорость движения Земли относительно так называемой сопутствующей системы отсчета (т. е. системы отсчета, в которой реликтовое излучение изотропно) равна  $v = 600 \text{ км/с}$ .

331. Ответ: излучение в радиодиапазоне от 1 до 10 см меньше болометрического в  $4 \cdot 10^4$  раз. Отношение массы к светимости равно  $M/L_0 = 10,8$ .

332. Ответ: характерное время жизни такого электрона оценивается в 900 лет. Максимум излучения приходится на длину волны  $\sim 3000 \text{ \AA}$ .

333. Ответ: квазары могли бы быть гравитационно связанными, если бы их суммарная масса была больше  $5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ .

334. Ответ: вероятность того, что между нами и квазаром окажется галактика, равна  $\sim 0,5$ .

335. Ответ: максимальная масса черной дыры, способной разрушать звезды с массой  $M_*$  и радиусом  $R_*$ , равна

$$M_{\max} \approx 10^4 \left( \frac{M_*}{M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left( \frac{R_*}{R_{\odot}} \right)^{3/2} M_{\odot}.$$

336. Ответ: в «виновской» области спектра антенная температура в направлении скопления должна быть выше средней (см. Зельдович и Новиков, 1975).

337. Ответ: динамическое трение не оказывает существенного влияния на движение шаровых скоплений указанной массы.

338. Ответ: в полуденный мы не видим затемненных мест.

339. Ответ: орбитальный момент Юпитера в 2900 раз больше вращательного момента Солнца.

340. Ответ: расширение спектральных линий в атмосферах планет определяется в основном микроскопическим эффектом Штарка. Для звездных спектров расширение обусловлено: а) тепловым или радиальным движением атмосфер; б) турбулентными движениями. Однако для карликов важную роль также играет микроскопический штарк-эффект.

341. Ответ: да, это связано с некомпланарностью орбит планет (см. КОА).

342. Ответ: в рассматриваемых условиях применимо адиабатическое приближение. Поэтому плотность и давление в атмосфере меняются с высотой  $h$  по закону

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \frac{h}{H} \right)^{1/(\gamma-1)},$$

$$P = P_0 \left( 1 - \frac{h}{H} \right)^{\gamma/(\gamma-1)},$$

где  $H$  равно

$$H = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\bar{R}T_0}{\mu g},$$

а  $\gamma$  — показатель адиабаты.

343. Ответ: в изотермическом случае плотность и давление падают по экспоненциальному закону:

$$\rho = \rho_0 e^{-h/H}, \quad P = P_0 e^{-h/H},$$

где  $H = \bar{R}T_0/\mu g$  — высота однородной атмосферы. Если перенос тепла осуществляется конвекцией, то лучше адиабатическое приближение.

344. Ответ: размер магнитосферы (точнее, расстояние от центра планеты до подсолнечной точки ее магнитосферы) пропорционален кубическому из отношения магнитного дипольного момента к большой полуоси орбиты (см. задачу 147). Поэтому искомое соотношение равно 20. Но Меркурий меньше Земли, и его магнитосфера все же экранирует поверхность.

345. Ответ: столь большое отличие венерианской атмосферы связано в основном с ее большой плотностью.

346. Ответ: скорость падения парашютиста на Венере равна 5 см/с. В принципе, можно обойтись и без парашюта.

347. Ответ: самолет на Венере будет испытывать ту же подъемную силу при скорости в десять раз меньшей, чем на Земле.

348. Указания: рассмотрите предельный случай, когда оси вращения и обращения перпендикулярны друг другу.

349. Ответ: магнитное поле Венеры гораздо слабее земного. По-видимому, это связано с медленным осевым вращением Венеры.

350. Ответ: высота гор на планете не может быть сколь угодно большой, так как у достаточно большой горы начинает разрушаться (плавиться) кристаллическая структура основания (см. задачу 352). Максимальная высота гор на Марсе больше, так как меньше сила тяжести.

351. Указания: рассмотрите воображаемую ситуацию, при которой ось вращения Земли лежит в плоскости орбиты Луны.

352. Решение. При определенной высоте горы  $H_{\max}$  ее основание начинает плавиться, так что при увеличении высоты вершины на величину  $\Delta H$  ее основание «оплавится» на ту же величину и гора не станет выше. При этом работа силы тяжести перейдет в тепло. Для цилиндрической горы (см. рис. 62) можно записать

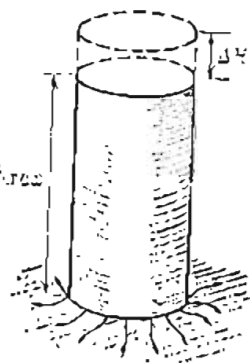


Рис. 62

$$Mg\Delta H = Q\rho S\Delta H,$$

где  $S$  — сечение горы. Масса горы, очевидно, равна

$$M = \rho H_{\max} S,$$

откуда получаем

$$H_{\max} = Q/g.$$

Для Марса  $H_{\max} = 67$  км, для Земли  $H_{\max} = 26$  км, для Венеры  $H_{\max} = 30$  км и для Луны  $H_{\max} = 150$  км.

353. Ответ: приливный радиус Роша равен

$$R_p \approx 1,4 (\rho_n/\rho_c)^{1/3} R_n.$$

В точном решении численный коэффициент равен 2,44.

354. Ответ: приливный радиус равен двум радиусам Сатурна, т. е. примерно совпадает с размером колец.

355. Ответ: максимальный угол схода оси вращения планеты равен

$$\Delta\alpha \approx \frac{M_a v \cdot R}{2\pi I} \cdot \rho.$$

356. Ответ: масса астероида составляет  $3 \cdot 10^{19}$  г.

357. Ответ: это связано с особенностью крупномасштабного рельефа лунной поверхности и отсутствием атмосферы.

358. Указание. Учтите, что отношение глубины кратера к его диаметру примерно постоянно.

359. Ответ: э. д. с. индукции равна

$$\text{э. д. с.} = \frac{\pi R^2 \mu \omega}{a^3},$$

где

$$\omega = 2\pi \left( \frac{1}{p_c} - \frac{1}{p_n} \right).$$

360. Ответ: электрон излучает на длине волны 4,7 м.

361. Ответ: размер магнитосферы Юпитера оценивается в  $27 R_{\text{Ю}}$ .

В действительности магнитосфера Юпитера еще больше, что связано с наличием дополнительных токов внутри магнитосферы.

362. Ответ: альbedo равно 2/3.

363. Ответ: результаты расчета представлены в следующей таблице:

Размер, км	50	20	5	2
Абсолютная величина	8,1 <sup>m</sup>	10,1	13,1	15,1
Видимая величина	11,5 <sup>m</sup>	13,5	16,5	18,5

364. Ответ: в средней оппозиции видимая звездная величина Марса равна  $-2,0^m$ ; в афелийной:  $-1,62^m$ ; в перигелийной:  $-2,43^m$ .

365. Ответ: отношение яркости планеты к яркости выставленной рядом с ней лампы в потоку света абсолютно белой площадки равно

$$\frac{3,484 \cdot r^2}{2,512^m d^2}.$$

366. Ответ: Юпитер был бы на 5 звездных величин ярче Венеры в тех же положениях.

367. Ответ: точное решение этой задачи представляет собой трудное научное исследование. Желающие могут продвинуться сколь угодно далеко в ее решении. Мы ограничимся следующей простой оценкой эксцентриситета, основываясь на предположении, что температура Земли в перигелии не должна быть выше  $100^\circ\text{C}$ . При этом мы будем считать, что большая полуось орбиты Земли не изменится, и пренебрежем различными побочными эффектами (типа парникового эффекта). В таких предположениях максимальный эксцентриситет равен  $\sim 0,21$ . Эта оценка демонстрирует, насколько жесткими должны быть начальные условия, необходимые для возникновения жизни.

368. Ответ: это связано с тем, что вес ртути на разных планетах различен.

369. Ответ: максимальное смещение спектральных линий равно  $0,27 \text{ \AA}$ . Солнечные линии покажут то же смещение.

370. Ответ: радиус Юпитера по этим данным равен 68 800 км.

371. Ответ: данные приведены в следующей таблице:

Длина волны, мкм	5	10	15
Собственное излучение, эрг/(см <sup>2</sup> ·с)	$10^{10}$	$3,8 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^6$
Палающее излучение, эрг/(см <sup>2</sup> ·с)	$7,7 \cdot 10^7$	$4,8 \cdot 10^6$	$9,5 \cdot 10^6$

372. Ответ: высота облачного слоя 46,5 км, давление на этой высоте примерно в 2300 раз меньше, чем на поверхности (так как высота однородной атмосферы (см. задачу 342) близка к 6 км, что в общем согласуется с наблюдаемыми значениями).

373. Ответ: плотность атмосферы Марса становится больше земной начиная с высоты 250 км.

374. Ответ: радиус астероида 250 км, а его температура 180 К.

375. Ответ: максимальный размер астероида равен 150 км.

376. Ответ: сравнивая длину свободного пробега частицы с характерным размером хвоста и головы, можно убедиться, что хвост кометы, в отличие от ее головы, сплошной средой считать нельзя.

377. Ответ: передача импульса за счет накопления энергии эффективнее в  $2c/v$  раз.

378. Ответ: а)  $R > 1$ ; б)  $R = 1$ ; в)  $R < 1$ .

379. Ответ: конечная скорость движения пылинки равна

$$v = \sqrt{2R} v_{\oplus} \approx 1300 \text{ км/с.}$$

где  $v_{\oplus}$  — орбитальная скорость Земли.

380. Решение. Определим темп аккреции невзаимодействующих друг с другом частиц. Для каждой частицы выполняется закон сохранения момента вращения относительно Солнца. Так как

$$v_{\infty} \ll v_p = \sqrt{2GM_{\odot}/R_{\odot}} \approx 617 \frac{\text{км}}{\text{с}},$$

то максимальный прицельный параметр частицы, которая попадает на Солнце, равен

$$l_{\max} = R_{\odot} \frac{v_p}{v_{\infty}}.$$

Отсюда находим темп аккреции:

$$\dot{M} = \pi l_{\max}^2 \rho_{\infty} v_{\infty} = \pi R_{\odot}^2 \left( \frac{v_p}{v_{\infty}} \right)^2 \rho_{\infty} v_{\infty},$$

где  $\rho_{\infty}$  — плотность частиц вдали от Солнца. Используя условия задачи, получаем плотность кометного вещества в межзвездном пространстве:

$$\rho_{\infty} = \frac{\dot{M}}{\pi R_{\odot}^2 v_{\infty}} \left( \frac{v_{\infty}}{v_p} \right)^2 \approx 10^{-20} \text{ г/см}^3.$$

Это значение противоречит средней плотности Галактики и значительно превышает так называемый предел Оорта  $\sim 8.8 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$  для плотности вещества в окрестности Солнца (Аллен, 1977). Следовательно, гипотеза межзвездного происхождения комет должна быть отброшена.

381. Ответ: вероятность столкновения орбитальной станции с метеорным телом равна  $10^{-3}$ .

382. Ответ: метеорное тело имеет межзвездное происхождение.

383. Указание. Температура загорания бумаги  $451^{\circ}$  по Фаренгейту.

384. Ответ: из-за высокой концентрации вещества (и, следовательно, большой оптической толщи) излучение термализуется, принимая температуру, соответствующую энергетическим потерям.

385. Решение. Уравнение распада в рассматриваемом случае имеет вид

$$\frac{dN_i}{dt} = -\frac{N_i}{\tau} + B,$$

где  $B = \text{const}$  — скорость распада или образования радиоактивных элементов под действием космических лучей. Решая это уравнение, получаем

$$N_i = B\tau (1 - e^{-t/\tau}) + N_i^0 e^{-t/\tau}$$

386. Ответ: возраст Земли равен  $5.5 \cdot 10^9$  лет.

387. Ответ: размер метеорита должен удовлетворять неравенству

$$R \gg (\rho_n/\rho_m) H,$$

где  $\rho_m$  — плотность воздуха.

388. Ответ: длина пути торможения тела не связана с его начальной скоростью.

389. Ответ: длина метеорного роя меняется по закону

$$l = l_0 (r/r_0)^{-1/2},$$

где  $r$  — расстояние до Солнца.

390. Ответ: орбитальный момент пылинки будет изменяться.

391. Ответ: средняя плотность вещества на периферии  $1.6 \cdot 10^{-18} \text{ г/см}^3$ , а на расстоянии 5000 км — в 100 раз больше.

392. Ответ: среднее расстояние между пылинками 40 м.

393. Ответ: максимальное расстояние равно

$$\zeta = \frac{g^2 r^2}{2(1-\mu)GM_{\odot}}.$$

394. Ответ: скорость частиц, выброшенных из ядра кометы, равна 2 км/с.

395. Указание. Учтите обстоятельство, связанное с календарем я обращения Земли вокруг Солнца.

396. Ответ: линейная концентрация следа больше, чем  $2.4 \cdot 10^{12}$  электронов/см, а мощность эхо равна  $1.5 \cdot 10^{-8}$  Вт.

397. Ответ: общее число метеоров, видимых на всей Земле за сутки, равно  $2.5 \cdot 10^{13}$ . Число метеоров с величиной  $m$  равно

$$N dm = 1.2 \cdot 10^{12} (2.512)^{m/2} dm.$$

Размеры метеорных тел соответственно равны: 0,54 см; 0,16 см; 0,014 см; 0,007 см.

398. Ответ: закон распределения частиц по массам имеет вид

$$n(M) dM = n(M_0) \left( \frac{M}{M_0} \right)^{\frac{\beta-2}{3}} dM.$$

399. Указание. Рассмотрите движение аппарата (по направлению движения планеты и против него) в системе отсчета, связанной с планетой.

400. Ответ: равновесие обеспечивается в случаях: а) и б) кулоновской силой в ионной решетке; в) равенством сил гравитации и давления вещества внутри планеты (например, жидких металлов); г) равенством сил гравитации и силы газового давления, а для массивных звезд — и сил давления излучения; д) равенством сил гравитации и давления вырожденного электронного газа.

## Приложение I ОСНОВНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И ЕДИНИЦЫ

Ниже мы приводим значения физических и астрономических постоянных и некоторых их соотношений, знание которых необходимо при решении задач. Наряду с точными значениями мы даем приближенные значения, удобные для запоминания и численных расчетов. Отметим, что в рамках данного сборника точность приближенных значений, даваемых ниже, достаточна для получения правильного ответа. Точные значения постоянных приводятся в основном в соответствии со справочником Аллена (1977). Как правило, величины приведены в системах СГС и СГСЭ. В скобках дана стандартная погрешность последнего десятичного знака.

### Физические константы.

#### Скорость света

$$c = 2,99792458 (1,2) \cdot 10^{10} \text{ см/с};$$

$$c \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}.$$

#### Гравитационная постоянная

$$G = 6,6720 (41) \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/(\text{г} \cdot \text{с}^2);$$

$$1/G \approx 1,5 \cdot 10^7 (\text{г} \cdot \text{с}^2)/\text{см}^2.$$

#### Постоянная Планка

$$h = 6,626176 (36) \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с};$$

$$h \approx 2\pi \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}.$$

#### Заряд электрона

$$e = 4,80325 (2) \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ};$$

$$e \approx 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ}.$$

#### Масса электрона

$$m_e = 9,109534 (47) \cdot 10^{-28} \text{ г};$$

$$m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ г} \approx 0,511 \text{ МэВ}.$$

#### Масса протона

$$m_p = 1,6726485 (86) \cdot 10^{-24} \text{ г};$$

$$m_p \approx (5/3) \cdot 10^{-24} \text{ г} \approx 938 \text{ МэВ}.$$

#### Масса атома водорода

$$m_H = 1,673559 (8,5) \cdot 10^{-24} \text{ г};$$

$$m_H \approx (5/3) \cdot 10^{-24} \text{ г}.$$

Разность масс нейтрона и протона в единицах массы электрона

$$\frac{m_n - m_p}{m_e} \approx 2,5.$$

Отношение масс протона и электрона

$$m_p/m_e = 1836,11;$$

$$m_p/m_e \approx 1836.$$

Масса, соответствующая единице атомной массы (шкала  $^{12}\text{C} = 12$ )

$$\text{а. е. м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-24} \text{ г};$$

$$\text{а. е. м.} \approx (5/3) \cdot 10^{-24} \text{ г}.$$

Постоянная Больцмана

$$k = 1,380662(44) \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К};$$

$$k \approx 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К}.$$

Универсальная газовая постоянная

$$\mathcal{R} = 8,31441 (26) \cdot 10^7 \text{ эрг/(К} \cdot \text{моль)};$$

$$\mathcal{R} \approx 8,31 \cdot 10^7 \text{ эрг/(К} \cdot \text{моль)}.$$

Число Авогадро

$$N_A = 6,022045 (31) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1};$$

$$N_A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Стандартная атмосфера

$$A_0 = 1013250 \text{ дин/см}^2 = 760 \text{ мм рт. ст.};$$

$$A_0 \approx 10^6 \text{ дин/см}^2.$$

Постоянная Ридберга для водорода

$$R_H = 109737,3177 (83) \text{ см}^{-1};$$

$$R_H \approx 10^5 \text{ см}^{-1}.$$

Постоянная тонкой структуры

$$\alpha = 2\pi e^2/hc = 7,297351(11) \cdot 10^{-3};$$

$$1/\alpha \approx 137.$$

Постоянная плотности излучения

$$a = 8\pi^5 k^4 / 15c^3 h^3 = 7,58464 \cdot 10^{-15} \text{ эрг/(см}^3 \cdot \text{К}^4);$$

$$a \approx 7,58 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/(см}^3 \cdot \text{К}^4).$$

Постоянная Стефана — Больцмана

$$\sigma = 5,67032(71) \cdot 10^{-5} \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{с)};$$

$$\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{с)}.$$

Соотношение между  $h$ ,  $c$  и  $\hbar$

$$\frac{hc}{k} = 1,438786 (45) \text{ см} \cdot \text{К};$$

$$\frac{hc}{k} \approx 1,44 \text{ см} \cdot \text{К}.$$

Сечение томсоновского рассеяния

$$\sigma_T = 6,652453(62) \cdot 10^{-25} \text{ см}^2;$$
$$\sigma_T \approx 6,65 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2.$$

Сечение томсоновского рассеяния в расчете на 1 г водорода

$$\kappa_T \approx 0,4 \text{ см}^2/\text{г}.$$

Температура, соответствующая 1 эВ ( $E_0/k$ )

$$1 \text{ эВ} = 11604,8 \text{ К};$$
$$1 \text{ эВ} \approx 11600 \text{ К}.$$

Энергия, соответствующая 1 эВ

$$1 \text{ эВ} = 1,602192(7) \cdot 10^{-19} \text{ эрг};$$
$$1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ эрг}.$$

Частота плазменных колебаний в плазме с плотностью  $n_e$  ( $\text{см}^{-3}$ )

$$\nu_p = 8,979 \cdot 10^3 n_e^{1/2} \text{ Гц};$$

$$\nu_p \approx 9 \sqrt{n_e} \text{ кГц}.$$

Астрономические константы.

Сидерический год

$$1 \text{ год} = 365^d,2664;$$

$$1 \text{ год} \approx \text{л} \cdot 10^7 \text{ с}.$$

Астрономическая единица

$$1 \text{ а. е.} = 1,495979(1) \cdot 10^{13} \text{ см};$$

$$1 \text{ а. е.} \approx 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см} \approx 215 R_{\odot} \approx 500 \text{ световых секунд}.$$

Парсек

$$1 \text{ пк} = 3,085678 \cdot 10^{18} \text{ см};$$

$$1 \text{ пк} \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см} \approx 3,26 \text{ светового года}.$$

Масса Солнца

$$M_{\odot} = 1,989(1) \cdot 10^{33} \text{ г};$$

$$M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33} \text{ г}.$$

Радиус Солнца

$$R_{\odot} = 6,9599 \cdot 10^{10} \text{ см};$$

$$R_{\odot} \approx 7 \cdot 10^{10} \text{ см}.$$

Светимость Солнца

$$L_{\odot} = 3,826(8) \cdot 10^{33} \text{ эрг/с};$$

$$L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}.$$

Масса Земли

$$M_{\oplus} = 5,976(4) \cdot 10^{27} \text{ г};$$

$$M_{\oplus} \approx 6 \cdot 10^{27} \text{ г} \approx 3 \cdot 10^{-6} M_{\odot}.$$

Средняя плотность Земли

$$\bar{\rho}_{\oplus} = 5,517(4) \text{ г/см}^3;$$

$$\bar{\rho}_{\oplus} \approx 5,5 \text{ г/см}^3.$$

Магнитный дипольный момент Земли

$$M_{\oplus} = 7,98 \cdot 10^{25} \text{ Э} \cdot \text{см}^2;$$

$$M_{\oplus} \approx 8 \cdot 10^{25} \text{ Э} \cdot \text{см}^2.$$

Соотношения между системами единиц.

Число угловых секунд в радиане

$$1 \text{ рад} = 206264",8;$$

$$1 \text{ рад} \approx 206265".$$

Ангстрем

$$1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}.$$

1 микрометр

$$1 \text{ мкм} = 10^{-4} \text{ см}.$$

1 дюйм

$$1 \text{ дюйм} \approx 2,54 \text{ см}.$$

сутки

$$1^d = 86\,400 \text{ с}.$$

Джоуль

$$1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}.$$

калория

$$1 \text{ кал} = 4,1854 \cdot 10^7 \text{ эрг}.$$

Ватт

$$1 \text{ Вт} = 10^7 \text{ эрг/с} = 1 \text{ Дж/с}.$$

Спектральный поток, соответствующий 1 янскому

$$1 \text{ Яп} = 10^{-20} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц}) = 10^{-20} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц}).$$

Соотношения между оптическими единицами и (подробнее см. Аллен, 1977)

Сила света (определяется как световой поток на 1 стерадиан) кандела (СИ)

1 кд = 1/60 силы света с 1  $\text{см}^2$  поверхности абсолютно черного тела при температуре 2044 К.

Световой поток люмен (СИ и СГС)

1 лм = потоку от источника с силой света 1 кд в 1 стерадиане.

Люмен в области максимальной чувствительности глаза = 5550  $\text{А}$

$$1 \text{ лм} = 1,470 \cdot 10^4 \text{ эрг/с}.$$

Поверхностная яркость

стильб

$$1 \text{ сб} = 1 \text{ кд/см}^2 = \pi \text{ лб} = 1 \text{ лм/см}^2 \cdot \text{ср}$$

Ламберт

$$1 \text{ Лб} = (1/\pi) \cdot \text{кд/см}^2 = 10^8 \text{ мЛб} = 1 \text{ лм/см}^2$$

для идеально матовой поверхности

апостильб

$$= 1 \text{ лм/м}^2 \text{ для идеально матовой поверхности};$$

$$= 10^{-4} \text{ Лб}.$$

нит (СИ)

$$1 \text{ нт} = 10^{-4} \text{ сб} = 1 \text{ кд/м}^2.$$

Освещенность

фот (СГС)

$$1 \text{ ф} = 1 \text{ лм/см}^2.$$

люкс (СИ)

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2 = 10^{-4} \text{ ф}.$$



Приложение II

ДИАГРАММА, ИЛЛЮСТРИРУЮЩАЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИИ

Диаграмма (рис. 63) с небольшими изменениями взята из работы Джипаккоки (1982). По оси ординат отложен логарифм спектральной плотности потока излучения, а по оси абсцисс — логарифм частоты электромагнитного излучения, принимаемого на Земле. Приведены спектры трех наблюдаемых объектов — остатка сверхновой (Крабовидной туманности), рентгеновского источника в двойной системе Sco X-1 (это самый яркий в рентгеновском диапазоне источник), ближайшего к

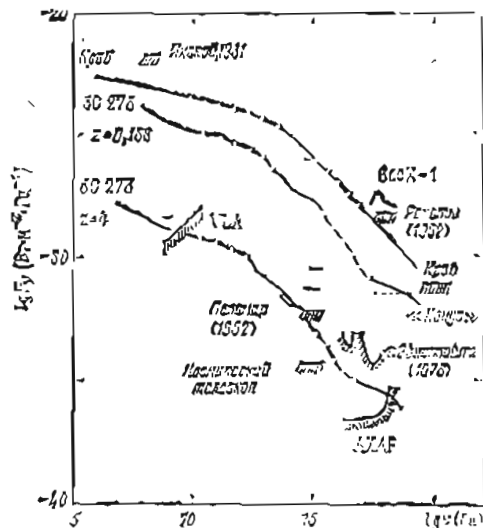


Рис. 63

нам квазара 3C 273 (красное смещение  $z=0,158$ ). Для сравнения приведен спектральный поток 3C 273, пересчитанный для красного смещения  $z=4$  (спектр при этом смещается вниз и влево). Заштрихованные снизу отрезки показывают чувствительность различных инструментов, с которыми был связан или связывается существенный прогресс в экспериментальной астрономии. В радиодиапазоне таковыми являются радиотелескоп Янского 1931 г. и радиотелескоп VLA — Very Large Array. В оптическом диапазоне показана чувствительность невооруженного глаза, телескопа Галилея (1610), 5-метрового телескопа (1952) Паломарской обсерватории и космического телескопа, запуск которого запланирован на 1986 г. В рентгеновской области важнейшими экспериментами были запуски гейгеровских счетчиков на ракетах (1962), создание специализированного рентгеновского спутника «Ухуру» в 1970 г. и рентгеновской обсерватории «Эйнштейн» в 1978 г.

В ближайшие годы планируется запуск рентгеновского спутника, обладающего рекордной чувствительностью, АХАФ. В гамма-диапазоне показана чувствительность детекторов в советском эксперименте «Конус» (1979).

Приложение III

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Боллометрическая поправка  $\Delta m_b = m_b - m_{pv}$  в функции температуры  $T$  (К) и спектрального класса

$\lg T$	$\Delta m_b$	Спектр	$\Delta m_b$		
			Главная последовательность	Гиганты	Сверхгиганты
5,0	-6,3 <sup>m</sup>	O5	-4,6 <sup>m</sup>		-3,0 <sup>m</sup>
4,8	-4,8	B0	-3,0		
4,6	-3,55	B5	-1,6		-0,7
4,4	-2,16	A0	-0,68		
4,2	-1,5	A5	-0,30		
4,1	-0,8	F0	-0,10		-0,2
4,0	-0,7	F5	0,00		
3,9	-0,15				
3,8	-0,05	G0	-0,03	-0,1 <sup>m</sup>	-0,30
3,7	-0,2	G5	-0,10	-0,3	-0,6
3,6	-0,9	K0	-0,20	-0,6	-1,0
3,5	-1,7	K5	-0,58	-1,0	-1,6
3,4	-3,1	M0	-1,2	-1,7	-2,5
3,3	-4,6	M5	-2,1	-3,0	-4,0
3,2	-7,0				

Таблица 2. Плотность  $u_\lambda$  излучения в межзвездном пространстве, его цветовая температура  $T_c$  и коэффициент диллюции  $W$  ( $u_\lambda$  в единицах  $10^{-20}$  эрг/(см<sup>2</sup>·Å))

$\lambda, \text{Å}$	$u_\lambda$	$T_c, \text{K}$	$W$	$\lambda, \text{Å}$	$u_\lambda$	$T_c, \text{K}$	$W$
504	440	40 000	$2,6 \cdot 10^{-19}$	3500	2800	7500	$6,0 \cdot 10^{-12}$
750	460			3646—	2900		
912—	540			3646+	5400		
912—	24000	50 000	$6,5 \cdot 10^{-18}$	4000	5100	8000	$8,0 \cdot 10^{-12}$
1000	20000			4500	5000		
1250	14000			5000	4800		
1500	8700	30 000	$2,8 \cdot 10^{-17}$	5500	4800	5000	$8,7 \cdot 10^{-12}$
1750	5600			6000	4700		
2000	4300			6500	4700		
2500	3100	15 000	$2,4 \cdot 10^{-16}$	7000	4600	4000	$2,4 \cdot 10^{-12}$
3000	2700			7500	4500		
				8000	4500		

Таблица 3. Некоторые физические характеристики галактик (преимущественно близких)

Название галактики	Тип	Диаметр		Расстояние, кпк	V
		d'	D, кпк		
Млечный Путь — Галактика	Sb		25	(10)	
Большое Магелланово Облако	IrIII	470	7	52	0,1
Малое Магелланово Облако	IrIV	216	4	69	2,4
Туманность Андромеды					
M 31 = NGC 224	Sb	163	38	670	3,5
Спутник ее M 32 = NGC 221	E2	5	1,2	660	8,2
Спутник ее NGC 205	E5p	12	2,8	640	8,2
Туманность в Треугольнике M 33 = NGC 598	Sc	62	15	730	5,8
Система в Скульпторе	dE	45	1,3	110	7
Система в Печи	dE	50	3	200	7
NGC 6822	IrIV	20	5	910	9,1
NGC 147	dE4	9	3	660	9,6
NGC 185	dE0	6	2	660	9,6
IC 1613	IrV	12	3	910	9,7
Система Вольфа — Лунд-марка	E5	10	4	1300?	10,8
NGC 6946	Sc	22	10	1600	9
NGC 2403	Sc	8	4	1900	8,4
M 81 = NGC 3031 в В. Медведице	Sc	25	18	3800	6,9
M 82 = NGC 3034 в В. Медведице	IrII	10	11	3800	8,2

Название галактики	B-V	M <sub>V</sub>	Лучевая скорость, км/с	$lg \frac{M}{M_{\odot}}$	$\frac{M}{M_{\odot}} \cdot L$
Млечный Путь — Галактика	0,8 <sup>m</sup>	-20,5 <sup>m</sup>		11,2	8
Большое Магелланово Облако	0,45	-18,7	+276	10,1	5
Малое Магелланово Облако	0,4	-16,9	+168	9,2	3
Туманность Андромеды					
M 31 = NGC 224	0,98	-21,0	-270	11,5	10
Спутник ее M 32 = NGC 221	0,9	-16,3	-210	9,6	15
Спутник ее NGC 205	0,8	-16,3	-240	9,9	30
Туманность в Треугольнике M 33 = NGC 598	0,55	-18,7	-190	10,1	5

Продолжение

Название галактики	B-V	M <sub>V</sub>	Лучевая скорость, км/с	$lg \frac{M}{M_{\odot}}$	$\frac{M}{M_{\odot}} \cdot L$
Система в Скульпторе	0,8	-13		8,5	24
Система в Печи	0,8	-15	+40	(9)	
NGC 6822	0,5	-16,3	-40	8,6	2
NGC 147	0,9	-15,8		9	6
NGC 185	0,9	-15,9	-340	9	6
IC 1613	0,5	-15,2	-240	7,9	1
Система Вольфа — Лунд-марка	0,5	-14,8			
NGC 6946	0,8	-17	+40		
NGC 2403	0,6	-18	+190	9,7	4
M 81 = NGC 3031 в В. Медведице	1,02	-20,9	+80	11,1	4
M 82 = NGC 3034 в В. Медведице	0,91	-19,6	+400	10,4	14

Таблица 4. Основные орбитальные и физические характеристики планет Солнечной системы

Название планеты	Большая полуось орбиты, а е	Сидерический период в годах	Эксцентриситет	Наклонение орбиты к эклиптике	Экваториальный радиус, км
Меркурий	0,387	0,241	0,206	7°0,2'	2430
Венера	0,723	0,615	0,007	3 23,6	6052
Земля	1,000	1,000	0,017		6378
Марс	1,524	1,881	0,093	1 51,0	3395
Юпитер	5,203	11,862	0,048	1 18,5	70850
Сатурн	9,539	29,458	0,056	2 29,5	60400
Уран	19,18	84,015	0,047	0 46,3	24600
Нептун	30,06	164,79	0,009	1 46,8	23500
Плутон	39,75	250,6	0,253	17 8,7	3000

Название планеты	Масса, $M_{\oplus}=1$	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Ускорение силы тяжести, см/с <sup>2</sup> на экв.	Скорость ускользания, км/с	Период вращения (звездный)
Меркурий	0,056	5,59	372	4,3	88 <sup>d</sup>
Венера	0,815	5,22	869	10,3	243 <sup>d</sup>
Земля	1,000	5,52	978	11,2	23 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup> 4,1 <sup>s</sup>
Марс	0,108	3,97	372	5,0	24 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 22,7 <sup>s</sup>
Юпитер	317,82	1,30	2301	57,5	9 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 41 <sup>s</sup>
Сатурн	95,11	0,71	944	37	10 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup>
Уран	14,52	1,47	967	22	10 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>
Нептун	17,23	2,27	1500	25	15 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>
Плутон	0,18	10,4	800	10	6,4 <sup>d</sup>

Таблица 5. Геометрическое альbedo  $A_g$  (в системах V и B) и сферическое альbedo  $A_s$  планет и некоторых спутников, и также их фазовый интеграл  $q$  (об этом см. КОА, гл. VIII) и абсолютная звездная величина  $g$  в системе V (двоочерком обозначены ненадежные данные).

Планеты, спутники	$A_{gV}$	$A_{gB}$	$q_V$	$A_{sV}$	$g$
Меркурий	0,10	0,08	0,563	0,06	-0,36 <sup>m</sup>
Венера	0,59	0,49	1,296	0,76	-4,29
Земля	0,39		1,095	0,36	-3,87
Марс	0,15	0,08	1,04	0,16	-1,52
Юпитер	0,44	0,37	1,65	0,73	-9,25
Сатурн	0,46	0,32	1,65	0,76	-8,88
Уран	0,56	0,60	1,65	0,93	-7,19
Нептун	0,51	0,62	1,65	0,84	-6,87
Плутон	0,13:	0,11:	1,04	0,14	-1,01
Луна	0,12	0,09	0,585	0,067	+0,21
Юпитер I	0,92:	0,56	0,585	0,54	-1,99
Юпитер II	0,83:	0,67	0,585	0,49	-1,53
Юпитер III	0,49	0,41	0,585	0,29	-2,16
Юпитер IV	0,26	0,21	0,585	0,15	-1,23
Рея	0,82:	0,73	0,585	0,48	+0,21
Титан	0,12	0,21	0,585	0,12	-1,16
Тритон	0,36	0,32	0,585	0,21	-1,16

Таблица 6. Распределение энергии в спектре Веги ( $\alpha$  Лyg, HD 172167).  $U - B = 0,00^m$ ;  $B - V = 0,00^m$ ;  $V = 0,03^m$ ; Sp A0 V.

Область спектра	U	B	V	R
Эффективная длина волны $\lambda$ , Å	3600	4300	5500	7000
Энергия кванта, соответствующего эффективной длине волны, эрг	$5,51 \cdot 10^{-13}$	$4,62 \cdot 10^{-12}$	$3,61 \cdot 10^{-13}$	$2,84 \cdot 10^{-12}$
Поток энергии в данной области спектра, эрг/(см <sup>2</sup> ·с)	$1,71 \cdot 10^{-6}$	$6,18 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-6}$	$4,00 \cdot 10^{-6}$
Поток числа фотонов в данной области спектра, см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$3,11 \cdot 10^5$	$1,34 \cdot 10^6$	$8,65 \cdot 10^5$	$1,41 \cdot 10^6$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аллен К. У. Астрофизические величины.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Мир, 1977.— 446 с.
- Вейдеманн Ф. Белые карлики.— В кн.: Белые карлики.— М.: Мир, 1975, с. 23—54.
- Giassoni R. The Space telescope observatory.— Preprint NASA SP-2244, 1982, 55 p.
- Зельдович Я. Б., Блиинников С. И., Шакура Н. И. Физические основы строения и эволюции звезд.— М.: Изд-во МГУ, 1981.— 159 с.
- Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд.— М.: Наука, 1971.— 484 с.
- Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1975.— 735 с.
- Звезды и звездные системы: Сб. статей / Под ред. Д. Я. Мартынова.— М.: Наука, 1981.— 416 с.
- Курс астрофизики и звездной астрономии т. 1 / Под ред. А. Л. Михайлова.— 3-е изд.— М.: Наука, 1973.— 608 с.
- Липунов В. М., Сурдин В. Г. Загадка SS 433.— Земля и Вселенная, 1980, № 4, с. 20—25.
- Каплан С. А. Физика звезд.— М.: Наука, 1977.— 207 с.
- Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Физика межзвездной среды.— М.: Наука.— 591 с.
- Маров М. Я. Планеты Солнечной системы.— М.: Наука, 1981.— 256 с.
- Мартынов Д. Я. Курс практической астрофизики (КПА).— 3-е изд., перераб.— М.: Наука, 1977.— 543 с.
- Мартынов Д. Я. Курс общей астрофизики (КОА).— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Наука, 1979.— 640 с.
- Москаленко Е. И. Методы внеатмосферной астрономии.— М.: Наука, 1984.— 280 с.
- Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики.— 3-е изд., перераб.— М.: Наука, 1985.— 502 с.
- Trümper J., Pietsch W., Reppin C., Voges W., Staubert R., Kendziora E. Evidence for strong cyclotron line emission in the hard X-ray spectrum of Hercules X-1.— Astrophysical Journal Letters, 1978, v. 219, p. L105—L110.
- Цесевич В. П. Фотометрические фазы затмений.— В кн.: Затменные переменные звезды / Под ред. В. П. Цесевича.— М.: Наука, 1971.— 352 с.
- Шкловский И. С. Сверхновые звезды.— 2-е изд.— М.: Наука, 1976.— 440 с.
- Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть.— 3-е изд.— М.: Наука, 1984.— 394 с.
- Физика космоса (Маленькая энциклопедия).— М.: Советская энциклопедия, 1976.— 655 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Раздел I. Практическая астрофизика . . . . .	5
Глава I. Основные астрономические инструменты . . . . .	5
Глава II. Приемники излучения . . . . .	12
Глава III. Методы астрофизических исследований . . . . .	18
Раздел II. Задачи по общей астрофизике . . . . .	24
Глава IV. Солнце . . . . .	24
Глава V. Звездные атмосферы . . . . .	30
Глава VI. Двойные звезды и массы звезд . . . . .	34
Глава VII. Внутреннее строение звезд . . . . .	41
Глава VIII. Нестационарные звезды . . . . .	46
Глава IX. Диффузная материя в пространстве . . . . .	57
Глава X. Галактики и Метагалактика . . . . .	63
Глава XI. Солнечная система. Планеты и их спутники . . . . .	70
Глава XII. Солнечная система. Кометы, астероиды и метеорные тела . . . . .	75
Раздел III. Ответы и решения . . . . .	79
Приложение I. Основные астрофизические константы и единицы . . . . .	118
Приложение II. Диаграмма, иллюстрирующая возможности современной астрономии . . . . .	122
Приложение III. Таблицы . . . . .	123
Список литературы . . . . .	127