

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Кафедра астрономии и космической геодезии

Г.В. ЖУКОВ, Р.Я. ЖУЧКОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ
В АСТРОНОМИИ**

Учебно-методическое пособие

Казань – 2015

УДК 524.31, 524.45-333
ББК 22

*Принято на заседании кафедры астрономии и космической геодезии
Протокол № 12 от 15 мая 2015 года*

Рецензент

кандидат физико-математических наук,
доцент Казанского государственного энергетического университета
Н.К. Петрова

Жуков Г.В., Жучков Р.Я.

Определение расстояний в астрономии / Г.В. Жуков, Р.Я. Жучков. – Казань:
Казан. ун-т, 2015. – 44 с.

В учебно-методическом пособии рассматриваются два метода определения расстояний в астрономии, по существу тригонометрические, но с привлечением дополнительных данных о физических характеристиках звезд и межзвездной среды. Каждый метод сопровождается практической работой для студентов 3 курса специальности «астрономия».

Методическое пособие адресовано, в первую очередь, студентам специальностей «астрономия» и «физика», а также широкому кругу читателей, интересующихся указанными проблемами.

© Жуков Г.В., Жучков Р.Я. 2015

© Казанский университет, 2015

Оглавление

Введение	4
Динамические параллаксы	8
Пример вычисления динамического параллакса	12
Определение расстояний до рассеянных скоплений (с учетом межзвездного поглощения)	15
Пример определения расстояния до скопления	18
Литература	22
Приложение 1. Исходные параметры визуально-двойных звезд	23
Приложение 3. К.У. Аллен «Астрофизические величины», глава 10	
Приложение 3. Список скоплений для определения расстояний	44

Моя работа была бы невозможна, если бы
не было фундамента, создаваемого
результатами астрометрии.

М. Шварцшильд

Введение

Расстояние до объекта является одной из основных характеристик, которые определяются из астрономических наблюдений. Более того, только знание расстояний позволяет определять многие характеристики звезд, такие как светимости, массы, размеры и другие.

Шкала расстояний в астрономии основана на знании расстояния между Землей и Солнцем (астрономическая единица, а.е.), которое определяется несколькими способами – старейшим из них является прямое измерение суточного параллакса Солнца. Из-за ряда трудностей (яркость Солнца, тепловые деформации инструмента) этот метод наименее точен. Из третьего закона Кеплера легко определяется взаимное положение планет в Солнечной системе. Остается только масштабировать его, что достигается с высокой точностью определением параллакса Венеры из наблюдений ее прохождения по диску Солнца либо радиолокацией планеты.

Расстояния до звезд первоначально определялись тоже только тригонометрическим методом. Определение годичного параллакса опирается именно на надежное знание 1 а.е. Точность наземных измерений параллаксов ограничена земной атмосферой и составляет приблизительно $\pm 0.01''$. Геометрическими по существу являются статистические и групповые параллаксы (параллаксы движущихся скоплений). Последние обладают высокой точностью и лежат в основе шкалы астрономических расстояний, обеспечивая связь между тригонометрическими и фотометрическими методами.

Как видно из вышесказанного, в астрономии не существует универсального метода измерения расстояний до небесных объектов. По мере перехода ко

все более удаленным телам один метод сменяет другой. Так, расстояния между планетами измеряются с помощью радиолокации. Межзвездные расстояния вплоть до 100 парсеков раньше измеряли с помощью тригонометрических параллаксов (HIPPARCOS отодвинул эту границу до 1000 парсеков). Вплоть до расстояний в миллионы парсеков (Мпк) используется метод цефеид. Еще более далекие объекты – галактики и квазары удалены от нас на сотни и тысячи мегапарсеков. Такие расстояния измеряются по красному смещению и требуют знания постоянной Хаббла. Естественно думать, что при передаче эстафеты от одного метода другому, каждый из "старших" методов должен быть проверен с помощью "младшего" метода. Для этого должны существовать области перекрытия, в которых можно применять по крайней мере два метода (рис. 1).

Наиболее надежными годичными параллаксами нас обеспечивают заатмосферные наблюдения – точность спутника Гиппаркос достигает $\pm 0.001''$. В любом случае прямые методы (тригонометрические) позволяют определять расстояния, не превышающие 1 Кпк. Более удаленные объекты дистанцируются косвенными методами (фотометрическими): блеск убывает пропорционально квадрату расстояния и если известна светимость звезды, можно найти расстояние. Примерами могут служить «спектральные параллаксы» - по статистическим зависимостям интенсивности линий от светимости или «цефеидные параллаксы» - по зависимости «период светимость». Точность фотометрических методов ограничивается дисперсией эмпирических зависимостей и, как правило, не превышает $\pm 25\%$.

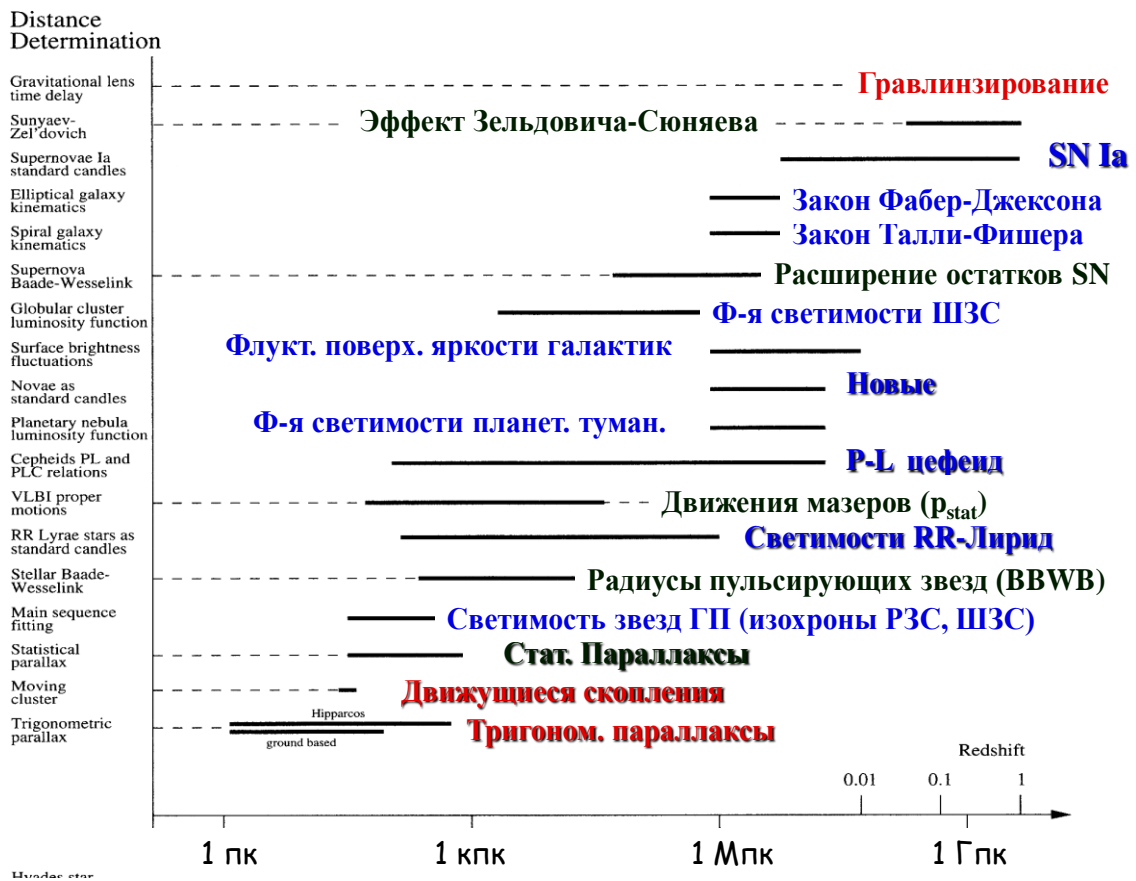


Рис.1. Иерархия методов определения расстояний во Вселенной (красный цвет – прямые методы, черный – промежуточные, синий – косвенные)

Основным фотометрическим методом является метод цефеид. Еще в 1908 году Г. Ливитт, изучая переменные в Малом Магеллановом Облаке (ММО) отметила, что более яркие цефеиды имеют больший период. Поскольку все переменные находятся на одном расстоянии (размеры ММО много меньше расстояния до него), то достаточно знать светимость хотя бы одной такой цефеиды, чтобы для любой звезды данного типа по зависимости «период-светимость» ($P - L$) определить расстояние. Однако в окрестности Солнца, доступной для определения расстояний тригонометрическим методом, нет ни одной цефеиды. Поэтому Х. Шепли считал, что переменные в шаровых скоплениях с похожими кривыми блеска (впоследствии – пульсирующие типа $RRLyr!$), имеют такую же светимость, что и цефеиды. Таким образом, нуль пункт зависимости $P - L$ оказался занижен на 1.5^m . Использование такой зависимости привело к существенному занижению размеров

туманности Андромеды (*M31*) и светимости объектов в ней. Ошибка сохранялась почти 30 лет до тех пор, пока В. Бааде, а затем Д. Ирвин не разрешили эту проблему, создав современную шкалу расстояний во Вселенной. Основанием для этого явилось обнаружение нескольких цефеид в рассеянных скоплениях, расстояния до которых уверенно определяются по диаграмме Герцшпрунга – Рассела: таким образом, проблема нуля пункта зависимости $P - L$ цефеид оказалась связана с проблемой шкалы расстояний рассеянных скоплений.

Как уже указывалось, в сфере радиусом 100 парсеков нет ни одной цефеиды (одна из ближайших к нам цефеид – это Полярная звезда, она удалена от нас на 122 парсека). Поэтому до реализации проекта Гиппаркос (*HIPPARCOS*) шкала расстояний, основанная на цефеидах в скоплениях, не была согласована с результатами прямых измерений до звезд методами тригонометрических параллаксов. Теперь ситуация изменилась: шкала цефеид была уточнена, на основании чего было сделано заключение о том, что принятое в настоящее время значение постоянной Хаббла должно быть уменьшено на 5-10 процентов.

К сожалению, эксперимент Гиппаркос не сумел дать окончательный ответ о нуле пункте. К примеру, расстояние до δ Цефея было определено в 278 (+48/-35) пк (Гиппаркосом в комбинации с наземными определениями), в то время как интерферометрические наблюдения дают 262 ± 6 пк. Хорошо, что возможная ошибка уменьшена с 1.5^m до 0.2^m .

Кроме того, было обнаружено, что наклон зависимости $P - L$ для цефеид Галактики и БМО различается; вероятным объяснением является различие химического состава звезд в разных галактиках.

Рассмотрим некоторые методы определения расстояний, по существу тригонометрические, но использующие данные о физических параметрах звезд и межзвездной среды.

I. Динамические параллаксы

Возможность независимого определения размеров орбит визуально-двойных звезд из анализа их движения позволила применить тригонометрический метод определения расстояний, намного больших, чем при наблюдениях годовых параллаксов. Это обусловлено существенно большими размерами орбит двойных, нежели земная орбита. Рассмотрим схему определения динамического параллакса (рис. 2).

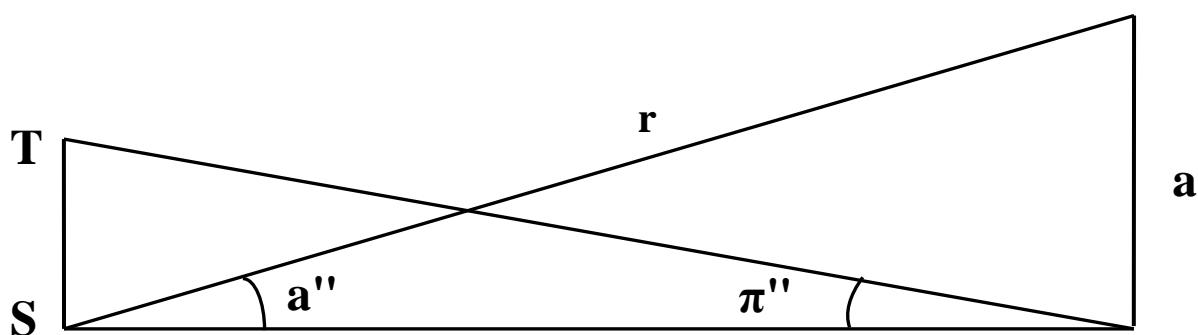


Рис. 2. T – Земля, S – Солнце, a и a'' – большая полуось орбиты визуально-двойной звезды в линейных и угловых единицах, π'' – параллакс

Из наблюдений стандартными методами (рис. 3) получают большую полуось a'' и период P двойной системы. Измерения орбиты в двойной системе чаще всего выполняются относительно более яркой компоненты (A на рис. 3б). Обратите внимание, что наблюдаемый эллипс является проекцией истинного эллипса на картинную плоскость, а компонента A не находится на линии апсид (большой оси видимого эллипса). Именно этот факт позволяет найти угол наклона плоскости орбиты и вычислить параметры истинной орбиты: большую полуось и наклонение. В тех случаях, когда длительный период не позволяет получить наблюдения за целый оборот, часть эллипса восстанавливают до целого (при этом теряется точность).

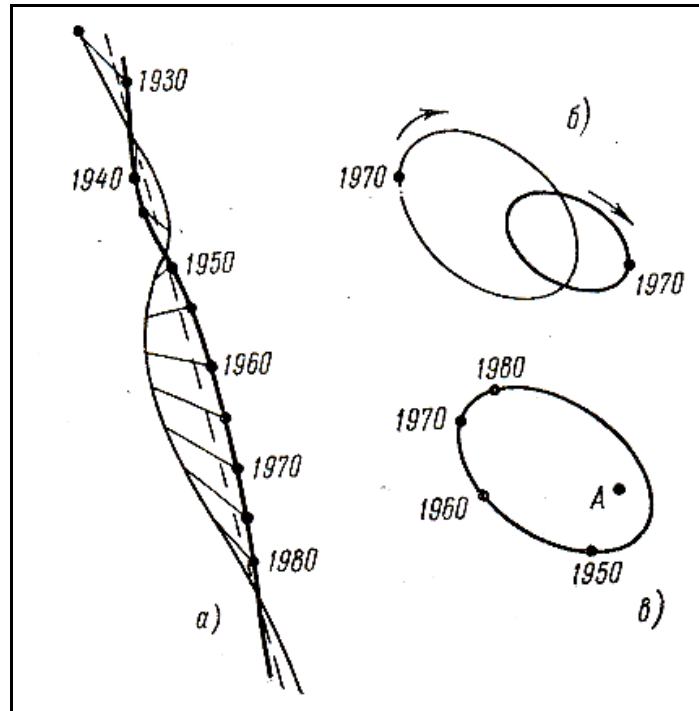


Рис. 3. Абсолютная и относительная орбиты
визуально-двойной системы

Из третьего закона Кеплера имеем:

$$a = ((G P^2 (M_1 + M_2)) / 4\pi^2)^{1/3},$$

или, если выразить большую полуось в а.е, период в земных годах, а массы в массах Солнца:

$$a = (P^2 (M_1 + M_2))^{1/3},$$

а затем вычисляем параллакс ($r = a(\text{а.е.})/a''$, $\sin a'' \approx a''(\text{рад}) = a/r$), если известны массы звезд:

$$\pi'' = a'' / (P^2 (M_1 + M_2))^{1/3} \quad (1)$$

(Получение масс звезд – самостоятельная задача, для решения которой надо знать расстояние до двойной системы.)

Поскольку в уравнении (1) две неизвестных величины – расстояние и сумма масс компонент, нахождение динамического параллакса проводится методом последовательных приближений. На первом этапе предположим, что масса каждой компоненты равна массе Солнца (M_0) и вычислим параллакс двойной. Далее

уточняем массы звезд по зависимости «масса – светимость» (рис. 4, табл. 2), для чего из видимых звездных величин компонент получаем абсолютные величины, а из последних получаем абсолютные болометрические величины $M_{bol} = M_V + B.C.$ Болометрические поправки приведены на рисунках 5а, 5б.

На втором и следующих этапах вновь решаем уравнение (1) и из сравнения разницы двух последних значений расстояния с точностью наблюдений, делаем вывод о достижении необходимого результата.

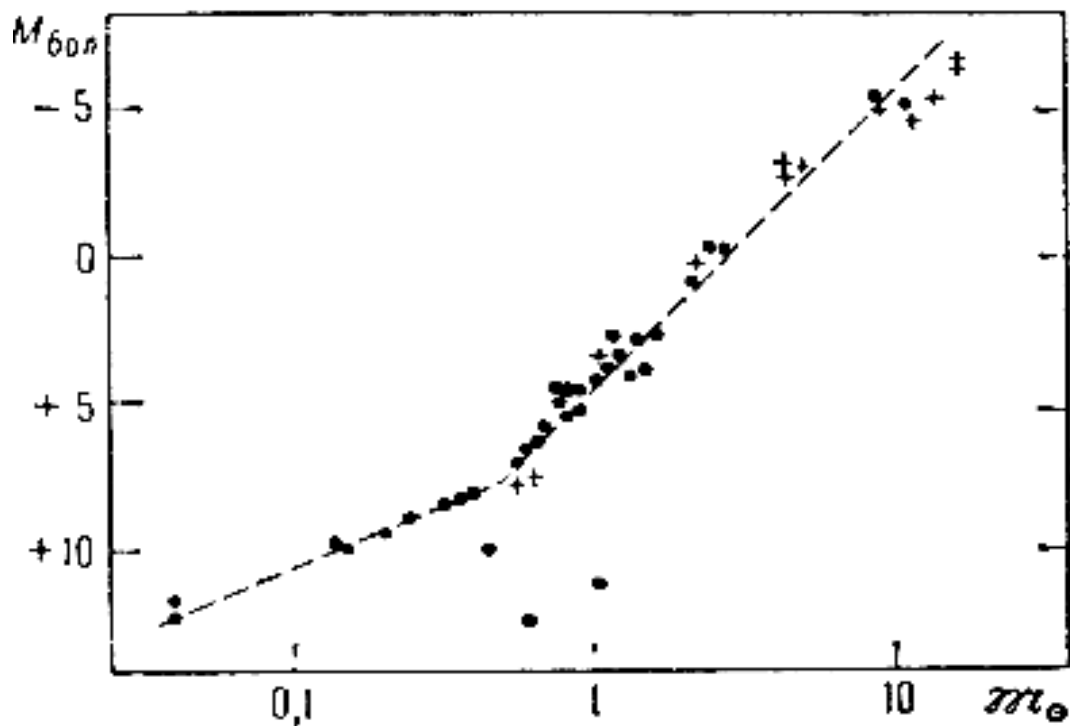


Рис. 4. Диаграмма «масса – светимость» для звезд ГП. Три точки ниже зависимости – белые карлики (класс светимости VII)

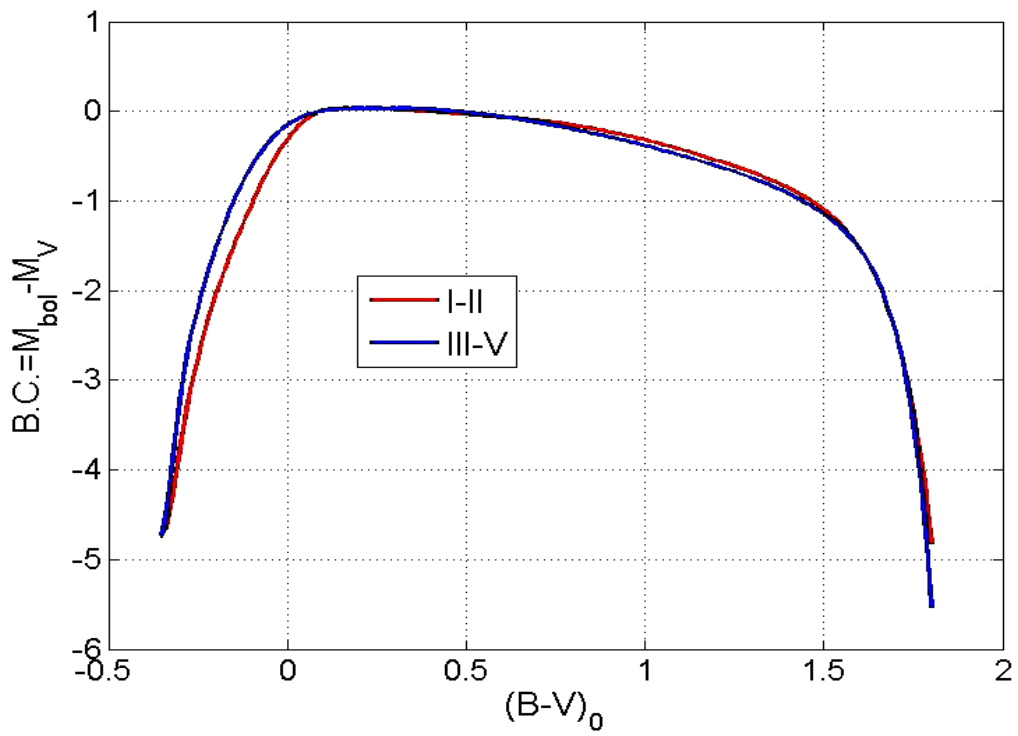


Рис. 5а. БолOMETрические поправки в зависимости от цвета (B-V)

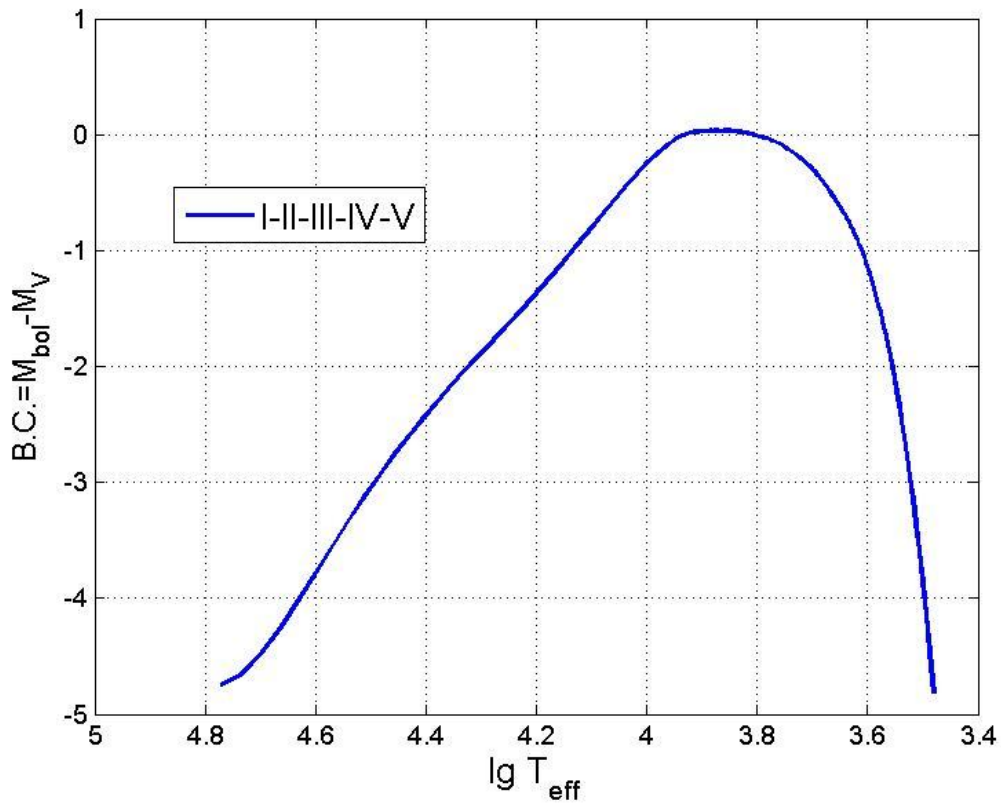


Рис. 5б. БолOMETрические поправки в зависимости от эффективной температуры звезды

Пример вычисления динамического параллакса.

В таблице (Приложение 1) имеем следующие наблюдаемые параметры двойной: обозначение звезды, координаты α , δ , видимые звездные величины и спектральные классы компонент, период и большая полуось орбиты.

N	Звезда	Коорд. 2000.0	m_{V1}	m_{V2}	$Sp1$	$Sp2$	P (лет)	a''
0	α Cen	14 39.6 – 60 50	- 0.04	1.17	G2V	K0V	79.92	17.52

1. Принимаем $(M_1 + M_2) = 2 M_{\odot}$ и находим по формуле (1) предварительное значение параллакса – $\pi'' = 0.749$.

2. Вычисляем предварительные значения абсолютных звездных величин компонент: $M_{V1} = m_{V1} + 5 + 5 \lg \pi'' = 4.33^m$; аналогично $M_{V2} = 5.54^m$.

3. Так как в соотношении « $M - L$ » используется болометрическая светимость, найдем болометрические поправки BC к абсолютным величинам в справочнике К.У. Аллена «Астрофизические величины» (приложение 2) по таблице «Цвета, температуры и болометрические поправки звезд», параграф 99 (и таблица 1) для звезд ГП.

4. Линейным интерполированием находим величину поправки для спектрального класса G2 – (-0.05^m), откуда $M_{bol1} = 4.28^m$; для класса K0 $BC = -0.19$, откуда $M_{bol2} = 5.35^m$.

5. По соотношению « $M - L$ » (Аллен, таблица 2 «Зависимость светимости и радиуса звезды от ее массы» (исключая белые карлики), параграф 100, приложение 2) массы звезд спектральных классов G2 и K0 – 1.10 и 0.85 M_{\odot} .

6. Масса двойной перед второй итерацией – 1.95 M_{\odot} , что приводит к параллаксу 0.756". Абсолютные величины – $M_{V1} = 4.35^m$; $M_{V2} = 5.56^m$, а боломет-

Таблица 1

Цвета, температуры и болометрические поправки звезд

Sp	M_V	$(B - V)_0$	$(U - B)_0$	T_{eff}	BC	M_{bol}
		[1, 2, 5, 6, 8, 10, 12, 21, 25, 27, 28]				
Главная последовательность, V						
O5	-5,8	-0,35	-1,15	40 000	-4,0	-10
B0	-4,1	-0,31	-1,06	28 000	-2,8	-6,8
B5	-1,1	-0,16	-0,55	15 500	-1,5	-2,6
A0	+0,7	0,00	-0,02	9 900	-0,40	+0,1
A5	+2,0	+0,13	+0,10	8 500	-0,12	+1,7
F0	+2,6	+0,27	+0,07	7 400	-0,06	+2,6
F5	+3,4	+0,42	+0,03	6 580	0,00	+3,4
G0	+4,4	+0,58	+0,05	6 030	-0,03	+4,3
G5	+5,1	+0,70	+0,19	5 520	-0,07	+5,0
K0	+5,9	+0,89	+0,47	4 900	-0,19	+5,8
K5	+7,3	+1,18	+1,10	4 130	-0,60	+6,7
M0	+9,0	+1,45	+1,28	3 480	-1,19	+7,8
M5	+11,8	+1,63	+1,2	2 800	-2,3	+9,8
M8	+16	+1,8		2 400		

Таблица 2

Зависимость светимости и радиуса звезды от ее массы (исключая белые карлики)

$\lg (M / M_{\odot})$	M_{bol}	$\lg (L / L_{\odot})$	M_V	M_B	$\lg (R / R_{\odot})$, главная последовательность [1]
	[1-5]				
-1,0	+12,1	-2,9	15,5	+17,1	-0,9
-0,8	+10,9	-2,5	13,9	+15,5	-0,7
-0,6	+9,7	-2,0	12,2	+13,9	-0,5
-0,4	+8,4	-1,5	10,2	+11,8	-0,3
-0,2	+6,6	-0,8	7,5	+8,7	-0,14
0,0	+4,7	0,0	4,8	+5,5	0,00
+0,2	+2,7	+0,8	2,7	+3,0	+0,10
+0,4	+0,7	+1,6	1,1	+1,1	+0,32
+0,6	-1,1	+2,3	-0,2	-0,1	+0,49
+0,8	-2,9	+3,0	-1,1	-1,2	+0,58
+1,0	-4,6	+3,7	-2,2	-2,4	+0,72
+1,2	-6,3	+4,4	-3,4	-3,6	+0,86
+1,4	-7,6	+4,9	-4,6	-4,9	+1,00
+1,6	-8,9	+5,4	-5,4	-6,0	+1,15
+1,8	-10,2	+6,0	-6,3	-6,9	+1,3

рические – $M_{\text{bol}1} = 4.3^m$, $M_{\text{bol}2} = 5.37^m$. Массы при второй итерации составляют 1.10 и 0.85. Значение параллакса во второй итерации равно 0.756". Окончательное

значение параллакса $0.756''$, поскольку наземные наблюдения имеют исходную угловую точность не лучше $\pm 0.001''$. На практике, если сумма масс звезд существенно отличается от $2M_{\odot}$, потребуется больше итераций, но как правило, не более 5.

Сравним полученный динамический параллакс $0.756''$ с тригонометрическим, выполненным наземными способами и равный $0.754''$ (каталог 50 самых близких звезд, Э.В. Кононович, В.И. Мороз « Курс общей астрономии» или по данным каталогов в Интернете). Результаты сходятся в пределах ошибок.

Задание: каждый студент получает для расчетов две звезды из списка (Приложение 1), проводит вычисления динамического параллакса и сравнивает со значениями тригонометрического параллакса по данным каталогов. При значительном расхождении результатов анализируются его причины.

В отчете представляются: идея метода динамического параллакса и расчеты параллакса по каждой итерации.

Контрольные вопросы:

- определения звездных величин и показателей цвета;
- болометрическая поправка и ее смысл;
- методы наблюдений визуальных двойных звезд;
- идея метода динамического определения расстояний;
- недостатки и преимущества динамического параллакса.

II. Определение расстояний до рассеянных скоплений (с учетом межзвездного поглощения)

Первые фотометрические исследования рассеянных скоплений (РС) в системе UVV показали, что тонкая цепочка на диаграмме «цвет-величина» для звезд скопления соответствует главной последовательности и в верхней части поворачивает вверх и вправо. Звезды главной последовательности наиболее многочисленные звезды, в которых энергия выделяется в реакции синтеза гелия из водорода. Численность звезд определяется продолжительностью этой реакции – следовательно, временем жизни звезды на данной стадии, которое со своей стороны пропорционально массе звезды и обратно пропорционально ее светимости. Таким образом, отклонение верхней части Главной последовательности (ГП) связано с более быстрой эволюцией наиболее массивных звезд в рассеянных скоплениях, а сама ГП является изохроной – линией, на которой расположены звезды разных масс, но одного возраста. Осознание этих фактов позволило построить сводную диаграмму скоплений и получить точное положение последовательности, являющееся исходной, начальной ГП (ИГП, НГП или *ZAMS – Zero Age Main Sequence*, рис. 1). Нуль-пункт сводной диаграммы основан на расстоянии до Гиад, которое надежно определяется ввиду их близости.

Введя понятие ИГП, Сендидж и Джонсон в 1956 году получили новый метод определения расстояний до рассеянных скоплений. Типичные размеры РС не превышают 10 пк, поэтому все звезды скопления можно считать находящимися на одном расстоянии. Из сравнения наблюдаемой ГП (видимые звездные величины m) скопления с НГП (абсолютные звездные величины M) в области, не затронутой эволюцией мы получаем модуль расстояния $(m_V - M_V) = 5 \lg r - 5$.

Кажущаяся простота метода обременена межзвездным поглощением света $A_V(r)$, которое наиболее сильно в диске Галактики – именно в нем расположено большинство скоплений (Рис. 6).

Очевидное из существования темных туманностей предположение о межзвездном поглощении света, намного позже подтвердилось в исследованиях рас-

сеянных скоплений, выполненных Р. Трюмплером в 1930 году. Он выявил, что для скоплений одного класса, диаметры которых естественно считать одинаковыми, наблюдается систематическое увеличение диаметра с расстоянием. Вместе с этим наблюдалось и увеличение показателя цвета. Размеры далеких скоплений оказались большими вследствие завышения расстояний до них. Поглощение света происходит в тонком слое в плоскости Млечного Пути (рис. 7, 8). Плотность пыли неравномерна, но в среднем увеличивается с расстоянием.

Полное поглощение $A_V(r) = a_V \cdot r$, где a_V – поглощение на 1 Кпк, r – расстояние в Кпк. С другой стороны оказалось, что отношение $A_V(r)/CE = R_V$, где CE – избыток цвета, а параметр R_V – постоянная величина для данной фотометрической полосы. В системе UBV избыток цвета:

$$E_{(B-V)} = (B-V) - (B-V)_0, \quad (1)$$

где $(B-V)$ – наблюдаемый, а $(B-V)_0$ – непокрашенный показатели цвета.

Постоянная $R_V = 3.1$.

Полное поглощение света, вызываемое пылью, пропорционально покраснению. По близким звездам (без поглощения) можно определить их нормальные цвета и сопоставить их со спектральными классами. Если спектроскопия недоступна, существует возможность по трехцветной фотометрии определять поглощение света, не задаваясь расстоянием до звезды и характером распределения вещества на луче зрения. Придется только предположить, что звезда относится к ГП, наиболее многочисленной группе и по двухцветной диаграмме определить непокрашенные цвета звезды, а затем избыток цвета $E_{(B-V)}$. Модуль расстояния с учетом поглощения равен:

$$(m_V - M_V) = 5 \lg r - 5 + R_V E_{(B-V)}. \quad (2)$$

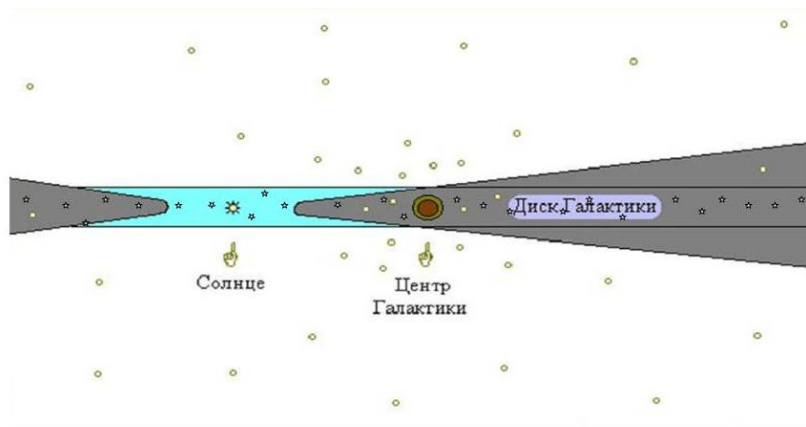


Рис. 6. Схематическое представление о поглощении света в Галактике.

Серым цветом показаны зоны, практически недоступные для наблюдений в оптическом диапазоне. Кружки – шаровые скопления, звездочки – рассеянные.

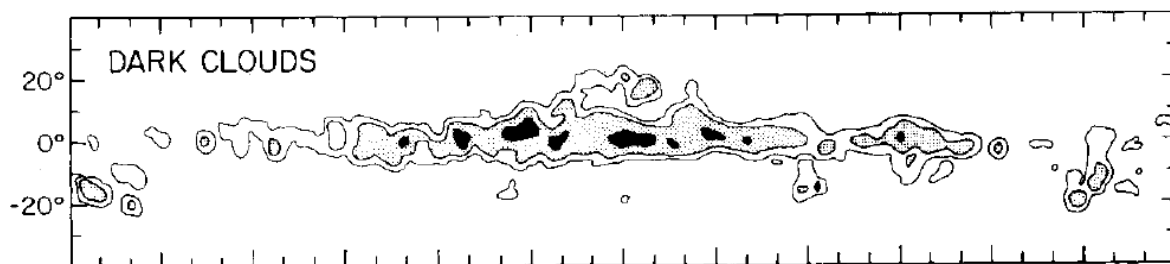


Рис. 7. Распределение темных облаков в плоскости Млечного Пути.



Рис. 8. Поглощение в спиральных галактиках, вызываемое пылью.

Можно найти расстояние, найдя смещение ГП скопления относительно ИГП, предварительно исправив положение наблюдаемой ГП за покраснение (рис. 9). Другой способ – найти индивидуальные расстояния до каждой звезды скопления и усреднить результаты.

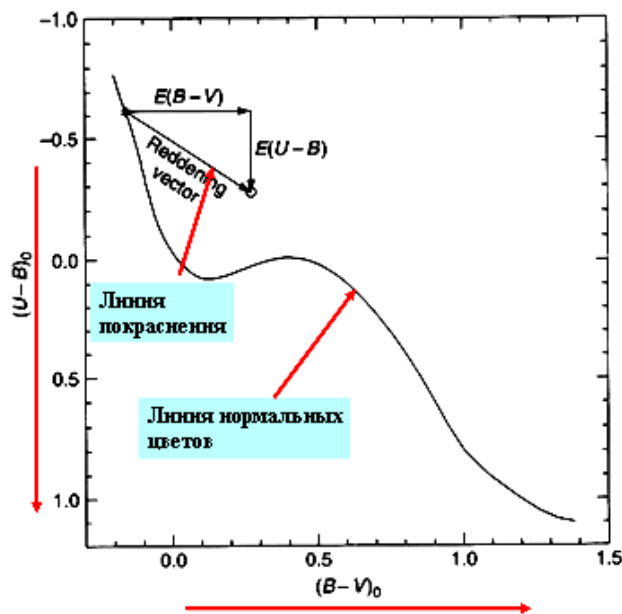


Рис. 9. Двухцветная диаграмма с линией покраснения.

Наклон линий покраснения $E_{(U-B)}/E_{(B-V)} = 0.72$.

Пример определения расстояния до скопления.

В таблице (Приложение 3) предложен список скоплений для определения расстояний. Выбрав одно из них, например *NGC744*, построим наблюдаемую двухцветную диаграмму (Рис. 10) и диаграмму Гецшпрунга-Рессела (Рис. 11) по данным каталога «*UBV and MK types in Open Clusters*», 3rd ed. (Mermilliod, 1986) (Приложение 4):

№п/п	Обозначение		V	B-V	U-B
915	207440001	11948 <i>BD</i> +54 429	7.860	0.210	0.170
916	207440002	<i>BD</i> +54 425	10.440	0.340	0.140
917	207440003		10.620	0.450	0.180
918	207440004		10.950	0.370	0.030
919	207440005		11.080	1.090	0.920

В качестве примера приведены данные из каталога для первых 5 звезд скопления.

1. На рисунке 10 схематически показано смещение наблюдаемой двухцветной диаграммы скопления зависимости к непокрашенной таким образом, чтобы $E_{(U-B)}/E_{(B-V)} = 0.72$. Величина смещения по горизонтальной оси будет избытком цвета $E_{(B-V)}$. В нашем случае $E_{(B-V)} = 0.42^m$.

2. Откорректируем положение наблюдаемой диаграммы ГР скопления за межзвездное покраснение, сместив ее на 0.42^m влево. Расстояние по вертикали на рисунке 11 между исправленной диаграммой ГР и ИГП ($m - M$) составляет 11^m , что соответствует расстоянию до скопления $r = 1600$ пк. По данным разных каталогов скоплений расстояние до *NGC 744* составляет от 1190 до 1500 пк.

Как уже указывалось, можно определить избыток цвета для каждой звезды скопления, а затем усреднить результаты. В этом случае необходимо исключить красные гиганты и звезды, не относящиеся к скоплению (звезды поля).

Примечания.

1. Для построения ИГП и непокрашенной двухцветной диаграммы используем данные таблицы «Цвета, температуры и болометрические поправки звезд», (Аллен, параграф 99).

M_V	$(B - V)_0$	$(U - B)_0$
Главная последовательность, V		
-5,8	-0,35	-1,15
-4,1	-0,31	-1,06
-1,1	-0,16	-0,55
+0,7	0,00	-0,02
+2,0	+0,13	+0,10
+2,6	+0,27	+0,07
+3,4	+0,42	+0,03
+4,4	+0,58	+0,05
+5,1	+0,70	+0,19
+5,9	+0,89	+0,47
+7,3	+1,18	+1,10
+9,0	+1,45	+1,28
+11,8	+1,63	+1,2
+16	+1,8	

2. Все расчеты в примере основаны на предлагаемых рисунках и являются приближенными.

Задание: каждый студент определяет расстояние до одного скопления. В отчете представляются: краткая идея метода, результаты определения избытка цвета и модуля расстояния в численном и графическом виде.

Контрольные вопросы:

- межзвездное поглощение света и его характеристики;
- фотометрическая система *UBV*;
- диаграмма Г-Р;
- двуцветная диаграмма;
- преимущества и недостатки метода определения расстояний до скоплений
- двуцветная диаграмма;
- преимущества и недостатки метода определения расстояний до скоплений.

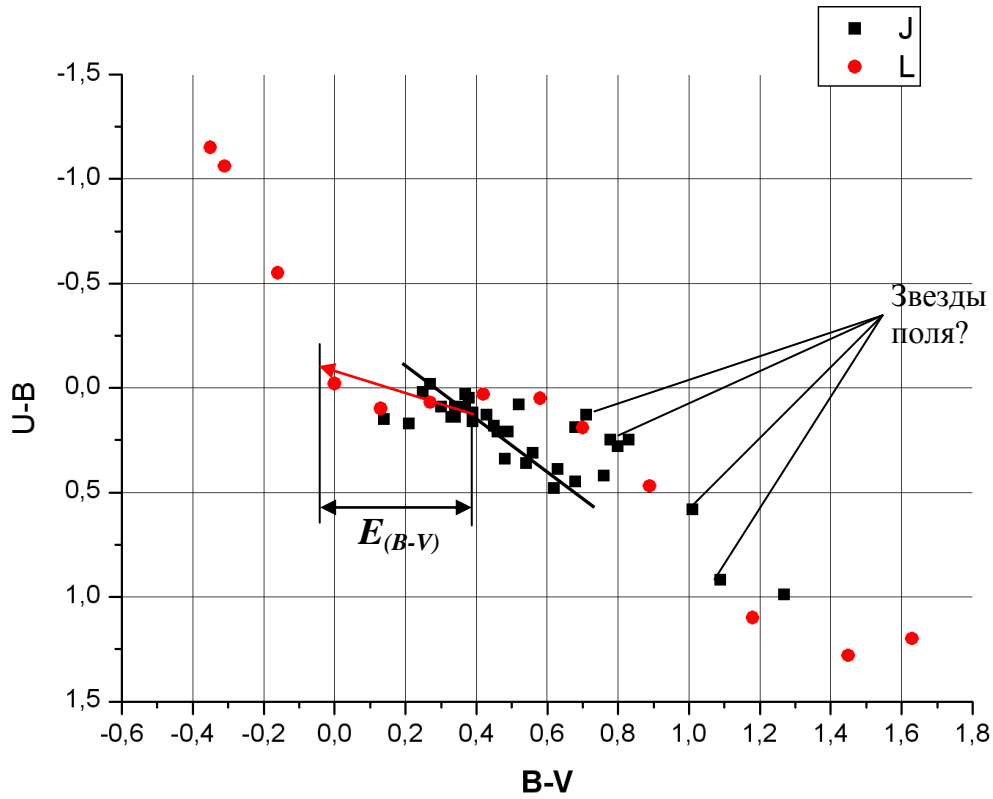


Рис. 10. Наблюдаемая двухцветная диаграмма скопления (черные значки) нормальные (непокрасненные) цвета звезд ГП (красные значки)

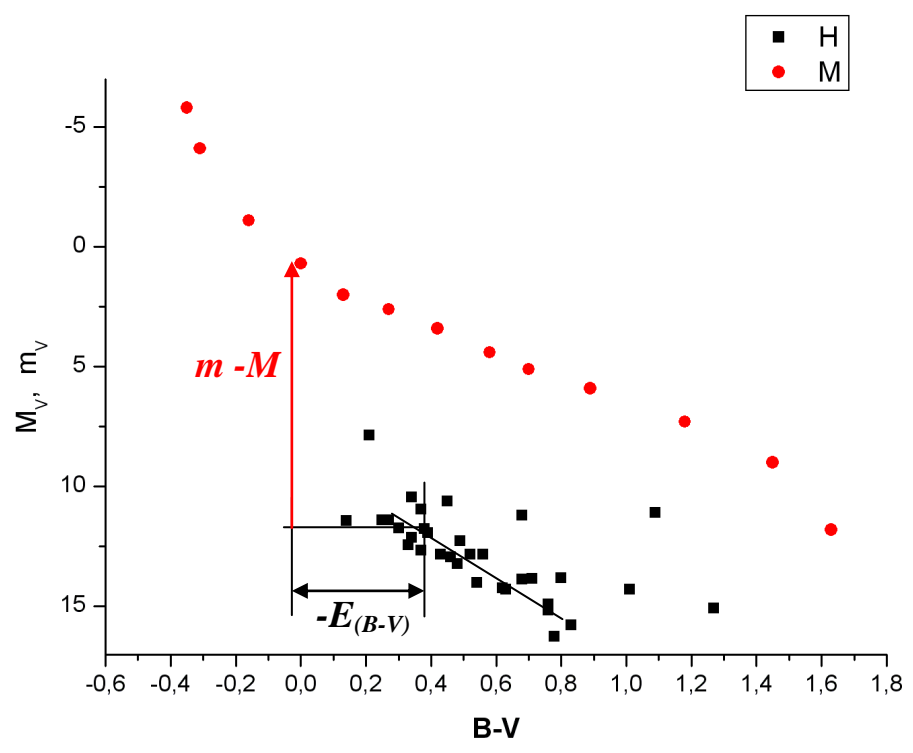


Рис. 11. Наблюдаемая Γ - R диаграмма скопления (черные значки) и исходная ГП (ИГП, красные значки).

Литература

1. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика : учебное пособие для студентов вузов /Фрязино : Век 2, 2006 . 496 с. : ил. ; 22 см.
2. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии : учебник для студентов университетов : Изд. 4-е . Москва : URSS, 2011. 542 с. : ил. ; 25 .
3. Сурдин В.Г. Звезды. 2-е изд., исп. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, 480 с.

Исходные параметры визуально-двойных звезд

N	Звезда	Коорд. 2000.0	m_{v1}	m_{v2}	Sp1	Sp2	P (лет)	a''
0	α Cen	14 39.6 – 60 50	- 0.04	1.17	G2V	K0V	79.92	17.52
1	24 η Cas	0^h 49.1^m + 57° 49'	3.45^m	7.51^m	G0V	K7V	480.00^y	11.994''
2	113 α Psc	02 02.1 + 02 46	4.18	5.21	A0p	A3m	993.05	4.000
3	66 α Gem	07 34.6 + 31 53	1.94	2.92	A1V	A2Vm	511.30	7.369
4	11 ε Hya	08 46.8 + 06 25	3.80	4.70	G5III	A8IV	15.05	0.238
5	41 γ Leo	10 20.0 + 19 51	2.22	3.47	K1III	G7III	618.56	2.505
6	53 ξ UMa	11 18.2 + 31 33	4.32	4.79	G0V	G0V	59.84	2.530
7	78 i Leo	11 23.9 + 10 32	4.03	6.70		F4IV	192.00	1.920
8	29 γ Vir	12 41.7 – 01 27	3.48	3.50	F0V	F0V	171.37	3.746
9	37 ξ Boo	14 51.4 + 19 06	4.74	6.90	G8V	K5V	151.51	4.904
10	30 ζ Boo	14 41.1 + 13 44	4.52	4.55	A2III	A2V	123.44	0.595
11	ξ Sco	16 04.4 – 11 22	4.90	4.90	F5IV	F5V	46.69	0.790
12	6 β Del	20 37.5 + 14 36	4.00	4.90	F5IV	F5V	26.65	0.475
13	61 Cyg	21 06.9 + 38 45	5.22	6.04	K5V	K7V	722.00	24.65
14	44 i Boo	15 03.8 + 47 39	5.30	Var	G0V	G2V	225.00	3.770
15	70 Oph	18 05.5 + 02 30	4.20	5.99	K0V	K4V	88.13	4.550
16	9 α CMa	06 45.1 – 16 43	- 1.46	8.49	A1V	(D)A	50.09	7.505
17	10 α CMi	07 39.3 + 05 14	0.35	10.30	F5V	(D)A?	40.65	4.550
18	40 ζ	16 41.3	2.90	5.53	G0IV	G7V	34.49	1.360

	Her	+ 31 36						
19	24 Aqr	21 39.5 - 00 03	7.20	7.60	F7V	F8V	48.70	0.423
20		22 55.2 - 05 00	5.90	7.90	K0III- I	K0V?	120.00	0.470
21	17 σ CrB	16 14.7 + 33 52	5.58	6.59	G0V	G1V	1000.	6.60
22	37 ξ Boo	14 51.4 + 19 06	4.74	6.90	G8V	K5V	151.51	4.90
23	HU 197 (ADS 11260)	18 19.7 +10 17	8.70	9.50	G1V	G6V	118.42	0.451
24	X Oph	18 38.4 + 08 50	5.9var	8.80	K1III	Mbe	485.30	0.343

К.У. Аллен

Астро- физические величины

Переработанное и дополненное издание

Перевод с английского Х. Ф. ХАЛИУЛЛИНА

Под редакцией Д. Я. МАРТЫНОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1977

Глава 10. Нормальные звезды

Величины и соотношения	3
Спектральная классификация	5
Спектральный класс и абсолютная звездная величина	7
Цветовые системы звезд	7
Абсолютная звездная величина и показатель цвета	10
Излучение, температуры и цвета звезд	11
Массы, светимости, радиусы и плотности звезд	14
Вращение звезд	15
Внутреннее строение звезд	15
Атмосферы звезд	18

Нормальные звезды

§ 94. Величины и соотношения

M	– масса (M_{\odot} – масса Солнца)
R	– радиус
L	– светимость – полный выход излучения
L	– поток светового излучения
$\bar{\rho}$	– средняя плотность = $M / \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)$
Sp	– спектральный класс, который может быть дополнен классом светимости
m	– видимая звездная величина = $-2,5 \times$ (логарифм освещенности). Типичные индексы: V – визуальная, B – в системе B , pg – фотографическая, pv – фотовизуальная, bol – болометрическая (полное излучение)
U, B, V	= m_U, m_B, m_V – видимые звездные величины в системах U (ультрафиолетовая), B (синяя), V (визуальная) соответственно
$m_V (10)$	– видимая визуальная звездная величина десятого по яркости объекта данного типа
M	– абсолютная звездная величина – видимая звездная величина, приведенная к расстоянию 10 пс при отсутствии поглощения
$B - V$	– показатель цвета, $(B - V)_0$ – истинный показатель цвета. Можно составить различные другие показатели цвета (например, $U - B$)
BC	– болометрическая поправка = $m_{bol} - m_V$ (всегда отрицательна)
A	– межзвездное поглощение света в звездных величинах (обычно визуальных)
m_0	– исправленная звездная величина = $m - A$
E	– избыток цвета = $B - V - (B - V)_0$
$m - M$	– модуль расстояния = $5 \times$ (логарифм расстояния в парсеках) – 5 + A
$m_0 - M$	– исправленный модуль расстояния = $5 \times$ (логарифм расстояния в парсеках) – 5
\mathcal{F}	– полный поток излучения с единицы поверхности звезды. $\mathcal{F}_{\lambda}, \mathcal{F}_V$ – монохроматические потоки для спектра с «размазанными» линиями поглощения
\mathcal{F}'	– величина \mathcal{F} , соответствующая непрерывному спектру, $\mathcal{F}' - \mathcal{F}$ – излучение, поглощенное в спектральных линиях
f	– поток излучения от звезды на границе земной атмосферы. $f_{\lambda}, f'_{\lambda}$ и т. д. определяются подобно $\mathcal{F}_{\lambda}, \mathcal{F}'_{\lambda}$
T	– температура звезды, обычно на поверхности. T_{eff} – эффективная температура (из равенства $\mathcal{F} = \sigma T_{eff}^4$), T_b – яркостная температура, T_c – цветовая температура (по распределению энергии в видимой части непрерывного спектра)
φ, G	– градиенты непрерывного спектра звезды, φ – абсолютный градиент = $5\lambda - d(\ln \mathcal{F}_{\lambda}) / d(1/\lambda)$, [где λ в мкм], G – относительный градиент (= $\varphi + const$)
g	– ускорение силы тяжести на поверхности
D	– бальмеровский скачок = $\lg(\mathcal{F}'_{3700^+} / \mathcal{F}'_{3700^-})$, где $\lambda = 3700 \text{ \AA}$ принята как длина волны, на которой происходит скачок
$B_{\lambda}, V_{\lambda}, K_{\lambda}$	– относительные чувствительности при наблюдениях в системах B и V и нормальным глазом [§97]

d	– расстояние, обычно в парсеках
π	– параллакс в секундах дуги = $1/d$, где d в парсеках
μ	– собственное движение за год (в секундах дуги)
v_r	– лучевая скорость в направлении от Солнца (в км/с)
v_t	– тангенциальная скорость в км/с, $v_t = 4,741 \mu/\pi$
α, δ, l'', b''	– экваториальные и новые (после 1958 г.) галактические координаты соответственно

Числовые соотношения

Получены в основном из сравнения звездной величины Солнца с распределением энергии в его спектре.

$$\lg (\mathcal{R}/\mathcal{R}_\odot) = (5680 \text{ K}/T_b) - 0,20M_V - 0,01 + 0,5 \lg [1 - \exp(-c_2/\lambda_V T_b)],$$

где T_b – яркостная температура для визуальной длины волны

$$\lambda_V = 5500 \text{ \AA}, \text{ а последним членом обычно пренебрегают, } 5680 \text{ K} = c_2(\lg e)/2\lambda_V = 3124/\lambda_V$$

[λ_V в мкм]

$$\lg (\mathcal{R}/\mathcal{R}_\odot) = (7100 \text{ K}/T_b) - 0,20M_B - 0,12,$$

здесь опущен логарифмический член, а T_b – теперь яркостная температура для $\lambda_B = 4400 \text{ \AA}$.

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi - A = m + 5 - 5 \lg d - A,$$

$$M_{\text{bol}} = 4,75 - 2,5 \lg (\mathcal{L}/\mathcal{L}_\odot)$$

$$= 42,36 - 10 \lg T_{\text{eff}} - 5 \lg (\mathcal{R}/\mathcal{R}_\odot),$$

$$\lg \mathcal{L} = -3,147 + 2 \lg \mathcal{R} + 4 \lg T_{\text{eff}},$$

$$B - V = (7300 \text{ K}/T_c) - 0,60,$$

$$BC = -42,54 + 10 \lg T_{\text{eff}} + (29\,000 \text{ K}/T_{\text{eff}}).$$

Звезда, имеющая $m_{\text{bol}} = 0$, создает вне земной атмосферы поток

$$= 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

Звезда с $M_{\text{bol}} = 0$ имеет мощность излучения

$$= 2,97 \cdot 10^{28} \text{ Вт}$$

Звезда, у которой $m_V = 0$, создает вне земной атмосферы освещенность

$$= 2,54 \cdot 10^{-10} \text{ ф} = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ лк}$$

Сила света звезды с $M_V = 0$

$$= 2,45 \cdot 10^{29} \text{ кд}$$

1 звезда $m_V = 0$ на кв. град.

$$= 0,84 \cdot 10^{-6} \text{ сб} = 0,84 \cdot 10^{-5} \text{ нт}$$

$$= 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ ламберт}$$

Визуальная звездная величина, соответствующая 1 лк,

$$= -13,98$$

$$m_V = -2,5 \lg \left(\int V_\lambda f_\lambda d\lambda \right) - 13,74,$$

$$m_B = -2,5 \lg \left(\int B_\lambda f_\lambda d\lambda \right) - 12,97,$$

$$m_U = -2,5 \lg \left(\int U_\lambda f_\lambda d\lambda \right) - 13,87,$$

где $\int f_\lambda d\lambda$ [в эрг/(см² · с)] – интегральный поток на границе земной атмосферы, $V_\lambda, B_\lambda, U_\lambda$ определены в § 97.

$$\lg f_\lambda (V) = -0,4m_V - 8,43 [1, 2],$$

где $f_\lambda (V)$ – поток в эрг/(см² · Å · с) на границе земной атмосферы вблизи $\lambda = 5500 \text{ \AA}$. Это соотношение почти не меняется с изменением спектрального класса звезды от В до М.

$$\lg f_\lambda (B) = -0,4m_B - 8,17 [1, 2],$$

где $f_\lambda (B)$ – поток в эрг/(см² · Å · с) на границе земной атмосферы вблизи $\lambda = 4400 \text{ \AA}$.

$$\lg \mathcal{F}_\lambda (V) = -0,4M_V + 8,85 - 2 \lg (\mathcal{R}/\mathcal{R}_\odot),$$

$$\lg \mathcal{F}_\lambda (B) = -0,4M_B + 9,11 - 2 \lg (\mathcal{R}/\mathcal{R}_\odot),$$

где $\mathcal{F}_\lambda(V)$, $\mathcal{F}_\lambda(B)$ – потоки излучения от поверхности звезды в эрг/(см² · Å · с) вблизи $\lambda = 5\,500$ Å и $\lambda = 4\,400$ Å соответственно.

$$A_V = 3,3 E_{B-V} \text{ [см. § 125]},$$

$$\lg(L_*/L_\odot) = 3,4 \lg(M_*/M_\odot) \text{ [см. § 100]},$$

$$T_R = 0,91 T_{\text{eff}},$$

$$T_0 = 0,78 T_{\text{eff}},$$

где T_R и T_0 – температуры обращаемого слоя и поверхности соответственно. Коэффициент в последнем равенстве имеет меньшее значение для звезд ранних спектральных типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 92; 2, § 93.
2. Johnson H. L., Lun. Plan. Lab. Arizona, 3, 73 (1965).

§ 95. Спектральная классификация

Особенности нормального линейчатого звездного спектра определяют спектральный класс S_p по схеме:

Класс	Характеристики класса
O	Горячие звезды с линиями поглощения He II
B	Линии поглощения He I; линии водорода усиливаются к классу A
A	Линии водорода достигают наибольшей интенсивности и затем ослабевают; усиливаются линия Ca II
F	Линии Ca II становятся сильнее, линии H слабее; развиваются линии металлов
G	Сильные линии Ca II; сильные линии железа и других металлов; линии H слабее
K	Сильные линии металлов; появляются полосы поглощения молекул CN и CN
M	Очень красные звезды; сильно развиты полосы TiO

Дальнейшее подразделение классов (например, B0, B1, B2 и т. д.) основано на более детальных системах [2, 3] с внутренним согласованием приблизительно ± 1 подразделение. В стандартной системе используются не все подразделения, но некоторые классы подразделяются еще дальше (например, O 9,5).

Каждый спектральный класс можно также дополнить классом светимости по следующей схеме:

Йеркский или МК класс светимости [3, 6] и др.	Примеры
I	Сверхгиганты: звезды типов Ia, Ib и c
II	Яркие гиганты
III	Гиганты
IV	Субгиганты
V	Звезды главной последовательности
VI	Субкарликп
VII	Белые карлики
	B0 I, sgF, cB0 B5 II G0 III, gG G5 IV G0 V, dG sdK5 DA, wA4

В приводимых ниже таблицах спектральный класс S_p дается по возможности в Йеркской системе [3]. Однако в интересах интерполяции и сглаживания каждый класс разбит на 10 равноотстоящих подразделов. Это, в частности, приводит к тому, что наш класс K5 соответствует приблизительно классу K3 или K4 по Йеркской классификации.

Дополнительные классы [5]

<i>Sp</i>	Характеристики класса
Углеродные звезды R или C N	{ Сильные полосы поглощения CN, полосы C ₂ усиливаются Полосы поглощения C ₂ , полосы CN ослабевают
Звезды, содержащие тяжёлые металлы S	

Другие характеристики, иногда включаемые в спектральную классификацию

- e – спектр с эмиссионными линиями, например Be (§ 106, 109)
- f – некоторые звезды типа O, имеющие спектр с эмиссионными линиями
- p – пекулярный спектр
- WC, WN – звезды Вольфа – Райе (§ 109)
- n – спектр с размытыми линиями
- s – спектр с очень четкими линиями
- k – в спектре присутствуют линии межзвездного поглощения
- m – звезды, в спектре которых усилены линии металлов

Двумерная спектральная классификация МК основана на относительной видимости компонент в парах спектральных линий. Главные пары линий приведены в следующей таблице [4]:

<i>p</i>		Пары линий, определяющие <i>Sp</i>
5	↔ O9	4471 He I /4541 He II
B0	↔ B1	4552 Si III /4089 Si IV
B2	↔ B8	4128–30 Si II /4121 He I
B8	↔ A2	4171 He I /4481 Mg II
A2	↔ F5	4026 He I /3934 Ca II
F2	↔ K	4030–34 Mn I /4128–32
F5	↔ G5	4300 CH/4385
G5	↔ K0	4300 (G-полоса) /4340 H γ
K0	↔ K5	4045 Fe I /4101 H δ
		4226Ca I /4340 H γ
		4144 Fe I /4101 H δ
		4226 Ca I /4325
		4290/4300
<i>Sp</i>		Пары линий, определяющие класс светимости
O9	↔ B3	4118–21 Si IV, He I /4144 He
B0	↔ B3	3995 N II /4009 He II
B1	↔ A5	Крылья бальмеровских линий
A3	↔ F0	4416/4481 Mg II
F0	↔ F8	4172/4226 Ca I
F2	↔ K5	4045–63 Fe I /4077 Sr II
		4226 Ca I /4077 Sr II
G5	↔ M	Скачок интенсивности вблизи 4215
K3	↔ M	4215/4260

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 93; 2, § 94.
2. Henry Draper Catalogue, Harv. Ann., **91–99**, 1918–24.

3. *Morgan W. W., Keenan, Kellman*, Atlas of Stellar Spectra, Chicago, 1943.
4. *Schmidt-Kaler Th.*, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 288.
5. *Keenan P. C.*, Stellar Atmospheres, ed. Greenstein, Chicago, 1960, p. 530. (Русский перевод: Звездные атмосферы, под ред. Дж. Гринштейна, ИЛ, М., 1963.)
6. *Keenan P. C.*, Basic Astronomical Data, ed. Strand, Chicago, 1963, p. 78.

§ 96. Спектральный класс и абсолютная звездная величина

Данные этого параграфа, представленные в виде графика, обычно называют диаграммой Герцшпрунга – Рессела.

Различные последовательности не всегда хорошо отделяются друг от друга. В приведенных ниже таблицах звезды обычно подразделяются на карлики V, гиганты III и сверхгиганты I.

Диаграмма Герцшпрунга – Рессела
 M_V

<i>Sp</i>	Сверхгиганты		Яркие гиганты II	Гиганты III	Субгиганты IV	Карлики главной последовательности V	Начальная главная последовательность V	Белые карлики VII	Население II типа		
	Ia	Ib							субкарлики VI	красная ветвь	горизонтальная ветвь
	[1, 3, 4, 9, 10]				[1, 3–8, 10]				[1, 12]		
O5	-6,4			-5,4		-5,7					
B0	-6,7	-6,1	-5,4	-5,0	-4,7	-4,1	-3,3	+10,2			
B5	-6,9	-5,7	-4,3	-2,4	-1,8	-1,1	-0,2	+10,7			+2,3
A0	-7,1	-5,3	-3,1	-0,2	+0,1	+0,7	+1,5	+11,3			+0,8
A5	-7,7	-4,9	-2,6	+0,5	+1,4	+2,0	+2,4	+12,2			+0,5
F0	-8,2	-4,7	-2,3	+1,2	+2,0	+2,6	+3,1	+12,9			+0,4
F5	-7,7	-4,7	-2,2	+1,4	+2,3	+3,4	+3,9	+13,6	+4,8	+4,8	+0,4
G0	-7,5	-4,7	-2,1	+1,1	+2,9	+4,4	+4,6	+14,3	+5,7	+4,1	+0,3
G5	-7,5	-4,7	-2,1	+0,7	+3,1	+5,1	+5,2	+14,9	+6,4	+2,0	-0,1
K0	-7,5	-4,6	-2,1	+0,5	+3,2	+5,9	+6,0	+15,3	+7,3	-0,2	-0,6
K5	-7,5	-4,6	-2,2	-0,2		+7,3	+7,3	+15	+8,4	-2,2	-2,2
M0	-7,5	-4,6	-2,3	-0,4		+9,0	+9,0	+15	+10	-3	-3
M2	-7		-2,4	-0,6		+10,0	+10,0		+12		
M5				-0,8		+11,8	+11,8		+14		
M8						+16			+16		

Связь между абсолютной звездной величиной и шириной линии излучения Ca II [2, 11].

w_0 – исправленная полная ширина линий Ca II H и K (усредненная), выраженная через скорость в км/с.

$\lg w_0$	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3
M_V	7,9	5,2	2,1	-1,0	-3,8	-6,7

Для Солнца [11] $w_\lambda = 0,45 \text{ \AA}$, $\lg w_0 = 1,53$, $M_V = 4,83$.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 94; **2**, § 95.
2. *Wilson O. C.*, Ap. J., **130**, 499 (1959); Publ. A. S. P., **79**, 46 (1967).
3. *Blaauw A.*, Basic Astron. Data, ed. Strand, Chicago, 1963, p. 383.
4. *Michalas D.*, Galactic Astronomy, Freeman Co., 1968, p. 46.
5. *Fitzgerald M. Pim*, Publ. A. S. P., **81**, 71 (1969).
6. *Jung J.*, Astron. Ap., **11**, 351 (1971).
7. *McCuskey S. W., Rubin R. H., A. J.*, **71**, 517 (1966).
8. *Woolley R. v d. R. et al.*, Royal Obs. Bull. Greenwich, **166**, 1971.
9. *Parsons S. B.*, Colloq. Supergiant Stars, Trieste, 1971.
10. *Schmidt-Kaler Th.*, Z. Ap., **53**, 1, 28 (1961).
11. *Bappu M. K. V., Swaraman K. R.*, Sol. Phys., **17**, 316 (1971).
12. *Keenan P.*, Basic Astron. Data, ed. Strand, Chicago, 1963, p. 106.

§ 97. Цветовые системы звезд

Цвета звезд определяются и выражаются отношением интенсивностей излучения в двух или нескольких областях спектра. Области можно указывать эффективной длиной волны (λ_U для ультрафиолетовой области, λ_B для синей, λ_V для визуальной и т. д.). Ширина полосы цветовой системы определяется разностью обратных длин волн (например, $1/\lambda_B - 1/\lambda_V$), которую можно обозначить через $\Delta (1/\lambda)$.

Показатели цвета относятся к \mathcal{F}_λ или f_λ – реальному сглаженному потоку излучения вблизи эффективной длины волны. С другой стороны, градиенты ϕ , G и цветовая температура T_c относятся к \mathcal{F}'_λ или f'_λ – потоку в континууме. Досадное осложнение вносит тот факт, что эффективная длина волны цветовой системы сама зависит от цвета.

Система U, B, V

Эта система [4, 5] заменила прежние международные фотографическую и фотовизуальную системы. Соответствующие обозначения звездных величин:

$$U = m_U, \quad B = m_B, \quad V = m_V.$$

Кривые реакции для чувствительных элементов систем U_λ , B_λ , V_λ , а также для нормального, адаптированного к темноте глаза. Данные для U , B , V включают в себя зависимость отражательной способности алюминия от длины волны λ . Они *не учитывают* атмосферное поглощение [1, 11–13].

Обычно используют показатели цвета $B - V$ и $U - B$. Приближенное соотношение для количественного выражения показателя цвета

$$B - V = 2,5 \lg (\mathcal{F}_{\lambda_V} / \mathcal{F}_{\lambda_B}) + 0,67$$

Кривые реакции

λ , мкм	U_λ	B_λ	V_λ	Для глаза	
				K_λ нормального	адаптированного к темноте
0,30	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	0,60	0,00			0,00
0,34	0,92	0,00			0,00
0,36	1,00	0,00			0,00
0,38	0,72	0,13			0,00
0,40	0,07	0,92	0,00	0,00	0,02
0,42	0,00	1,00	0,00	0,00	0,08
0,44	0,00	0,92	0,00	0,02	0,21
0,46	0,00	0,76	0,00	0,06	0,41
0,48	0,00	0,56	0,01	0,14	0,65
0,50	0,00	0,39	0,36	0,32	0,90
0,52		0,20	0,91	0,71	0,96
0,54		0,07	0,98	0,95	0,68
0,56		0,00	0,80	1,00	0,35
0,58		0,00	0,59	0,87	0,14
0,60	0,00	0,00	0,39	0,63	0,05
0,62			0,22	0,38	0,02
0,64			0,09	0,18	0,01
0,66			0,03	0,06	0,00
0,68			0,01	0,02	0,00

Эффективные длины волн

T, K	$B - V$	Sp	$\lambda_U, \text{Å}$	$\lambda_B, \text{Å}$	$\lambda_V, \text{Å}$	$\Delta (1/\lambda)$	
						$B - V, \text{мкм}^{-1}$	$U - V, \text{мкм}^{-1}$
25 000	-0,2	B2	3550	4300	5470	0,48	0,50
10 000	+0,2	A5	3650	4400	5480	0,46	0,46
4 000	+1,2	K5	3800	4500	5510	0,42	0,41

Характеристики различных цветовых систем

Система	Символ						
	Эффективная длина волны, мкм Эффективная ширина полосы, мкм $\lg f$ [в Вт/(см ² · мкм)] для нулевой звездной величины						
Международная (старая) [1, 10]	$P \approx pg$ 0,425			pv 0,59			
Шестицветная [2]	U 0,355	Vi 0,42	B 0,49	G 0,57	R 0,72	I 1,03	
Стандартная [4, 5]	U 0,365 0,068 -11,37		B 0,44 0,098 -11,18		V 0,55 0,089 -11,42		
Длинноволновые системы [3, 8, 9]	R 0,70 0,22 -11,76	I 0,90 0,24 -12,08	J 1,25 0,38 -12,48	K 2,2 0,48 -13,40	L 3,4 0,70 -14,09	M 5,0 -14,66	N 10,2 -15,91
Промежуточные полосы [6, 7]	u 0,350 0,034		v 0,411 0,020	b 0,467 0,016	y 0,547 0,024		

Для $T = \infty$ [1]

$$B - V = -0,46$$

$$U - V = -1,33$$

Градиенты

Градиент между λ_1 и λ_2

$$\varphi = -\ln(\lambda_1^5 \mathcal{F}'_1 / \lambda_2^5 \mathcal{F}'_2) / (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2) \quad [\lambda \text{ в мкм}]$$

Градиент в спектре излучения абсолютно черного тела

$$\begin{aligned} \varphi(T) &= 5\lambda - \frac{d}{d(1/\lambda)} (\ln \mathcal{F}'_\lambda) \\ &= (c_2/T) / [1 - \exp(-c_2/\lambda T)], \end{aligned}$$

где T – температура абсолютно черного тела, c_2 – постоянная излучения. $\varphi(T)$ зависит от T , а также (для горячих звезд) от средней длины волны λ .

Зависимость $\varphi(T)$ от T и λ

T, K	∞	50 000	20 000	10 000	8 000	6 000	4 000
c_2/T	0,00	0,29	0,72	1,44	1,80	2,40	3,60
$\varphi(T), \lambda = 0,4 \text{ мкм}$	0,40	0,56	0,86	1,48	1,82	2,40	3,60
$\lambda = 0,5 \text{ мкм}$	0,50	0,66	0,94	1,52	1,85	2,42	3,60

Для свободных от покраснения звезд типа A0 (видимая область)

$$G_G = 0, \varphi = 1,11, T_c = 15\,400 \text{ K},$$

где G_G – относительный коэффициент по гринвичской системе.

Приближенные соотношения:

$$\begin{aligned} V &= m_{pv} + 0,00, \\ B &= m_{pg} + 0,11 = P + 0,11, \\ \varphi &= G_G + 1,11, \\ B - V &= 0,59G_G - 0,07. \end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 95; **2**, § 96.
2. *Stebbins J., Whitford A. E.*, Ap. J., **102**, 318 (1945).
3. *Johnson H. L.*, Lun. Plan. Lab., Arizona, **3**, 73 (1965).
4. *Johnson H. L., Morgan W. W.*, Ap. J., **114**, 522 (1951); **117**, 313 (1953).
5. *Johnson H. L.*, Ann. d'Ap., **18**, 292 (1955).
6. *Stromgren B.*, Q. J. R. A. S., **4**, 8 (1963).
7. *Matsushima S.*, Ap. J., **158**, 1137 (1969).
8. *Greensteln J. L. et al.*, Ap. J., **161**, 519 (1970).
9. *Johnson H. L., Mitchell R. J.*, Lun. Plan. Lab., Arizona, **1**, 73 (1962).
10. *Страйжис В.*, А. Ж., **40**, 332 (1963).
11. *Mathews T. A., Sandage A. R.*, Ap. J., **138**, 30 (1963).
12. *Johnson H. L.*, Ann. d'Ap., **18**, 292 (1955).
13. *Ажусенис А., Страйжис В.*, А. Ж., **46**, 402 (1969).

§ 98. Абсолютная звездная величина и показатель цвета

M_V

$B - V$	Сверхгиганты		Яркие гиганты II	Гиганты III	Суб- гиганты IV	Главная последователь- ность		Суб- карлики VI	Белые карлики VII
	Ia	Ib				средняя V	начальная		
	[1, 2, § 96]								
-0,5	-6,6	-6,6				-6,5			
-0,4	-6,6	-6,5				-5,6			
-0,3	-6,7	-6,4		-5,1		-3,9	-3,3		
-0,2	-6,8	-6,1	-5,4	-3,5	-2,8	-1,5	-1,0		+10,4
-0,1	-6,9	-5,8	-4,4	-1,9	-1,1	-0,2	+0,5		
0,0	-7,1	-5,4	-3,2	-0,6	0,0	+0,7	+1,5		+11,4
0,1	-7,4	-5,1	-2,7	+0,1	+1,0	+1,5	+2,1		
0,2	-7,8	-4,9	-2,4	+0,7	+1,7	+2,2	+2,6		+12,4
0,3	-8,1	-4,8	-2,3	+1,1	+2,2	+2,8	+3,2		
0,4	-8,0	-4,7	-2,2	+1,4	+2,4	+3,3	+3,7	+4,0	+13,4
0,5	-7,8	-4,7	-2,1	+1,4	+2,7	+4,0	+4,3	+5,0	
0,6	-7,7	-4,7	-2,1	+1,3	+3,0	+4,5	+4,7	+5,7	+14,4
0,7	-7,6	-4,7	-2,1	+1,2	+3,1	+5,1	+5,3	+6,4	
0,8	-7,5	-4,7	-2,1	+1,0	+3,2	+5,8	+5,8	+6,9	+15,2
0,9	-7,5	-4,7	-2,1	+0,8	+3,2	+6,3	+6,3	+7,4	
1,0	-7,5	-4,7	-2,1	+0,6	+3	+6,7	+6,7	+7,9	+15,8
1,1	-7,5	-4,7	-2,1	+0,4	+3	+7,2	+7,2		
1,2	-7,5	-4,7	-2,2	+0,2	+3	+7,7	+7,7		
1,3	-7,5	-4,7	-2,2	+0,1		+8,2	+8,2		
1,4	-7,5	-4,7	-2,2	-0,1		+8,7	+8,7		
1,5	-7,5	-4,6	-2,3	-0,2		+9,8	+9,8		
1,6			-2,3	-0,3		+11,8	+11,8		
1,7			-2,3	-0,4		+14	+14		
1,8			-2,4	-0,5		+16	+16		
1,9	-7,5	-4,6	-2,4	-0,5					

Самые яркие сверхгиганты (классы Ia – O [8]) в эту таблицу не включены.

*Звезды шаровых скоплений в сравнении со звездами
главной последовательности*
B – V

M_V	Ближайшие звезды главной последовательности	Шаровые скопления	
		голубая ветвь	красная ветвь
		[1, 9, 10]	
-3	-0,27	+1,6	+1,6
-2	-0,22	+1,2	+1,3
-1	-0,15	+0,90	+1,00
0	-0,05	+0,55	+0,83
1	+0,05	-0,05	+0,75
2	+0,16	-0,2	+0,65
3	+0,35		+0,55
4	+0,49		+0,45
5	+0,67		+0,5
6	+0,84		+0,7

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 97; 2, § 98.
2. *Mihalas D.*, Galactic Astronomy, Freeman Co., 1967.
3. *Keenan P. C.*, (p. 78); *Blaauw A.*, (p. 383), in Basic Astron. Data, ed. Strand, Chicago, 1963.
4. *Woolley R. et al.*, Royal Obs. Bull. Greenwich, No. 166 (1971).
5. *Johnson H. L. et al.*, Ap. J., **152**, 465 (1968).
6. *Johnson H. L.*, (p. 204); *Becker F.*, (p. 254), in Basic Astron. Data, ed. Strand, Chicago, 1963.
7. *Osborn W.* (Venezuela), частное сообщение, 1971.
8. *Keenan P. C.*, *Morgan W. W.*, Trans. I. A. U., **11A**, 346 (1961).
9. *Sandage A.*, *Walker M. F.*, Ap. J., **143**, 313 (1966).
10. *Sandage A.*, Ap. J., **158**, 1115 (1969); **162**, 841 (1970).

§ 99. Излучение, температуры и цвета звезд

Болометрическая поправка BC и эффективная температура T_{eff} [1–3, 7, 21]

$\lg T_{\text{eff}}$ (в К)	BC	$\lg T_{\text{eff}}$ (в К)	BC	$\lg T_{\text{eff}}$ (в К)	BC
5,0	-7	4,1	-0,8	3,6	-1,0
4,8	-5,4	4,0	-0,36	3,5	-2,2
4,6	-3,8	3,9	-0,13	3,4	-4,0
4,4	-2,5	3,8	-0,02	3,3	-6
4,2	-1,3	3,7	-0,3	3,2	-8

О покраснении звезд см. в § 125.

Цвета, температуры и болометрические поправки звезд

S_p	M_V	$(B - V)_0$	$(U - B)_0$	T_{eff}	BC	M_{bol}
		[1, 2, 5, 6, 8, 10, 12, 21, 25, 27, 28]			[1, 2, 25, 26]	
Главная последовательность, V						
O5	-5,8	-0,35	-1,15	40 000	-4,0	-10
B0	-4,1	-0,31	-1,06	28 000	-2,8	-6,8
B5	-1,1	-0,16	-0,55	15 500	-1,5	-2,6
A0	+0,7	0,00	-0,02	9 900	-0,40	+0,1
A5	+2,0	+0,13	+0,10	8 500	-0,12	+1,7
F0	+2,6	+0,27	+0,07	7 400	-0,06	+2,6
F5	+3,4	+0,42	+0,03	6 580	0,00	+3,4
G0	+4,4	+0,58	+0,05	6 030	-0,03	+4,3
G5	+5,1	+0,70	+0,19	5 520	-0,07	+5,0
K0	+5,9	+0,89	+0,47	4 900	-0,19	+5,8
K5	+7,3	+1,18	+1,10	4 130	-0,60	+6,7
M0	+9,0	+1,45	+1,28	3 480	-1,19	+7,8
M5	+11,8	+1,63	+1,2	2 800	-2,3	+9,8

M8	+16	+1,8		2 400		
----	-----	------	--	-------	--	--

Продолжение

Sp	M _v	(B - V) ₀	(U - B) ₀	T _{eff}	BC	M _{bol}
		[1, 2, 5, 6, 8, 10, 12, 21, 25, 27, 28]				
Гиганты, III						
G0	+1,1	+0,65	+0,3	5 600	-0,03	+ 1,1
G5	+0,7	+0,85	+0,53	5 000	-0,2	+0,5
K0	+0,5	+1,07	+0,90	4 500	-0,5	+0,2
K5	-0,2	+1,41	+1,5	3 800	-0,9	-1,0
M0	-0,4	+1,60	+1,8	3 200	-1,6	-1,8
M5	-0,8	+1,85	+2,3		-2,8	-3
Сверхгиганты, I [9, 22]						
B0	-6,4	-0,25	-1,2	30 000	-3	-9
A0	-6,2	0,00	-0,3	12 000	-0,5	-7
F0	-6	+0,25	+0,25	7 000	-0,1	-6,0
G0	-6	+0,70	+0,60	5 700	-0,1	-5,2
G5	-6	+1,06	+0,87	4 850	-0,3	-5,2
K0	-5	+1,39	+1,34	4 100	-0,7	-5,4
K5	-5	+1,70	+1,7	3 500	-1,2	-6
M0	-5	+1,94	+1,7		-1,9	-7
M5		+2,14			-3,2	

Показатели цвета, исправленные за покраснение, обозначаются (B - V)₀, (U - B)₀ и т. д.

Соотношение между (B - V)₀ и (U - B)₀ [2, 31]

(B - V) ₀	(U - B) ₀	(B - V) ₀	(U - B) ₀	(B - V) ₀	(U - B) ₀
-0,2	-0,72	+0,6	+0,10	+1,4	+1,20
0,0	0,00	+0,8	+0,43	+1,6	+1,18
+0,2	+0,08	+1,0	+0,86	+1,8	+1,35
+0,4	-0,01	+1,2	+1,17	+2,0	+1,6

Цветовой фактор Q, не зависящий от покраснения [11, 22]

$$Q = (U - B) - (E_{U-B}/E_{B-V}) (B - V) = (U - B) - 0,72 (B - V)$$

Для звезд главной последовательности справедлива следующая зависимость:

Sp	O5	B0	B5	A0
Q	-0,92	-0,87	-0,44	0,00

Поток излучения от звезд и поглощение в линиях

Sp	lg \mathcal{F}_V [1] в [эрг/(см ² · с · Å)]		Lg ($\mathcal{F}'_V / \mathcal{F}_V$)	Поглощение в линиях, % от континуума [1, 18, 20] λ			D, бальмеровский скачок [1, 20] Dex
	Главная последовательность	Гиганты		0,4 мкм	0,5 мкм	0,6 мкм	
O5			0,00				0,03
B0	8,6		0,00	2	0	0	0,09
B5	8,12		0,00	3	1	0	0,30
A0	7,79		0,00	5	3	0	0,53
A5	7,53		0,01	11	5	1	0,47
F0	7,33		0,02	17	8	2	0,29
F5	7,16	7,16	0,03	20	10	3	0,17
G0	7,00	6,75	0,04	27	12	4	0,12
G5	6,84	6,50	0,05	34	14	4	0,08
K0	6,64	6,28	0,07	45	19	6	
K5	6,33	5,9	0,10	60?	25	8	

M0	6,0	5,5	0,13	70?	30?	10	
----	-----	-----	------	-----	-----	----	--

Монохроматический поток излучения f_λ в эрг/(см² · с · А) от звезды с $V = 0$ на границе земной атмосферы [14–19, 26]

$\lambda, \text{Å}$	Sp					
	B0	A0	F0	G0	K0	M0
1 000	-7,3	-9				
1 500	-7,3	-8,2				
2 000	-7,2	-8,1	-9,2	-10,1		
2 500	-7,4	-8,2	-9,0	-9,6		
3 000	-7,6	-8,4	-8,7	-8,9		
3 500	-7,8	-8,45	-8,6	-8,7		
4 000	-7,98	-8,07	-8,28	-8,43	-8,63	-9,07
4 500	-8,12	-8,20	-8,29	-8,37	-8,45	-8,65
5 000	-8,27	-8,32	-8,37	-8,39	-8,44	-8,56
5 500	-8,44	-8,44	-8,44	-8,44	-8,44	-8,44
6 000	-8,58	-8,56	-8,53	-8,50	-8,42	-8,33
8 000	-9,07	-8,90	-8,80	-8,68	-8,52	-8,34
10 000	-9,43	-9,12	-9,00	-8,86	-8,67	-8,48

Красные и инфракрасные показатели цвета (см. ссылки § 97) для звезд главной последовательности [13, 21, 26]

Sp	Показатели цвета					
	$V-R$	$V-I$	$V-J$	$V-K$	$V-L$	$V-N$
A0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F0	0,30	0,47	0,55	0,74	0,8	+0,8
G0	0,52	0,93	1,02	1,35	1,5	+1,4
K0	0,74	1,4	1,5	2,0	2,5	
M0	1,1	2,2	2,3	3,5	4,3	
M5		2,8			6,4	

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 98; 2, § 99.
2. Johnson H. L., p. 204; Becker W., p. 241; Harris L. D., p. 263, in Basic Astron. Data, ed. Strand, Chicago, 1963.
3. Underhill A. B., Vistas in Astron., 8, 41 (1965).
4. Schmidt-Kaler Th., Landolt-Börnstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965. p. 297.
5. Schild R., Peterson, Oke, Ap. J., 166, 95 (1971).
6. Canar A., Кунцук И., Публик. Обс. Тарту, № 7, 8 (1963).
7. Davis J., Webb R. J., Ap. J., 159, 551 (1970).
8. Hanbury Brown R. et al., M. N., 137, 375 (1967).
9. Schmidt-Kaler Th., Z. Ap., 53, 1, 28 (1961).
10. Osborn W. (Venezuela), частное сообщение, 1971.
11. Johnson H. L., Morgan W. W., Ap. J., 117, 313 (1953).
12. Wesselink A. J., M. N., 144, 297 (1969).
13. Johnson H. L. et al., Ap. J., 152, 465 (1968).
14. Stecker Th. P., Ap. J., 159, 543 (1970).
15. Carruthers G. R., Ap. J., 166, 349 (1971).
16. Campbell J. W., Ap. Space Sci., 11, 417 (1971).
17. Willstrop R. V., Mem. R. A. S., 69, 83 (1965).
18. Code A. D., Stellar Atmospheres, ed. Greenstein, Chicago, 1960, p. 50. (Русский перевод: Звездные атмосферы, под ред. Дж. Гринштейна, ИЛ, М., 1963.)
19. Oke J. B., Ap. J., 140, 689 (1964).
20. Stickland D. J., M. N., 153, 501 (1971).
21. Greenstein J. L. et al., Ap. J., 161, 519 (1970).
22. Underhill A. B., Early Type Stars, Reidel, 1966, p. 58.
23. Low F. J., Johnson H. L., Ap. J., 139, 1130 (1964).
24. Gillett P. G., Low, Stein, Ap. J., 154, 677 (1968).
25. Smak J. I., Ann. Rev. Astron. Ap., 4, 19 (1966).
26. Johnson H. L., Ann. Rev. Astron. Ap., 4, 193 (1966).
27. Strom S. E., Peterson D. M., Ap. J., 152, 859 (1968).
28. Parsons S. P., M. N., 152, 121, 133 (1971).
29. Gordon C. P., Publ. A. S. P., 80, 597 (1968).
30. Gottlieb D. M., Upson W. L., Ap. J., 157, 607 (1969).
31. Woolley R. et al., Royal Obs. Bull. Greenwich, No. 166 (1971).

§ 100. Массы, светимости, радиусы и плотности звезд

Обозначения взяты из § 94.

Приближенная связь масса – светимость

$$\lg (L/L_{\odot}) = 3,45 \lg (M/M_{\odot})$$

Наибольшая масса стабильной нормальной звезды [9]

$$M_{\max} = 60 M_{\odot}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 99; 2, § 100.
2. Cester B., Z. Ap., **62**, 191 (1965).
3. Pilowski K., Hannover Astron. St., **5**, 6 (1961).
4. Harris D. L., Strand, Worley, Basic Astron. Data, ed. Strand, Chicago, 1963, p. 273.
5. Underhill A. B., The Early Type Stars, Reidel, 1966.
6. Franz O., Mitt. U. S., Wien, **8**, 1 (1956).
7. van den Heuvel E. P. J., B. A. N., **19**, 11 (1967).
8. Batten A. H., A. J., **73**, 551 (1968).
9. Larson R. B., Starrfield S., Astron. Ap., **13**, 190 (1971).

Масса, радиус, светимость и средняя плотность в зависимости от спектрального класса звезды

I – сверхгигант, III – гигант, V – карлик. Отдельный столбец между столбцами III и V относится к главной последовательности.

Sp	lg (M/M _⊙)			lg (R/R _⊙)			lg (L/L _⊙)			lg ρ̄		
	III	I	V	I	III	V	I	III	V	I	III	V
	[1–5]			[1, 3–6]								
O5	+2,2	+1,6				+1,25			+5,7			-2,0
B0	+1,7	+1,25		+1,3	+1,2	+0,87	+5,4		+4,3			-1,2
B5	+1,4	+0,81		+1,5	+1,0	+0,58	+4,8		+2,9			-0,78
A0	+1,2	+0,51		+1,6	+0,8	+0,40	+4,3		+1,9			-0,55
A5	+1,1	+0,32		+1,7		+0,24	+4,0		+1,3			-0,26
F0	+1,1	+0,23		+1,8		+0,13	+3,9		+0,8			-0,01
F5	+1,0	+0,11		+1,9	+0,6	+0,08	+3,8	+0,4				+0,03
G0	+1,0	+0,4	+0,04	+2,0	+0,8	+0,02	+3,8	+1,5	+0,1			+0,13
G5	+1,1	+0,5	-0,03	+2,1	+1,0	-0,03	+3,8	+1,7	-0,1			+0,20
K0	+1,1	+0,6	-0,11	+2,3	+1,2	-0,07	+3,9	+1,9	-0,4			+0,25
K5	+1,2	+0,7	-0,16	+2,6	+1,4	-0,13	+4,2	+2,3	-0,8			+0,38
M0	+1,2	+0,8	-0,33	+2,7		-0,20	+4,5	+2,6	-1,2			+0,4
M2	+1,3		-0,41	+2,9		-0,3	+4,7	+2,8	-1,5			+0,7
M5			-0,67			-0,5		+3,0	-2,1			+1,0
M8			-1,0			-0,9			-3,1			+1,8

Зависимость светимости и радиуса звезды от ее массы (исключая белые карлики)

lg (M/M _⊙)	M _{bol}	lg (L/L _⊙)	M _V	M _B	lg (R/R _⊙), главная последовательность [1]
	[1–5]				
-1,0	+12,1	-2,9	15,5	+17,1	-0,9
-0,8	+10,9	-2,5	13,9	+15,5	-0,7
-0,6	+9,7	-2,0	12,2	+13,9	-0,5
-0,4	+8,4	-1,5	10,2	+11,8	-0,3
-0,2	+6,6	-0,8	7,5	+8,7	-0,14
0,0	+4,7	0,0	4,8	+5,5	0,00
+0,2	+2,7	+0,8	2,7	+3,0	+0,10
+0,4	+0,7	+1,6	1,1	+1,1	+0,32
+0,6	-1,1	+2,3	-0,2	-0,1	+0,49
+0,8	-2,9	+3,0	-1,1	-1,2	+0,58
+1,0	-4,6	+3,7	-2,2	-2,4	+0,72
+1,2	-6,3	+4,4	-3,4	-3,6	+0,86
+1,4	-7,6	+4,9	-4,6	-4,9	+1,00
+1,6	-8,9	+5,4	-5,4	-6,0	+1,15
+1,8	-10,2	+6,0	-6,3	-6,9	+1,3

§ 101. Вращение звезд

Высокие скорости вращения встречаются только у звезд ранних спектральных типов O, B, A, F и не наблюдаются у звезд типов G ↔ M, сверхгигантов и цефеид, или долгопериодических переменных.

- v_e – экваториальная скорость вращения
- $v_e \sin i$ – видимая экваториальная скорость вращения, наблюдаемая при наклоне i оси вращения к лучу зрения
- $\overline{v_e}, \overline{\sin i}$ – соответствующие средние значения для наблюдавшихся звезд

Среднее значение случайной величины $\sin i = \pi/4$

Можно обнаружить заметное различие между скоростями вращения гигантов III и звезд главной последовательности V. Наибольшие наблюдаемые скорости $v_e(\max)$ найдены у звезд с эмиссионными линиями в спектре (Oe, Be и т. п.). Скорость вращения ограничена критическим значением v_e (крит.), если внешние слои звезды подчиняются модели Роша.

Экваториальные скорости вращения звезд

<i>Sp</i>	$\overline{v_e} \sin i$, км/с		$\overline{v_e}$, км/с		$v_e(\max)$, км/с [3, 4]	v_e (крит.), км/с [3, 5]
	III	V	III	V		
	[1–3]					
O5		140		180	400	
B0	75	160	95	200	420	630
B5	95	180	120	230	390	500
A0	110	150	140	190	320	450
A5	125	115	160	150	250	410
F0	100	78	130	100	180	400
F5	45	22	60	30	100	400
G0	15	3	20	4		
K, M	<10	1	<12	1		

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 100; 2, § 101.
2. *van den Heuvel E. P. J.*, B. A. N., 19, 11 (1967).
3. *Stettebak A.*, Ap. J., 145, 121, 126 (1966).
4. *Schmidt-Kaler Th.*, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965, p. 311.
5. *Sackmann I.-J.*, Astron. Ap., 8, 76 (1970).

§ 102. Внутреннее строение звезд

Обозначения: ρ – плотность, T – температура, R – радиус звезды, M – масса звезды, p – давление, r – расстояние от центра, M_r – масса, заключенная внутри сферы радиуса r , и т. д., L – светимость, индекс «с» означает центральное значение.

- X – доля водорода по массе $\approx 0,73$
- Y – доля гелия по массе $\approx 0,25$
- $Z = 1 - X - Y$ – доля тяжелых элементов $\approx 0,017$
- μ – средний молекулярный вес
- $= 4/(6X + Y + 2) \approx 0,60$

Центральные температуры, плотности и давления звезд

Тип звезды	M/M_{\odot}	S_p	$T_c, 10^6 \text{ K}$	$\lg \rho_c$ (в г/см ³)	$\lg P_c$ (в дин/см ²)
Звезда главной последовательности [1–4, 7]	20	B0	34	0,7	16,2
	10	B3	1	0,95	16,6
	5	B6	27	1,30	16,9
	2	A6	20	1,83	17,3
	1	G2	15	2,00	17,3
	0,5	M0	8	1,8	16,8
Звезда с низким содержанием металлов [5, 6]	1		120	4,2	20,4
Красный гигант [2, 12]	1,3		40	5,5	21,3
Белый карлик [2, 9]	0,9		8	7,2	24,2
Сверхплотная звезда [13]			8	13,5	32,3

О прозрачности звездного вещества см. § 40.

Звездные модели

(Модель Солнца приведена в § 76)

Стандартная модель [1, 14]

$$\rho_c = 54,2\bar{\rho} = 76,4 (M/M_{\odot}) (R/R_{\odot})^{-3} \text{ г/см}^3$$

$$T_c = 19,7 \cdot 10^6 \text{ K} \times \mu (M/M_{\odot}) (R/R_{\odot})^{-1}$$

r/R	ρ/ρ_c	T/T_c	P/P_c	M_r/M
0,0	1,000	1,000	1,000	0,000
0,05	0,941	0,982	0,925	0,007
0,1	0,793	0,928	0,734	0,047
0,2	0,429	0,752	0,322	0,262
0,3	0,179	0,568	0,102	0,548
0,4	0,069	0,403	0,028	0,765
0,5	0,0227	0,284	0,0064	0,898
0,6	0,0072	0,194	0,0014	0,963
0,7	0,0019	0,125	0,0 ³ 24	0,989
0,8	0,0 ³ 39	0,071	0,0 ⁴ 28	0,999
0,9	0,0 ⁴ 38	0,032	0,0 ⁵ 12	1,000
0,95	0,0 ⁵ 6	0,0157	0,0 ⁷ 9	1,000
0,98	0,0 ⁵ 16	0,0065	0,0 ⁷ 10	1,000
1,0	0,0	0,0	0,0	1,000

Модель с точечным источником [1, 15]

$$\rho_c = 37,0\bar{\rho} = 52,2 (M/M_{\odot}) (R/R_{\odot})^{-3} \text{ г/см}^3$$

$$T_c = 20,8 \cdot 10^6 \text{ K} \times \mu (M/M_{\odot}) (R/R_{\odot})^{-1}$$

r/R	ρ/ρ_c	T/T_c	P/P_c	M_r/M
0,0	1,000	1,000	1,000	0,000
0,05	0,970	0,980	0,950	0,006
0,1	0,890	0,919	0,817	0,035
0,2	0,606	0,719	0,435	0,220
0,3	0,290	0,523	0,152	0,512
0,4	0,110	0,369	0,041	0,762
0,5	0,036	0,257	0,009	0,902
0,6	0,0103	0,173	0,0018	0,966
0,7	0,0025	0,120	0,0 ³ 30	0,991
0,8	0,0 ³ 44	0,066	0,0 ⁴ 29	0,999
0,9	0,0 ⁴ 31	0,029	0,0 ⁶ 9	1,000
0,95	0,0 ⁵ 25	0,0138	0,0 ⁷ 35	1,000
0,98	0,0 ⁶ 15	0,0055	0,0 ⁹ 8	1,000
1,00	0,0	0,0	0,0	1,000

Звезда верхней части главной последовательности

$$M = 10 M_{\odot} [2]$$

r/R	$\lg \rho$ (в г/см ³)	$\lg T$ (в К)	L_r/L	M_r/M
0,00	+0,89	7,44	0,00	0,00
0,01	+0,89	7,44	0,00	0,00
0,1	+0,85	7,41	0,51	0,02
0,2	+0,72	7,33	0,98	0,17
0,3	+0,50	7,20	1,00	0,43
0,4	+0,14	7,05	1,00	0,69
0,5	-0,31	6,89	1,00	0,87
0,6	-0,82	6,72	1,00	0,95
0,7	-1,42	6,53	1,00	0,99
0,8	-2,17	6,30	1,00	1,00
0,9	-3,29	5,95	1,00	1,00
0,98	-5,66	5,20	1,00	1,00

Красный гигант

$$M = 1,3 M_{\odot} [2]$$

r/R	$\lg \rho$ (в г/см ³)	$\lg T$ (в К)	L_r/L	M_r/M
0,00	+5,54	7,60	0,00	0,00
0,0001	+5,52	7,60	0,00	0,00
0,0005	+5,10	7,60	0,00	0,13
0,001	+3,21	7,60	0,00	0,26
0,01	-0,73	6,78	1,00	0,27
0,1	-2,54	6,07	1,00	0,29
0,2	-2,88	5,84	1,00	0,36
0,3	-3,11	5,69	1,00	0,46
0,5	-3,52	5,42	1,00	0,70
0,7	-4,00	5,11	1,00	0,91
0,8	-4,34	4,87	1,00	0,97
0,9	-4,87	4,52	1,00	1,00

Скорость выделения энергии на единицу массы в протон-протонном цикле (pp) [1, 10]

$$\epsilon_{pp} = \rho X^2 E_{pp} \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{с}),$$

где ρ – плотность в г/см³, а E_{pp} табулирована как функция T .

Скорость выделения энергии на единицу массы в углеродно-азотном цикле (CN) [1, 10]

$$\epsilon_{CN} = \rho X Z_{CNO} E_{CN} \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{с}),$$

где Z_{CNO} – часть от Z , дающая полное содержание C, N, O, а E_{CN} табулирована.

$T, 10^6 \text{ К}$	1	2	5	10	15	20	30	50	100
$\lg E_{pp}$ (в эрг/(г · с))	-8,1	-5,4	-2,71	-1,13	-0,33	+0,20	+0,8	+1,4	+2,1
$\lg E_{CN}$ (в эрг/(г · с))			-11,0	-3,5	+0,28	+2,66	+5,59	+8,8	+12,2

Превращение энергии за 1 цикл, приведенное к 1 атому He

Без потери нейтрино $4,28 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} = 26,8 \text{ МэВ}$

Для pp цикла $4,19 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} = 26,2 \text{ МэВ}$

Для CN цикла $4,00 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} = 25,0 \text{ МэВ}$

Соответствующие энергии на 1 г водорода

$$6,40; 6,27; 5,99 \cdot 10^{18} \text{ эрг/г}$$

Простой числовой формулы, дающей скорость выделения энергии на единицу массы для стадии сгорания гелия, не существует [10].

Шкала времени существования звезды [1]

$$1,0 \cdot 10^{11} (M/M_{\odot}) / (L/L_{\odot}) \text{ лет}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 101; **2**, § 102.
2. *Schwarzschild M.*, Structure and Evolution of Stars, Princeton, 1958. (Русский перевод: *Шварцшильд М.*, Строение и эволюция звезд, ИЛ, М., 1961.)
3. *Kippenhahn R., Thomas H. C.*, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 459.
4. *Sackmann I.-J.*, Astron. Ap., **8**, 76 (1970).
5. *Rood R. T.*, Ap. J., **161**, 145 (1970).
6. *Castellani V. et al.*, Ap. Space Sci, **4**, 103 (1969).
7. *Cesarsky C. J.*, Ap. J., **156**, 385 (1969).
8. *Kelsall T., Stromgren B.*, Vistas in Astron., ed. Beer, **8**, 159 (1965).
9. *Mestel L.*, Stellar Structure, ed. Aller, McLaughlin, Chicago, 1965, p. 312. (Русский перевод: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Аллера и Д. Б. Мак-Лафлина, изд-во «Мир», М., 1970.)
10. *Reeves H.*, Stellar Structure, ed. Aller, McLaughlin, Chicago, 1965, p. 152. (Русский перевод: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Аллера и Д. Б. Мак-Лафлина, изд-во «Мир», М., 1970.)
11. *Wrubel M. H.*, Handb. d. Phys., **51**, 1 (1958).
12. *Demarque P., Heasley J. N.*, M. N., **155**, 85 (1971).
13. *Wheeler J. A.*, Ann. Rev. Astron. Ap., **4**, 393 (1971).
14. *Eddington A. S.*, Internal Constitution of Stars, Cambridge, 1930.
15. *Cowling T. G.*, M. N., **96**, 42 (1936).

§ 103. Атмосферы звезд

Приведенные характеристики относятся к обращающему слою звезд, т. е. к той части звездной атмосферы, в которой образуются спектральные линии поглощения.

N – число атомов в 1 см^3 обращающего слоя

NH – эффективное число атомов над 1 см^2 фотосферы

H – экспоненциальная шкала высот в атмосфере звезды

g – ускорение силы тяжести на поверхности звезды

T_R – температура обращающего слоя $\approx 0,91T_{\text{eff}}$

P – газовое давление в обращающем слое

P_r – лучистое давление, P_e – электронное давление

κ_5 – коэффициент поглощения на единицу массы для $\lambda = 5000 \text{ \AA}$

V – главная последовательность

III – гигант, I – сверхгигант

Число атомов, ускорение силы тяжести и температура

Sp	$\lg N$ (в см^{-3})		$\lg NH$ (в см^{-2})		$\lg H$ (в см)		$\lg g$ (в $\text{см}/\text{с}^2$)			$\lg T_R$ (в К)	
	V	III	V	III	V	III	V	III	I	V	III
	[1,6]		[1, 6]		[1]		[1–5, 8]			[1]	
O5	15,0		23,5		8,5		4,0			4,57	
B0	15,0		23,3		8,3		4,0	3,8	3,1	4,37	
B5	15,0		22,9		7,9		4,1	3,7	2,8	4,14	
A0	15,2		23,0		7,8		4,1	3,7	2,4	3,96	
A3	15,6		23,4		7,8		4,2	3,6	2,1	3,88	
F0	16,1		23,8		7,7		4,3	3,5	1,9	3,82	
F5	16,6	16,1	24,1	24,5	7,5		4,3	3,5	1,7	3,77	
G0	16,9	16,2	24,3	24,7	7,4	8,5	4,4	3,3	1,5	3,74	3,70
G5	17,0	16,3	24,3	25,0	7,3	8,7	4,5	3,0	1,3	3,70	3,65
K0	17,2	16,2	24,5	25,3	7,3	9,1	4,5	2,6	1,0	3,62	3,59
K5	17,4	16,1	24,6	25,7	7,2	9,6	4,5	1,9	0,6	3,58	3,52
M0	17,5	16,0	24,5	26,0	7,0	10,0	4,6	1,4	0,2	3,49	3,46
M5	17,7	15,5	24,5		6,8		4,8			3,40	

Полное, электронное и лучистое давление и коэффициент поглощения

<i>S_p</i>	lg <i>P</i> (в дин/см ²)			lg <i>P_e</i> (в дин/см ²)			lg <i>P_r</i> (в дин/см ²)	lg <i>κ_s</i> (в см ² /г)	
	V	III	I	V	III	I		V	III
	[1, 6]			[1, 6]			[1]	[1, 6, 7]	
O5	3,5			3,3			3,5	+0,3	
B0	3,3			3,0	2,4	2,0	2,9	+0,40	
B5	3,1			2,7	2,0	1,8	2,0	+0,82	
A0	3,2		1,9	2,5	1,8	1,6	1,2	+0,97	
A5	3,6		2,0	2,3	1,6	1,4	0,9	+0,40	
F0	4,1		2,5	1,9	1,4	1,0	0,6	-0,08	
F5	4,6	3,9	2,9	1,4	1,0	0,4	0,4	-0,45	
G0	4,8	4,0	3,1	1,0	0,4	-0,1	0,2	-0,74	-1,23
G5	4,9	3,9	3,2	0,7	-0,1	-0,6	0,1	-0,91	-1,55
K0	5,0	3,8	3,1	0,5	-0,6	-1,0	0,0	-0,95	-1,83
K5	5,1	3,6	2,9	0,1	-1,1	-1,6	-0,3	-0,92	-2,00
M0	5,2	3,3	2,6	-0,2	-1,7	-2,1	-0,6	-1,2	-2,24
M5	5,4	2,9	2,3	-0,6	-2,5		-1,0	-1,8	

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 102; **2**, § 103.
2. *Osborn W.* (Venezuela), частное сообщение, 1971.
3. *Bell R. A., Gottlieb D. M.*, M. N., **151**, 449 (1971).
4. *Aller L. H.*, Ann. Rev. Astron. Ap., **3**, 158 (1965).
5. *Schmidt-Kaler Th.*, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 309.
6. *Aller L. H.*, Stellar Atmospheres, ed. Greenstein, Chicago, 1961, p. 232. (Русский перевод: Звездные атмосферы, под ред. Дж. Гринстейна, ИЛ, М., 1963.)
7. *Bode G.*, Kont. Abs. von Sternatmosphären, Sternwarte, Kiel, 1965.
8. *Parsons S. B.*, M. N., **152**, 121 (1971).

Список скоплений для определения расстояний

<u>Clust er</u>	<u>RAJ2000</u> "h:m:s"	<u>DEJ2000</u> "d:m:s"	<u>Diam</u> arcmin	<u>Age</u> [yr]	<u>Nc</u> -	<u>RV</u> km/s	<u>[Fe/H]</u> Sun
NGC 744	01 58 33	+55 28 24	5.0	8.248	1		
NGC 457	01 19 35	+58 17 12	20.0	7.324	14	-31.40	
NGC 663	01 46 09	+61 14 06	14.0	7.400	3	-31.50	
NGC 869	02 19 00	+57 07 42	18.0	7.069	4	-39.80	-0.300
NGC 884	02 22 23	+57 07 33	18.0	7.100	18	-37.60	-0.300
NGC 957	02 33 21	+57 33 36	10.0	7.042	12	-39.50	
NGC 1502	04 07 50	+62 19 54	8.0	6.900	8	-12.40	
NGC 2244	06 31 55	+04 56 30	29.0	6.896	5	26.0	
NGC 3572	11 10 23	-60 14 54	5.0	6.891	5	-8.40	
NGC 3603	11 15 07	-61 15 36	4.0	6.000	12		
NGC 5606	14 27 47	-59 37 54	3.0	7.075	3	-38.30	
NGC 6193	16 41 20	-48 45 48	14.0	6.775	17	-39.90	
NGC 6200	16 44 07	-47 27 48	14.0	6.928	24		
NGC 6322	17 18 25	-42 56 00	5.0	7.058	1	-57.00	
NGC 6530	18 04 31	-24 21 30	14.0	6.867	5	-6.40	
NGC 6546	18 07 22	-23 17 48	14.0	7.849	28	-16.60	
NGC 6611	18 18 48	-13 48 24	6.0	6.110	16	10.00	
NGC 7235	22 12 25	+57 16 12	5.0	6.900	1	-52.00	
NGC 7380	22 47 21	+58 07 54	20.0	7.077	1	-34.10	
NGC 7654	23 24 48	+61 35 36	15.0	8.200	10	-35.50	
NGC 7789	23 57 24	+56 42 30	25.0	9.150	10	-64.00	-0.240
NGC 7790	23 58 24	+61 12 30	5.0	7.749	1	-80.20	