

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

УДК 52

Книга профессора Лондонского университета К. У. Аллена приобрела широкую известность как удобный и весьма авторитетный справочник. В ней собраны основные формулы, единицы, константы, переводные множители и таблицы величин, которыми постоянно пользуются в своих работах астрономы, физики и геофизики.

Перевод 1-го издания книги Аллена вышел в 1960 г. В 3-м английском издании, с которого выполнен настоящий перевод, автор пересмотрел все численные значения и добавил новые разделы, отражающие последние достижения астрономии, исследований космоса, геофизики.

Справочник содержит необходимые сведения по общей физике, атомной физике, спектрам, теории излучения, данные о Солнце, Земле, Луне и других объектах Солнечной системы, о звездах, межзвездной среде, галактиках, космических лучах – исчерпывающий справочный материал о Вселенной.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

© С. W. Allen 1973

© Перевод на русский язык, «Мир», 1977

А $\frac{20605 - 119}{041(01) - 77}$ 119 – 77

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЭЛЕКТРОННОЙ
ВЕРСИИ КНИГИ

Вниманию читателя предлагается электронная версия русского 2-го издания 1977 г. книги К. У. Аллена. Данная версия адаптирована под формат А4.

Октябрь 2009 г.

О. Г. Злобин

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Советскому читателю уже знаком справочник профессора Лондонского университета К. У. Аллена, содержащий наиболее полное и в то же время компактное собрание численных значений физических величин, используемых в астрофизике, общей физике, геофизике и других смежных науках.

Настоящий перевод сделан с 3-го английского издания этого справочника, вышедшего в свет в 1973 г. и отражающего численные значения астрофизических величин по состоянию на 1972 г. Прошедшие годы были годами значительного прогресса в астрофизике, однако не настолько большого, чтобы считать русский перевод сколько-нибудь устаревшим. Разумеется, в него можно было бы внести некоторые изменения, но редактор не видит в этом особой необходимости, так как профессор Аллен произвел очень тщательный отбор материала, и именно в этой тщательности и компетентности коренится большой успех и популярность справочника среди астрономов и физиков. Ввиду этого редактор с согласия автора ограничился двумя-тремя примечаниями к тексту и несколькими дополнительными ссылками на монографические работы, опубликованные на русском языке (они отмечены звездочками).

С любезного разрешения автора русский перевод был дополнен «Кратким обзором системы астрономических постоянных» (IAU Bulletin № 37, 1977); был сохранен помещенный в 1-м русском издании расширенный список сокращенных обозначений журналов; в таблице ярких звезд координаты пересчитаны на равноденствие 1950.0.

Январь 1977 г.

Д. Я. Мартынов

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Мы постарались привести прежние издания «Астрофизических величин» в соответствие с современными требованиями. Хотя в книгу вошли новые разделы астрофизики, объем ее почти не увеличился. Был обсужден вопрос о замене единиц системы СГС на единицы системы СИ; однако автор пришел к выводу, что астрофизики еще не хотят такой замены.

Можно предвидеть, что примерно через семь лет потребуется новое пересмотренное и исправленное издание, и уже сейчас следует начать подготовку к нему. Автор будет рад начать переговоры с каждым, кто пожелает с ним сотрудничать.

Июль 1972 г.

К. У. Аллен

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Назначение этой книги состоит в том, чтобы представить важнейшие астрофизические данные в легко доступной форме. Вопросы, относящиеся к содержанию включенного материала и форме его представления, обсуждаются в главе «Введение».

Приведены по возможности новейшие данные, однако поскольку принятые значения астрофизических постоянных меняются с каждым годом, нельзя быть уверенным в последнем десятичном знаке большинства приводимых чисел. Вероятно, некоторые читатели пожелают внести исправления в приведенные величины в соответствии с последними данными или согласно их собственному мнению. Автор надеется, что читатели сообщат ему обо всех ошибках и неправильных значениях, содержащихся в книге. Учитывая такие советы и используя новые результаты, можно будет сделать еще один шаг к созданию идеального справочника, в котором для каждой величины указано ее точное значение.

Невозможно было в ссылках уделить должное внимание всем источникам информации. В основном приводятся ссылки на самые последние статьи, по которым можно проследить за более ранними работами. Автор широко пользовался справочниками, учебными пособиями и таблицами. На последних стадиях работы над книгой для проверки включаемых данных и заполнения пропусков использовались обширные таблицы Ландольта–Бернштейна. Однако существование этих таблиц не уменьшает потребности в настоящей книге.

Автор благодарит д-ра Хантера, д-ра Суита и д-ра Гарстанга за то, что они прочитали рукопись и корректуру и внесли много ценных предложений.

Апрель 1955 г.

К. У. Аллен

Введение

§ 1. Цель книги и требования к включенному материалу

Прогресс в любой физической науке очень тесно связан с определением точных значений величин, которыми она оперирует. Для измерения некоторых из этих величин потребовались обширный труд и очень большая точность, а теперь читатель может воспользоваться плодами всех этих усилий, просто читая число, изображающее полученное в результате значение. Приводя конечный результат и опуская длинный ряд промежуточных выкладок, приводящих к нему, можно добиться огромной экономии в записях.

Настоящая книга содержит конечные результаты, и пришлось подумать над тем, чтобы наиболее эффективно выделить их из имеющейся информации и затем представить в виде, удобном для использования. Установлено, что необходимые действия станут совершенно ясными, если только мы решим, какие из различных требований читателя являются наиболее важными. Эти требования перечисляются ниже, и одновременно указывается, каким образом они удовлетворяются.

Подбор материала

Цель книги – дать тот количественный каркас, на который опирается астрофизика. Для этого книга должна содержать все экспериментальные и теоретические величины, константы и переводные множители, которые являются основными в астрофизических расчетах. Детальность описания отдельных объектов, например отдельных звезд или спектральных линий, зависит от того, насколько такое описание необходимо для суждения о всей совокупности подобных объектов. Обычно оказывается, что для того, чтобы дать количественную основу понятиям какого-либо раздела астрофизики, нужно ограниченное и довольно небольшое число данных. Назначение предлагаемой работы – быть собранием таких данных.

Доступность материала

Прежде всего было уделено внимание тому, чтобы представить данные в виде, удобном для их быстрого нахождения понимания и использования. С этой целью вместо результатов отдельных измерений приводится одно (наилучшее) значение или усредненная сглаженная кривая. Подробная процедура взвешивания отдельных результатов для получения наилучшего значения не может быть здесь полностью воспроизведена, так как это заняло бы слишком много места и мешало бы систематическому представлению самих числовых результатов.

Невозможно выразить значения величин во всех единицах, и обычно они даются только в одной системе единиц. Для сохранения универсальности необходимо иметь в распоряжении переводные множители, и этому требованию следует уделить внимание. Перевод из одной системы единиц в другую часто выражается в виде формул; для этого необходимо привести несколько наиболее общих формул астрофизики. Однако в книге не делается попытки дать полную сводку основных астрофизических формул, а те формулы, которые приводятся, служат только для напоминания связи между входящими в них величинами.

Устранение неоднозначности

Для того чтобы любой ценой избежать неоднозначности, потребовалось бы полное определение каждой из приведенных величин. Это не годится для работы, назначение которой – дать коли-

чественные значения, поэтому предполагается, что читатель понимает смысл упоминаемых здесь величин. Все же опасность неоднозначности возникает из-за большого числа очень похожих единиц и величин, и усилия были направлены в основном на разрешение недоразумений подобного рода. В частности, нередко возникает путаница из-за числовых множителей 2 и π , поэтому даются определения, поясняющие их роль.

Другой возможный источник неоднозначности связан с множественностью значений символов. Это затруднение устраняется тем, что каждый параграф имеет независимую терминологию и нет необходимости искать определение приведенных в нем величин вне этого параграфа. Однако некоторые хорошо известные символы используются без повторного объяснения; они собраны в § 7.

Остальные вопросы, связанные с неопределенностью смысла символов и заголовков таблиц и графиков, обсуждаются в § 4.

Компактность

В настоящей работе большое значение придавалось компактности таблиц не только ради экономии места, но также для наиболее удобного представления материала. Поэтому интервалы аргументов в таблицах сделаны довольно большими; промежуточные значения можно найти простой графической интерполяцией. Часто предпочтение отдается эмпирическим формулам вместо таблиц.

Список литературы приводится обычно в конце каждого параграфа; в каждом параграфе используется своя нумерация ссылок.

Полнота и универсальность

Поскольку прогресс в астрофизике зависит от выхода за пределы нынешних границ знания, необходимо дать значения величин для возможно более широкого диапазона аргументов. Данные для экстремальных условий обычно известны не точно и их следует рассматривать как предварительные. То же самое относится и к множеству включенных в книгу величин, которые нельзя получить непосредственно из наблюдений. В тех случаях, когда оценки разных методов сильно различаются между собой, приводятся компромиссные результаты.

Если известных значений величины слишком много, то вместо их полного перечисления даются отдельные избранные примеры. При большом разбросе отдельных значений некоторой величины иногда приводится среднее значение.

Точность и ошибки

Было бы удобно, если бы рядом с каждой величиной можно было привести ее вероятную ошибку, однако для большинства данных это невозможно. Величины ошибок приводятся только для наиболее фундаментальных величин. При этом дается среднеквадратичная (стандартная) ошибка [s. e.] (= 1,4826 вероятной ошибки [p. e.]). Для наиболее точных значений ошибки выражаются в единицах последнего десятичного знака и заключаются в скобки (). Иногда перед ошибкой ставится знак \pm .

Подразумевается, что приводимые ошибки учитывают все источники отклонения от истинного значения. На протяжении всей книги делается попытка указывать на величину ошибки путем написания правильного числа десятичных знаков. Предполагается, что стандартная ошибка лежит между 1 и 9 единицами последнего десятичного знака. Если последний десятичный знак 0 или 5, ошибка будет несколько больше.

Изменяемость и согласованность

Абсолютные значения астрофизических величин постоянно уточняются и изменяются, и надо учитывать все эти числовые изменения. Поэтому предпочтение отдается таблицам перед графиками, которые приходится перечерчивать, если меняются исходные величины.

Для некоторых астрономических работ важным условием является внутренняя согласованность между постоянными. Однако получить согласованную систему данных можно лишь посредством исчерпывающего анализа сведений о каждой величине. Если принимается новое значение какой-либо постоянной, становится необходимым тщательный пересмотр всей системы величин. Таким образом, строгое соблюдение согласованности заставляло бы придерживаться устаревших значений и не позволяло бы учитывать новую информацию. Однако в настоящей работе усилия направлены как раз на возможно более полное использование новой информации. Если новое значение какой-либо величины требует очевидного изменения других постоянных, то такое изменение должно быть сделано, но обычно изменение зависимых постоянных нуждается в дополнительном анализе. Ошибки, вызванные несогласованностью, обычно не больше вероятной ошибки и, следовательно, не представляют опасности. Предполагается, что приводимые здесь величины не будут использоваться без изменений в сложных вычислениях, для которых совершенно необходима внутренняя согласованность.

Некоторые постоянные применяются так широко, что приобрели ту же значимость, что и переводные множители. Иногда они приводятся даже в том случае, если их значения нельзя считать наилучшими.

Источники информации

Источники информации необходимо указывать по многим причинам. Прежде всего это дает читателю возможность проверить любые данные по величине или по смыслу, что особенно необходимо в настоящем случае, когда исходная информация часто изменялась при составлении таблиц. Ссылки дают также возможность найти сведения о таких деталях, которые не вошли в приведенные таблицы. Наконец, мы отдаем должное автору оригинальной работы. К сожалению, невозможно полностью удовлетворить последнему условию, так как это потребовало бы очень большого количества ссылок. Вместо этого мы старались ссылаться на самые последние работы по каждой теме, по которым можно проследить более ранние работы. Часто упоминаются первое и второе издания «Астрофизических величин» (А. Q. 1 и 2). Ссылки, приведенные в конце параграфов А. Q. 1 и А. Q. 2, повторяются, если это кажется нужным для понимания или проверки данных. Широко были использованы обзорные статьи по различным разделам астрофизики, и часто ссылки даются непосредственно на них, а не на оригинальные работы. В физических разделах многие данные взяты из справочников и таблиц.

Средства вычисления

Мы не старались дать таблицы для обширных вычислений, часто проводимых в обычной практике. Некоторые таблицы такого рода приведены (например, таблицы рефракции, прецессии и излучения абсолютно черного тела), но они служат скорее для указания на порядок входящих в них величин, чем для практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 1; 2, § 1.

§ 2. Общий план

Разделы книги почти независимы. В любой работе, где собрано большое число различных понятий, возникает задача указать место определения каждого из них, особенно важная, когда надо как можно быстрее отыскать отдельные величины. Для решения этой задачи книга разделена на параграфы (§), которые замкнуты относительно символов, определений и ссылок. В каждом параграфе текста мало, поэтому поиски любого объяснения не должны вызывать затруднений. Этими соображениями определяются размеры отдельных параграфов.

Таблицы и графики отдельно не нумеруются, каждая таблица или график помещены внутри соответствующего параграфа. Символы, используемые в заголовке таблицы, описываются внутри параграфа, и описание не всегда повторяется снова в таблице. В этом смысле текст параграфа можно рассматривать как расширенный заголовок таблицы.

Ссылки помещаются так близко к концу каждого параграфа, насколько это позволяет расположение таблиц. Там, где это необходимо, номера ссылок ставятся рядом с соответствующими данными, но в некоторых параграфах можно только перечислить источники в конце без указания, как из них были получены отдельные величины. Данные, помещенные в таблице, часто видоизменены по отношению к числовым данным первоисточника. Ссылки в конце параграфов на А. Q. 1 и А. Q. 2 должны помочь связать между собой информацию из разных изданий.

Названия глав и параграфов должны помогать находить большую часть материала. Для нахождения менее распространенных величин служит предметный указатель. Величина может встречаться более одного раза, если этого требует расположение материала.

Параграфами 7, 12, 23, 35, 94 можно пользоваться для справок о символах, сокращениях и т. п., которые часто употребляются без дополнительного определения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 2; 2, § 2.

§ 3. Количественные значения символов

Величины часто изображаются символами. И величина, и символ обычно равны числу, умноженному на единицу измерения. Например, мы пишем

$$\text{плотность } \rho = 5,2 \text{ Мг/см}^3 = 3,5 \cdot 10^{-22} \text{ г/см}^3.$$

Однако не всегда удобно вводить размерность в уравнение; можно, например, записать уравнение рэлеевского рассеяния в виде

$$a_\lambda = 0,0082\lambda^{-4,05} [a_\lambda \text{ в см}^{-1}, \lambda \text{ в мкм}].$$

Иногда единица измерения определяет не только размерность, но и точку нуля, например:

$$T \text{ в К} = T \text{ в } ^\circ\text{С} + 273,15.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 3; 2, § 3.

§ 4. Заголовки таблиц

Поскольку астрофизика имеет дело с очень большими и очень маленькими числами, в выражениях величин широко используются степени 10. При этом важно избежать неопределенности в знаке показателя степени; иными словами, соотношение между заголовком, степенью 10, единицами измерения и табличным значением должно быть правильно понято.

Пример обычной ошибки:

$$\text{Заголовок таблицы: } v \cdot 10^{-8} \text{ см/с.}$$

В этом случае v – скорость, но из заголовка не ясно, какое равенство верно:

$$v = \text{табличное значение} \cdot 10^{-8} \text{ см/с}$$

или

$$v = \text{табличное значение} \cdot 10^8 \text{ см/с.}$$

Чтобы количественно использовать таблицу или график, надо каждый раз решать уравнение вида

$$\text{величина} = (\text{табличное значение}) \times (\text{степень } 10) \times (\text{единица измерения}).$$

Как и в любом другом уравнении, здесь необходимо знать, в какую часть уравнения попадает каждый множитель, и заголовки должны быть составлены таким образом, чтобы сделать это совершенно ясным. При составлении таблиц мы придерживались по возможности этого равенства, помещая заголовок или символ, который описывает величину, выше разделительной линии, а все множители правой части равенства – ниже этой линии. Линия, отделяющая заголовок от таблицы, соответствует, таким образом, знаку равенства. Однако можно пользоваться таблицами, не опасаясь неопределенности и не читая это объяснение.

Такая система записи имеет то преимущество, что большие числа имеют положительный показатель степени 10, а маленькие – отрицательный.

В обозначениях на осях графиков еще труднее избежать неопределенности такого рода. Часто встречается следующее обозначение на оси графика:

$$T_e (\text{K} \times 10^{-6}).$$

Здесь не ясно, нанесена ли температура на графике в степени 10^{-6} или 10^6 К. Следующие формы записи не содержат неопределенности и достаточны:

$$T_e (\text{единица измерения} = 10^6 \text{ К}),$$

$$v (\text{в } 10^8 \text{ см/с}),$$

$$\lg \rho (\rho \text{ в г/см}^3).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 4; 2, § 4.
2. Quantities, Units, and Symbols, Royal Society, 1971.

§ 5. Логарифмические величины

В астрофизике часто приходится иметь дело с увеличением или уменьшением величин [1, 2]. Эти изменения можно выразить в натуральной, десятичной и других логарифмических шкалах, в звездных величинах. В получаемых равенствах логарифмические величины имеют характер единиц измерения. Важно, чтобы логарифмические шкалы были ясно указаны и не было неоднозначности в обозначениях. В книге приняты следующие обозначения:

exp	показатель степени при основании e
dex	показатель степени при основании 10
m	звездная величина
bin	показатель степени при основании 2
%	проценты (применяются для малых значений)

Эти логарифмические шкалы связаны между собой соотношениями

$$1,0000 \text{ exp} = 0,4343 \text{ dex} = 1,0857^m = 1,4427 \text{ bin},$$

$$2,3026 \text{ exp} = 1,0000 \text{ dex} = 2,500^m = 3,3219 \text{ bin},$$

$$0,0100 \text{ exp} = 0,0043 \text{ dex} = \text{приращению в } 1 \text{ \%}.$$

Можно, например, так выразить поглощение a озона в линии $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ при стандартных условиях:

$$a = 0,0175 \text{ dex/см} = 0,040 \text{ exp/см} = 0,044^m \text{ см}^{-1} = 4,0\% \text{ см}^{-1}.$$

Разумеется, нет смысла выражать в процентах большие значения величин.

Символ dex введен для удобства [3]. Dex преобразует число, стоящее перед ним, в соответствующий антилогарифм при основании 10. С помощью этого символа получается удобный для печати способ изображения больших чисел, например $10^{39} = 39 \text{ dex}$. Его можно также использовать для упрощения записи вероятных ошибок, интервалов, отклонений. Следующие примеры иллюстрируют его применение: а) вероятная ошибка определения плотности вещества в космическом пространстве равна $\pm 1,2 \text{ dex}$, б) диапазон частот, используемый в радиоастрономических наблюдениях, составляет $3,2 \text{ dex}$, в) увеличение шкалы расстояний для галактик в результате последних исследований равно $0,7 \text{ dex}$.

Другие логарифмические единицы, которые часто применяются для специальных целей:

октава	(= 0,30103 dex) для частоты в бинарной шкале
децибел	(= 0,10000 dex) для силы шума в логарифмической шкале, в десять раз более растянутой, чем dex
непер [4]	(= 0,4329 dex) для амплитуды излучения в экспоненциальной шкале

Если децибелы и неперы одновременно используются как единицы измерения амплитуды излучения, то

$$1 \text{ дБ} = 0,115 13 \text{ неп.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 5; 2, § 5.
2. McCamy C. S., Phys. Today, April 1969, p. 42.
3. Allen C. W., Observatory, 71, 157 (1951).
4. Allcock G. McK., The Physics of Ionosphere, Report of Phys. Soc, 1955, p. 14.

§ 6. Характерные размеры

Необходимо найти способ сравнивать размеры почти всех астрономических объектов и явлений независимо от их вида.

Положение объекта обычно можно определить с помощью центра тяжести или какого-нибудь аналогичного понятия.

Для определения линейного размера x более или менее правильных космических объектов удобно ввести расстояние x_{ab} между такими точками x_a и x_b , в которых для значений некоторой функции интенсивности выполняется равенство $f(x) = mf(x_0)$. Здесь x_0 – положение максимума интенсивности, а произвольно выбранная дробь m обычно равна $1/2$ или $1/e$. Этот размер можно назвать «полной m -шириной». Если объект симметричен по x , иногда достаточно половины измерения от x_0 до x_a или x_b , такой размер называется «полу- m -ширина». Аналогично определяются два и большее число измерений.

Можно также использовать другое определение линейного размера, равное $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x)dx}{f(x_0)}$, которое называется эквивалентной шириной относительно максимума интенсивности при x_0 .

Для определения размера неправильного объекта нет соответствующей величины $f(x_0)$. Тем не менее его размер можно определить однозначно, посредством расстояния x_{cd} между точками квантили x_c и x_d , такими, что

$$\int_{x_c}^{x_d} f(x)dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx$$

и

$$\int_{-\infty}^{x_c} f(x)dx = \int_{x_d}^{\infty} f(x)dx = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx$$

Чтобы дать корректное определение ограниченной и универсальной длины, положим *характерную длину* объекта равной $2x_{cd}$. Аналогично для двух измерений: если $2r$ – диаметр такого круга, который содержит половину полного потока от объекта, тогда величина $2^{3/2}r$ называется *характерным диаметром*. Характерные длины и диаметры можно определить, если выполняются условия: а) полный поток от объекта ограничен, б) интенсивность $f(x)$ или $f(r)$ нигде не отрицательна и в) объект нельзя разделить на компоненты, которые содержат точно $1/2$ или $1/4$ часть от полного потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 2, § 6.
2. Allen C. W., M. N., 125, 529 (1963).

§ 7. Система обозначений

Насколько возможно, использованная система обозначений согласуется с общепринятыми обозначениями [2, 3, 5]. В основном обозначения описаны внутри каждого параграфа, но многие символы имеют такое общее применение, что нет необходимости определять их еще раз. Обозначения этого параграфа будут использоваться без повторного определения, если при этом не будет возникать неопределенность. В параграфах 12, 23, 94 также приводятся широко употребляемые обозначения.

Знаки

Сюда входят некоторые нововведения, которые были признаны удобными:

\approx приблизительно равно	\propto пропорционально
\equiv тождественно равно	\rightarrow стремится к
∞ бесконечность	∇ набла, оператор Гамильтона
$\bar{\leftarrow}$ (тире с крючками [4]) в интервале, в продолжение, в зависимости от, по сравнению с, противопоставляется и т. д. (крючки нужны для того, чтобы отличить тире от знака минус)	
\bar{x} среднее значение x	$\bar{2},34 = 0,34 - 2,00$

$\int_{4\pi} \dots dx$ интегрирование в пределах телесного угла 4π

\oint интегрирование по замкнутому контуру

Астрономические символы

		* Звезда			
☉ Солнце	♁ Земля	♅ Уран			
☾ Луна	♂ Марс	♆ Нептун			
☿ Меркурий	♃ Юпитер	♇ Плутон			
♀ Венера	♄ Сатурн	♁ Комета			
♈ Овен	0°	♌ Лев	120°	♍ Стрелец	240°
♉ Телец	30°	♍ Дева	150°	♎ Козерог	270°
♊ Близнецы	60°	♎ Весы	180°	♏ Водолей	300°
♋ Рак	90°	♏ Скорпион	210°	♐ Рыбы	330°

- ♂ Соединение (равны долготы или прямые восхождения)
- Квадратура (разность долгот или прямых восхождений = 90°)
- ♁ Противостояние (разность долгот или прямых восхождений = 180°)
- ♁ Восходящий узел орбиты
- ♁ Нисходящий узел орбиты
- ♁ Точка весеннего равноденствия

Часто употребляемые символы

В качестве символов используются латинские, греческие и особого типа буквы.

π	отношение окружность/диаметр, параллакс в секундах дуги
e	основание натуральных логарифмов
e	заряд электрона в системе СГСЭ, эксцентриситет
ν, λ	частота, длина волны
ω	телесный угол, угловая частота ($= 2\pi\nu$)
c	скорость света
t	время
$d\omega, dV, ds, dt$	элементы телесного угла, объема, длины, времени
T	температура
m	масса частицы, видимая звездная величина
m_v, m_{pg}, m_{bo}	визуальная, фотографическая и болометрическая звездные величины
M	абсолютная звездная величина (отнесенная к 10 пс). Часто добавляется индекс
$\mathcal{M}, \mathcal{R}, \mathcal{L}$	масса, радиус и светимость астрономического объекта
R	радиус, волновое число Ридберга, газовая постоянная, угол рефракции
k	постоянная Больцмана, гауссова постоянная тяготения
μ	собственное движение в секундах дуги за год
ρ	плотность
h	высота, высота светила над горизонтом, постоянная Планка ($= 2\pi\hbar$)
N	число объектов (часто в единице объема)
I_ν, I_λ	спектральная интенсивность
g	ускорение силы тяжести, статистический вес
α, δ	прямое восхождение, склонение
l, b	галактические долгота и широта
σ	постоянная излучения ($\mathcal{F} = \sigma T^4$), стандартное отклонение, эффективное сечение

Единицы, операторы и размерности

lg	десятичный логарифм
ln	натуральный логарифм
dex	степень 10
exp	степень e
рад	радиан
ср	стерадиан
мкм, см, м, км	микрометр, сантиметр, метр, километр
г, кг	грамм, килограмм
(s), (h), (d)	секунда, час, сутки
°, ', "	градус, минута дуги, секунда дуги
°С, К	градус Цельсия, градус Кельвина
Гц, МГц	герц = цикл/с, мегагерц

a. e.	астрономическая единица
Å (I. A.)	ангстрем, (международный ангстрем)
p. e.	вероятная ошибка
s. e.	стандартная, или среднеквадратичная ошибка
s. d.	стандартное отклонение (= σ)

Десятичные кратные и дольные единицы

Множитель		Приставка Символ (ставятся перед единицей измерения)	
10^{12} =	12 dex =	1 000 000 000 000	тера Т
10^9 =	9 =	1 000 000 000	гига Г
10^6 =	6 =	1 000 000	мега М
10^3 =	3 =	1 000	кило к
10^2 =	2 =	100	гекто г
10 =	1 =	10	дека да
1 =	0 =	1	
10^{-1} =	-1 =	0,1	деци Д
10^{-2} =	-2 =	0,01	санتي с
10^{-3} =	-3 =	0,001	= 0,0 ² 1 милли м
10^{-6} =	-6 =	0,000 001	= 0,0 ⁵ 1 микро мк
10^{-9} =	-9 =	0,000 000 001	= 0,0 ⁸ 1 нано н
10^{-12} =	-12 =	0,000 000 000 001	= 0,0 ¹¹ 1 пико п
10^{-15} =	-15 =		= 0,0 ¹⁴ 1 фемто ф
10^{-18} =	-18 dex =		= 0,0 ¹⁷ 1 атто а

При написании десятичных дробей используется запятая, между тремя цифровыми знаками оставляется пробел.

Сокращенные обозначения в литературных ссылках

Acta Astron.	— Acta Astronomica
Adv. Atom. Mol. Phys.	— Advances in Atomic and Molecular Physic
Adv. Astron. Ap.	— Advances in Astronomy and Astrophysic
Adv. Space Sci. and Tech.	— Advances in Space Science and Technic
A. J.	— Astronomical Journal
A. N.	— Astronomische Nachrichten
Ann. IQSY	— Annals of the Special Committee for the International Years of the Quiet Sun
Ann. d'Ap.	— Annales d'Astrophysique
Ann. Geophys.	— Annales de Geophysique
Ann. Obs. Lund	— Annals of the Lund Astronomical Observatory
Ann. Tokyo Astr. Obs.	— Annals of the Tokyo Astronomical Observatory
Annual Rev. Astron. Ap.	— Annual Review of Astronomy and Astrophysics
Ark. Astron.	— Arkiv för Astronomi
Ap. J.	— Astrophysical Journal
Ap. J. Supp.	— Astrophysical Journal Supplement Series
Ap. L.	— Astrophysical Letters
Ap. Norvegica	— Astrophysica Norvegica
Ap. Space Sci.	— Astrophysics and Space Science
A. Q. 1	— Allen C. W., Astrophysical Quantities, 1st ed., The Athlone Press, London, 1955. Русский перевод: Аллен К. У., Астрофизические величины, ИЛ, М., 1960
A. Q. 2	— Allen C. W., Astrophysical Quantities. 2nd ed., The Athlone Press, London, 1963
Astron. Ap.	— Astronomy and Astrophysics
Astron. Ap. Supp.	— Astronomy and Astrophysics Supplement Series
Astr. Mit. Eid. St. Zurich	— Astronomische Mitteilungen der Eidgenossischen Sternwarte, Zürich
A. S. P. Leaflets	— Leaflets Astronomical Society of the Pacific
Aust. J. Phys.	— Australian Journal of Physics
A. Ж.	— Астрономический журнал
A. Ц.	— Астрономический циркуляр
B. A. N.	— Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands
B. A. Czech.	— Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia

- Bol. Tonantzintla
 Bull. American. Geol. Soc.
 Бюл. ГАО
 Canadian J. Sci.
 Contr. Inst. d'Ap. Paris
 COSPAR
 C. R.
 ESRO
 Geophys. J.
 Gerlands Beitr. z. Geoph.
 Goddard Rep.
 Groningen Publ.
 Handb. d'Ap.
 Handbook B. A. A.
 Handb. d. Phys.
 Harv. Ann.
 Harv. Coll. Obs
 Harv. Mon.
 IAGA
 I. A. U.
 Irish A. J.
 IUPAC
 J. A. T. P.
 J. B. A. A.
 Jet Prop. Lab.
 J. Geoph. Res.
 J. Opt. Soc. Am.
 J. Phys.
 J. Q. S. R. T.
 J. R. A. S. Canada
 J. Res. N. B. S.
 Lick Obs. Bull.
 Lund Obs. Medd.
 Lun. Plan. Lab.
 Mem. B. A. A.
 Mem. Com. Obs.
 Mem. R. A. S.
 Mem. Stromlo
 Mitt. Ap. Obs. Potsdam
 Mitt. Heidelberg
 Mitt. US, Wien
 M. N.
 NASA
 Naturwiss.
 N. B. S. Circ.
 N. B. S. Mon.
 N. B. S. Tech. Notes
 NRL Rep.
 Obs. Ap. Arcetri
 Obs. Handb. R. A. S. Canada
 Phil. Trans. Roy. Soc. London
 Planet. Space Sci.
 Proc. Astron. Soc. Australia
 Proc. I. R. E.
 Proc. Phys. Soc.
 Proc. Roy. Soc.
 Publ. A. S. Japan
 Publ. A. S. P.
 Publ. Dom. Ap. Obs.
 Publ. Leander McCormick Obs.
 Publ. Lick Obs.
 Q. J. R. A. S.
 Réch. Astron. Obs. Utrecht
 Rev. Mod. Phys.
 Rep. Prog. Phys.
 Sitz. Preuss. Ak. Wiss.
 Smithson. Contr. Ap. Obs.
 Sol. Phys.
 Terr. Mag.
- Boletin del Instituto de Tonantzintla
 — Bulletin of the American Geological Society
 — Бюллетень Главной астрономической обсерватории (Пулково)
 — Canadian Journal of Science
 — Contributions de l'Institut d'Astrophysique, de Paris
 — Committee on Space Research
 — Comptes Rendus Academie des Sciences, Paris
 — European Space Research Organization
 — The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society
 — Gerlands Beitrage zur Geophysik
 — Reports of the Goddard Space Flight Center, Greenbelt
 — Publications of the Kapteyn Astronomical Laboratory of Groningen
 — Handbuch der Astrophysik
 — British Astronomical Association Handbook
 — Handbuch der Physik
 — Harvard Annals
 — Circulars of the Harvard College Observatory
 — Harvard Monographs
 — International Association of Geomagnetism and Aeronomy
 — International Astronomical Union
 — The Irish Astronomical Journal
 — International Union of Pure and Applied Chemistry
 — Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics
 — Journal of the British Astronomical Association
 — Jet Propulsion Laboratory Publications
 — Journal of Geophysical Research
 — Journal of the Optical Society of America
 — Journal de Physique
 — Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer
 — Journal of the Royal Astronomical Society of Canada
 — Journal of Research of the National Bureau of Standards
 — Lick Observatory Bulletin
 — Meddelande från Lunds Astronomiska Observatorium
 — Communications of the Lunar and Planetary Laboratory
 — Memoirs of the British Astronomical Association
 — Memoirs of the Commonwealth Observatory Canberra
 — Memoirs of the Royal Astronomical Society
 — Memoirs of the MtStromlo Observatory
 — Mitteilungen des Astrophysikalischen Observatorium zu Potsdam
 — Mitteilungen der Landessternwarte Heidelberg
 — Mitteilungen der Universitäts Sternwarte Wien
 — Monthly Notices of the Royal Astronomical Society
 — National Aeronautics and Space Administration
 — Die Naturwissenschaften
 — Circulars of the National Bureau of Standards
 — Monographs of the National Bureau of Standards
 — Technical Notes of the National Bureau of Standards
 — Reports of the Naval Research Laboratory
 — Observatorio Astrofisico Arcetri
 — Observer's Handbook of the Royal Astronomical Society of Canada
 — Philosophical Transactions of the Royal Society of London
 — Planetary and Space Science
 — Proceedings of the Astronomical Society of Australia
 — Proceeding of the Institute of Radio Engineers
 — Proceedings of the Physical Society
 — Proceedings of the Royal Society
 — Publications of the Astronomical Society of Japan
 — Publications of the Astronomical Society of the Pacific
 — Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Victoria
 — Publications of the Leander McCormick Observatory
 — Publications of the Lick Observatory
 — Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society
 — Recherches Astronomiques de l'Observatoire Utrecht
 — Reviews of Modern Physics
 — Reports on Progress in Physics
 — Sitzungsberichte d. Preussischen Akademie der Wissenschaften
 — Contributions of Smithsonian Astrophysical Observatory
 — Solar Physics
 — Terrestrial Magnetism

Trans. I. A. U.	— Transactions of the International Astronomical Union
USAF	— United States Air Force
Veröff. Sternw. München	— Veröffentlichungen der Sternwarte zu München
Z. Ap.	— Zeitschrift für Astrophysik

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 6, **2**, § 7.
2. Trans. I. A. U., **6**, 345 (1939); **12C**, 116 (1966).
3. Letter Symbols, Signs and Abbreviations, Part I, British Standards Inst., 1967.
4. *Allen C. W.*, M. N., **148**, 435 (1970).
5. Quantities, Units and Symbols, Royal Society, 1971.

Основные постоянные и единицы

§ 8. Математические постоянные

Постоянная	Число	lg
π	3,14159 26536	0,49714 98727
2π	6,28318 53072	0,79817 98684
4π	12,56637 06144	1,09920 98640
π^2	9,86960 44011	0,99429 97454
$\sqrt{\pi}$	1,77245 38509	0,24857 49363
e или e	2,71828 18285	0,43429 44319
mod = M = lg e	0,43429 44819	1,63778 43113
1/M = ln 10	2,30258 50930	0,36221 56887
2	2,00000 00000	0,30102 99957
$\sqrt{2}$	1,41421 35624	0,15051 49978
$\sqrt{3}$	1,73205 08076	0,23856 06274
$\sqrt{10}$	3,16227 76602	0,50000 00000
ln π	1,14472 98858	0,05870 30212
e^π	23,14069 26328	1,36437 63538
Постоянная Эйлера γ	0,57721 56649	1,76133 81088
1 радиан	r = 57,29577 95131°	1,75812 26324
	= 3437,746 77078'	3,53627 38828
	= 206264, 80625"	5,31442 51332
	1° = 0,01745 32925r	2,24187 73676
	1' = 0,00029 08882r	4,46372 61172
	1" = 0,00000 48481r	6,68557 48668

Число квадратных градусов на сфере
 $= 129\,600/\pi = 41\,252,96124$

Число квадратных градусов в стерадиане
 $= 32\,400/\pi^2 = 3\,282,80635$

Для распределения Гаусса $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$
 Вероятная ошибка/стандартная ошибка
 $= r/\sigma = 0,67448\,97502$

Вероятная ошибка/средняя ошибка
 $= r/\eta = 0,84534\,75394$
 $\sigma/\eta = 1,25331\,4137$
 $\rho = (r/\sigma)/\sqrt{2} = 0,47693\,62762$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 7, 2, § 8.
2. Abramowitz M., Stegun I. A., Handbook of Mathematical Functions, Dover, 1965, p. 2.

§ 9. Физические постоянные

Стандартная ошибка последнего десятичного знака заключена в скобки (). В формулах заряд электрона e выражен в системе СГСЭ, заряд электрона в системе СГСМ равен e/c .

Фундаментальные постоянные [4]

Скорость света	$c = 2,997\,925\,0(10) \cdot 10^{10}$ см/с
	$c^2 = 8,987\,554 \cdot 10^{20}$ см ² /с ²
Постоянная тяготения	$G = 6,670(4) \cdot 10^{-8}$ дин · см/г ²
Постоянная Планка	$2\pi\hbar = \hbar = 6,626\,20(5) \cdot 10^{-27}$ эрг · с
	$\hbar = 1,054\,59 \cdot 10^{-27}$ эрг · с
Заряд электрона	$e = 4,803\,25(2) \cdot 10^{10}$ ед. СГСЭ
	$= 1,602\,192(7) \cdot 10^{-10}$ ед. СГСМ
	$e^2 = 23,0712 \cdot 10^{-20}$ в ед. СГСЭ
	$e^4 = 5,322\,80 \cdot 10^{-38}$ в ед. СГСЭ
Масса электрона	$m_e = 9,109\,56(5) \cdot 10^{-28}$ г
	$= 5,485\,93(3) \cdot 10^{-4}$ а. е. м.
Масса, соответствующая единице атомного веса (шкала ¹² C = 12)	$M = \text{а. е. м.} = 1,660\,531(11) \cdot 10^{-24}$ г
Постоянная Больцмана	$k = 1,380\,62(6) \cdot 10^{-16}$ эрг/град
	$= 8,6171 \cdot 10^{-5}$ эВ/град
	$k^{1/2} = 1,175\,00 \cdot 10^{-8}$ эрг ^{1/2} /град ^{1/2}
Газовая постоянная (шкала ¹² C = 12)	$R = 8,3143(4) \cdot 10^7$ эрг/(град · моль)
	$= 1,9865$ кал/(град · моль)
	$= 82,056(4)$ см ³ · атм/(град · моль)
	$= 62\,363$ см ³ · мм рт. ст./(град · моль)
Механический эквивалент тепла [1]	$J = 4,1854$ Дж/кал
Число Авогадро	$N_A = 6,022\,17(4) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Число Лошмидта	$n_0 = 2,686\,84 \cdot 10^{19}$ см ⁻³
Объем 1 грамм-молекулы при стандартных условиях $= N_A/n_0$	$V_0 = 22,4136 \cdot 10^3$ см ³ /моль
Стандартная атмосфера	$A_0 = 1\,013\,250$ дин/см ² = 760 мм рт. ст.
Точка плавления льда (= 0 °C)	$= 273,150$ К
Тройная точка воды (H ₂ O)	$= 273,160$ К
Число Фарадея	$N_A e/c = 9648,67(5)$ ед. СГСМ/моль

Атомные постоянные

Постоянная Ридберга для ¹ H	$R_H = 109\,677,576(11)$ см ⁻¹ (I. A.)
	$1/R_H = 911,763\,40$ I. A. (вакуум)
Постоянная Ридберга для бесконечной массы	$R_\infty = 2\pi^2 m_e e^4 / ch^3$
	$= 109\,737,312(11)$ см ⁻¹ (I. A.)
	$1/R_\infty = 911,267\,08$ I. A. (вакуум)
	$cR_\infty = 3,289\,842 \cdot 10^{15}$ с ⁻¹
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = 2\pi e^2 / hc$
	$= 7,297\,351(11) \cdot 10^{-3}$
	$1/\alpha = 137,036\,0(2)$
	$\alpha^2 = 5,325\,13 \cdot 10^{-5}$
Радиус первой боровской орбиты (бесконечная масса)	$a_0 = \hbar^2 / 4\pi^2 m_e e^2$
	$= 0,529\,177\,5(8) \cdot 10^{-8}$ см
Период обращения для первой боровской орбиты, деленный на 2π	$\tau_0 = m_e^{1/2} a^{3/2} e^{-1} = \hbar^3 / 8\pi^3 m_e e^4$
	$= 2,418\,9 \cdot 10^{-17}$ с
Частота, соответствующая первой боровской орбите	$= 6,579\,7 \cdot 10^{15}$ с ⁻¹
Площадь первой боровской орбиты	$\pi a_0^2 = 8,797\,37 \cdot 10^{-17}$ см ²

Скорость электрона на первой боровской орбите	$a_0 v_0^{-1} = 2,187\ 69 \cdot 10^8\ \text{см/с}$
Атомная единица энергии (2 ридберга)	$= e^2/a_0 = 2chR_\infty$ $= 4,359\ 83 \cdot 10^{-11}\ \text{эрг}$ $= 27,211\ 65\ \text{эВ}$
Энергия 1 ридберг (часто принимается за атомную единицу энергии)	$= 2,179\ 92\ (2) \cdot 10^{-11}\ \text{эрг}$ $= 13,605\ 83\ (5)\ \text{эВ}$
Атомная единица момента импульса	$\hbar = h/2\pi$ $= 1,054\ 592\ (8) \cdot 10^{-27}\ \text{г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$
Классический радиус электрона	$l = e^2/m_e c^2$ $= 2,817\ 94 \cdot 10^{-13}\ \text{см}$
Постоянная Шредингера для неподвижного ядра	$8\pi^2 m_e \hbar^{-2} = 1,638\ 17 \cdot 10^{27}\ \text{эрг}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Постоянная Шредингера для атома ^1H	$= 1,637\ 4 \cdot 10^{27}\ \text{эрг}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Сверхтонкая структура расщепления основного состояния атома ^1H	$\nu_{\text{H}} = 1420,405\ 751\ 786\ (2) \cdot 10^6\ \text{с}^{-1}$
Разделение дублетов в атоме ^1H (1/16) $R_{\text{H}}\alpha^2 [1 + \alpha/\pi + (5/8 - 5,946/\pi^2)\alpha^2]$	$= 0,365\ 877\ \text{см}^{-1}$ $= 1,096\ 87 \cdot 10^{10}\ \text{с}^{-1}$
Приведенная масса электрона в атоме ^1H	$m_e(m_p/m_{\text{H}}) = 9,1046 \cdot 10^{-28}\ \text{г}$
Масса атома водорода	$= 1,673\ 52 \cdot 10^{-24}\ \text{г}$ $= 1,007\ 82\ \text{а. е. м.}$
Масса протона	$= 1,672\ 661 \cdot 10^{-24}\ \text{г}$ $= 1,007\ 27\ \text{а. е. м.}$
Энергия, соответствующая атомной единице массы	$M\text{с}^2 = 1,492\ 41 \cdot 10^{-3}\ \text{эрг}$ $= 931,481\ (5)\ \text{МэВ}$
Энергетический эквивалент массы покоя электрона	$m_e c^2 = 8,187\ 27 \cdot 10^{-7}\ \text{эрг}$ $= 0,511\ 004\ \text{МэВ}$
Отношение масс протона и электрона	$= 1836,11$
Удельный заряд электрона	$e/m_e = 1,758803 \cdot 10^7\ \text{ед. СГСМ/г}$ $= 5,272\ 76 \cdot 10^{-17}\ \text{ед. СГСЭ/г}$
Квант магнитного потока	$h/e = 1,379\ 523 \cdot 10^{-17}\ \text{эрг} \cdot \text{с/ед. СГСЭ}$ $hc/e = 4,135\ 71 \cdot 10^{-7}\ \text{Гс} \cdot \text{см}^2$
Квант циркуляции	$h/m_e = 7,273\ 89\ \text{эрг} \cdot \text{с/г}$
Комптоновская длина волны	$h/m_e c = 2,426\ 310 \cdot 10^{-10}\ \text{см}$ $h/2\pi m_e c = 3,861\ 592 \cdot 10^{-11}\ \text{см}$
Постоянная полосатого спектра (момент инерции/волновое число)	$h/8\pi^2 c = 27,9933 \cdot 10^{-40}\ \text{г} \cdot \text{см}$
Постоянная атомной теплоемкости	$= c_2/c = h/k$ $= 4,799\ 43 \cdot 10^{-11}\ \text{с} \cdot \text{град}$
Магнитный момент 1 магнетона Бора	$\mu_{\text{B}} = \frac{1}{2} \alpha m_e^{1/2} a_0^{5/2} v_0^{-1} = h/4\pi m_e c$ $\mu_{\text{B}} = 9,274\ 10\ (7) \cdot 10^{-21}\ \text{эрг/Гс}$
Магнитный момент электрона	$\mu_e = 1,001\ 159\ 639\ (3)\ \mu_{\text{B}}$
Магнитный момент протона	$\mu_{\text{p}} = 1,521\ 032\ 6\ (5)\ \mu_{\text{B}}$
Гиромангнитное отношение для протона, исправленное за диамагнетизм H_2O	$\gamma_{\text{p}} = 2,675\ 196\ (8) \cdot 10^4\ \text{рад}/(\text{с} \cdot \text{Гс})$
Магнитный момент 1 ядерного магнетона	$\mu_{\text{n}} = h/4\pi m_{\text{p}} c$ $= 5,050\ 95\ (5) \cdot 10^{-24}\ \text{эрг/Гс}$
Атомная единица магнитного момента	$= 2\mu_{\text{B}}/\alpha$ $= 2,541\ 77 \cdot 10^{-18}\ \text{эрг/Гс}$
Магнитный момент на 1 моль для 1 магнетона Бора на 1 молекулу	$= 5585,02\ \text{эрг}/(\text{Гс} \cdot \text{моль})$

$$\begin{aligned} \text{Зеемановское расщепление} &= e/4\pi m_e c [e \text{ в ед. СГСМ}] \\ &= 4,668\ 60 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Гс}^{-1} \\ &\text{в частоте} &= 1,399\ 61 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \cdot \text{Гс}^{-1} \end{aligned}$$

Электрон-вольт и фотоны [4]

$$\begin{aligned} \text{Длина волны, соответствующая 1 эВ} &\lambda_0 = 12\ 398,54 (4) \cdot 10^{-8} \text{ см} \\ \text{Волновое число, соответствующее 1 эВ} &s_0 = 8065,46 \text{ см}^{-1} \\ &= 8,065\ 546 \text{ килокайзер} \\ \text{Частота, соответствующая 1 эВ} &\nu_0 = 2,417\ 965 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1} \\ \text{Энергия 1 эВ} &E_0 = 1,602\ 192 (7) \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \\ &= 0,073\ 4979 \text{ ридберг} \\ \text{Энергия фотона, соответствующая единице волнового числа} &hc = 1,986\ 48 \cdot 10^{-16} \text{ эрг} \\ \text{Энергия фотона, соответствующая длине волны } \lambda &= 1,986\ 48 \cdot 10^{-8} / \lambda \text{ эрг} \\ &[\lambda - \text{длина волны в вакууме в } \text{\AA}] \\ \text{Скорость электрона, обладающего энергией 1 эВ} &= [2 \cdot 10^{-8} e/m_e c]^{1/2} \\ &= 5,93094 \cdot 10^7 \text{ см/с} \\ &(\text{скорость})^2 = 3,517\ 60 \cdot 10^{15} \text{ см}^2/\text{с}^2 \\ \text{Длина волны электрона, обладающего энергией } V \text{ эВ} &= h (2m_e E_0)^{-1/2} V^{-1/2} \\ &= V^{-1/2} 12,264 \cdot 10^8 \text{ см} \\ \text{Температура, соответствующая 1 эВ} &= E_0/k \\ &= 11\ 604,8 \text{ К} \\ \text{Температура, соответствующая 1 эВ в десятичных логарифмах} &= (E_0/k) \lg e \\ &= 5039,9 \text{ К} \\ \text{Температура, соответствующая 1 килокайзеру в десятичных логарифмах} &= 10^3 (hc/k) \lg e \\ &= 624,88 \text{ К} \\ \text{Энергия 1 эВ на 1 молекулу} &= 23\ 053 \text{ кал/моль} \end{aligned}$$

Постоянные излучения

$$\begin{aligned} \text{Постоянная плотности излучения} &= 8\pi^5 k^4 / 15 c^3 h^3 \\ a &= 7,564\ 64 \cdot 10^{-15} \text{ эрг}/(\text{см}^3 \cdot \text{град}^4) \\ \text{Постоянная Стефана – Больцмана} &= ac/4 \\ \sigma &= 5,669\ 56 \cdot 10^{-5} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}^4 \cdot \text{с}) \\ \text{Первая постоянная излучения (излучательная способность)} &= 2\pi hc^2 \\ c_1 &= 3,741\ 85 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^2/\text{с} \\ \text{Первая постоянная излучения (плотность излучения)} &= 8\pi hc \\ c'_1 &= 4,992\ 58 \cdot 10^{-15} \text{ эрг} \cdot \text{см} \\ \text{Вторая постоянная излучения} &= hc/k \\ c_2 &= 1,438\ 83 \text{ см} \cdot \text{град} \\ \text{Постоянная закона смещения Вина} &= c_2/4,965\ 114\ 23 \\ &= 0,289\ 789 \\ \text{Механический эквивалент света для } \lambda = 5550 \text{ \AA} &= 0,001\ 47 \text{ Вт/лм} \end{aligned}$$

Некоторые общие постоянные [1]

$$\begin{aligned} \text{Плотность ртути (0 } ^\circ\text{C, 760 мм рт. ст.)} &= 13,395\ 080 \text{ г/см}^3 \\ \text{Отношение длин волн рентгеновских лучей, определенных по постоянной решетки кальцита } \lambda_g, \text{ к} \\ \text{длинам волн по шкале Зигбана } \lambda_s [4] &\lambda_g/\lambda_s = 1,002\ 076 [\lambda_s (\text{Cu } K\alpha_1) = 1,537400 \text{ к X}] \\ \text{Постоянная решетки кальцита (20 } ^\circ\text{C)} &= 3,035\ 66 \cdot 10^{-8} \text{ см} \\ \text{Плотность кальцита (20 } ^\circ\text{C)} &= 2,710\ 30 \text{ г/см}^3 \\ \text{Максимальная плотность воды} &= 0,999\ 972 \text{ г/см}^3 \\ \text{Резонансная частота цезия (определяющая эфемеридную секунду)} &= 9\ 192\ 631\ 770 \text{ Гц} \end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 8; 2, § 9.
2. *Cohen E. R., Dumond J. W. M.*, Rev. Mod. Phys., **37**, 537 (1965).
3. *Abramowitz M., Stegun I. A.*, Handbook of Mathematical Functions, Dover 1965.
4. *Taylor B. N., Parker, Langenberg*, Rev. Mod. Phys., **41**, 375 (1969).

§ 10. Основные астрономические постоянные

Астрономическая единица расстояния = среднее расстояние Земли от Солнца = большая полуось земной орбиты [2,3,7]	а. е. = $1,495\,979\,(1) \cdot 10^{13}$ см
Парсек (=206 264,806 а. е.)	пс = $3,085\,678 \cdot 10^{18}$ см = 3,261 633 св. года
Световой год	= $9,460\,530 \cdot 10^{17}$ см
Время, за которое свет проходит расстояние 1 а. е. [3]	= 499,004 79 с = 0,005 775 52 сут
Масса Солнца	$M_{\odot} = 1,989\,(1) \cdot 10^{33}$ г
Радиус Солнца	$R_{\odot} = 6,9599 \cdot 10^{10}$ см
Светимость Солнца	$L_{\odot} = 3,826\,(8) \cdot 10^{33}$ эрг/с
Масса Земли	$M_{\oplus} = 5,976\,(4) \cdot 10^{27}$ г
Средняя плотность Земли	$\bar{\rho}_{\oplus} = 5,517\,(4)$ г/см ³
Экваториальный радиус Земли [4,5]	= 6378,164 (2) км
Галактический полюс $\alpha = 191,65^{\circ}$, $\delta = +27,67^{\circ}$ (1900), в новой системе координат, принятой МАС [6]	
Направление на галактический центр	$\alpha = 264,83^{\circ}$, $\delta = -28,90^{\circ}$ (1900)
Движение Солнца	скорость = 19,7 (5) км/с апекс $\alpha = 271^{\circ}$, $\delta = +30^{\circ}$ $l^{\text{II}} = 57^{\circ}$, $b^{\text{II}} = +22^{\circ}$
Постоянные вращения Галактики	$P = +0,32\,(2)''$ в столетие $Q = -0,21\,(3)''$ в столетие
Экваториальный горизонтальный параллакс Солнца [3–5]	= $8,794\,18\,(3)'' = 4,263\,53 \cdot 10^{-5}$ рад
Экваториальный горизонтальный параллакс Луны [8]	= 3422,54'' = 9,210''
Постоянная нутации [8]	= $\frac{2\pi \times 206\,265 \times \text{а. е.}}{ct(1 - e^2)^{1/2}}$
Постоянная аберрации [8]	= 20,496''
[t – сидерический год, e – эксцентриситет орбиты Земли]	
Постоянная тяготения Гаусса k в выражении $n^2 a^3 = k^2 (1 + m)$, где m – масса планеты в единицах массы Солнца, n – среднее суточное движение, a – большая полуось орбиты в а. е.	$k = 0,017\,202\,098\,950$ рад (определяющая постоянная) = 3548,187 607'' = 0,985 607 6686°
	$k/86\,400 = k' = 1,990\,983\,675 \cdot 10^{-7}$ рад для применения с секундами времени = $2\pi/(\text{сидерический год в секундах})$
Гелиоцентрическая постоянная тяготения	= (а. е.) ³ (k') ² = $1,327\,124 \cdot 10^{26}$ см ² /с
Большая полуось орбиты Земли в а. е., определенная по гауссовой постоянной [5]	= 1,000 000 236 а. е.
Параллактическое неравенство [4]	$P_{\zeta} = 124,986''$

$$\begin{aligned} \text{Постоянная в лунном неравенстве} &= \mu A_{\zeta} / (1 \text{ а. е.}) (1 + \mu) \\ L &= 6,4399'' \end{aligned}$$

где $\mu = M_{\oplus} / M_{\zeta}$ и A_{ζ} – расстояние до Луны

$$\text{Лунное неравенство в долготе Солнца} \quad L_s = 6,467'' = L \times 1,0045$$

$$\text{Отношения масс [4, 5, 7]} \quad M_{\oplus} / M_{\zeta} = 81,301$$

$$M_{\odot} / M_{\oplus} = 332\,945$$

$$M_{\odot} / (M_{\oplus} + M_{\zeta}) = 328\,900$$

Наклонение эклиптики (мгновенная эклиптика) [9]

$$\varepsilon = 23^{\circ}27'8,26'' - 46,845''T - 0,0059''T^2 + 0,00181''T^3,$$

где T – в столетиях от 1900 г.

Наклонение эклиптики (задана эклиптика для эпохи 1900)

$$\varepsilon_1 = 23^{\circ}27'8,26'' + 0,061''T^2 - 0,008''T^3$$

$$\sin \varepsilon \text{ или } \varepsilon_1 = 0,397\,986 \text{ (1900)}$$

$$\cos \varepsilon \text{ или } \varepsilon_1 = 0,917\,392 \text{ (1900)}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 9; 2, § 10.
2. Ash M. E., Shapiro, Smith, A. J., 72, 338 (1967).
3. Muhleman D. O., M. N., 144, 151 (1969).
4. Рабочая группа, Trans. I. A. U., 1964, XIII, 593 (1966).
5. Baker R. M. L., Makemson M. W., Astrodynamics, 2nd ed., Academic Press, 1967, p. 156.
6. Blaauw A., Gum, Pawsey, Westerhout, M. N., 121, 123 (1960).
7. Rabe E., Francis M. P., A. J., 72, 856 (1967).
8. Astronomical Ephemeris, 1970, p. 477.
9. Explanatory Supplement to the Ephemeris, 1961.

§ 11. Астрономические постоянные, включающие время

В астрономических наблюдениях используют всемирное время TU0 (или t_U), которое получают переводом звездного времени в среднее солнечное. Внося небольшие поправки, получают TU1 (TU0, исправленное за движение полюса) и TU2 (TU1, исправленное за сезонные колебания скорости вращения Земли). TU1 и TU2 испытывают колебания вследствие замедления и неравномерности вращения Земли. Следовательно, чтобы получить Всемирное координированное время TUC для службы времени, надо исправить служебные часы за постепенные и быстрые изменения скорости вращения Земли.

Эфемеридное время TE (или t_E) было определено как равномерно текущее время. Оно связано с длиной тропического года и системой астрономических постоянных [3]. Считается, что эфемеридное время совпадает со всемирным для эпохи 1900,0.

$$\text{Тропический год (1900,0)} = 31\,556\,925,9747 \text{ с}_E \text{ (эфемеридных секунд).}$$

Очень стабильная оценка атомного времени была получена с помощью цезиевого резонатора [2]. Атомное время TA (или t_A) было определено и согласовано с TU в 1958 г. Оценки времени TA и TE совпадают с точностью до $2 \cdot 10^{-9}$.

$$\text{Атомная секунда } s_A = 9\,192\,631\,770 \text{ циклов цезиевого резонатора}$$

С 1 января 1972 г. атомное время используется для всех синхронизации. Разность между TUC, которое дает служба времени, и TU сохраняется в пределах 0,7 с путем периодического прибавления (или вычитания) к времени TUC одной секунды.

Отношение средней солнечной секунды (сглаженное значение) к эфемеридной секунде:

$$s_U / s_E = s_U / s_A = 1 + \Delta.$$

Сглаженное значение замедления вращения Земли, определенное по древним затмениям [1, 5, 10]:

$$\Delta = +1,8 \cdot 10^{-8} T,$$

где T – эпоха от 1900,0 в столетиях. Эта величина сильно зависит от принятого значения векового ускорения Луны: $-11,2''$ столетие⁻².

Связь между различными оценками времени:

$$t_E = t_A + 32,15^s,$$

$$t_A = t_U (1958,0).$$

Сутки

Период вращения Земли (относительно неподвижных звезд)

$$= (86164,09892 + 0,0015T) s_E$$

$$= 23^h 56^m 04,0982 + 0,0015T s_E$$

$$= (0,9972696634 + 1,8 \cdot 10^{-8} T) d_E$$

$$= (1,002737811 - 1,8 \cdot 10^{-8} T)^{-1} d_E$$

$$= 1,0 + (971 + 0,6T) \cdot 10^{-10} \text{ средних сидерических суток}$$

*Разность между эфемеридным и всемирным временем
и относительное отклонение скорости вращения Земли
от равномерной [1–3]*

Эпоха	$t_E - t_U,$ с	$\Delta, 10^{-8}$
1810,0	+4	
1815	+4	
1820	+4	-1,7
1825	+3	-1,1
1830	+0,7	-0,9
1835	-1,2	-0,7
1840	-1,0	+0,7
1845	0,0	+1,1
1850	+1,0	+0,8
1855	+2,0	+0,4

Эпоха	$t_E - t_U,$ с	$\Delta, 10^{-8}$
1910,0	+9,6	+4,4
1915	+15,8	+3,8
1920	+20,1	+2,0
1925	+22,5	+0,6
1930	+23,1	+0,2
1935	+23,6	+0,3
1940	+24,0	+1,0
1945	+26,0	+1,5
1950	+28,0	+1,6
1955	+30,3	+1,2

Эпоха	$t_E - t_U,$ с	$\Delta, 10^{-8}$
1860,0	+2,3	-0,3
1865	+1,7	-1,4
1870	-2,0	-3,4
1875	-7,4	-2,1
1880	-8,0	-0,3
1885	-8,1	0,0
1890	-8,0	+0,3
1895	-7,6	+1,1
1900	-4,5	+3,6
1905	+2,6	+4,5

Эпоха	$t_E - t_U,$ с	$\Delta, 10^{-8}$
1956,0	+31,34	+1,1
1958	+32,15	+1,0
1960	+33,12	+1,4
1962	+33,98	+1,8
1964	+35,01	+2,3
1966	+36,54	+2,7
1968	+38,29	+2,9
1970	+40,1	
1972	+41,9	
1974	+44	

Эфемеридные сутки

$$d_E = 86\,400 s_E$$

Звездные (сидерические) сутки (относительно точки весеннего равноденствия ♉)

$$= (86164,09055 + 0,0015T) s_E$$

$$= (1,002737909 - 1,8 \cdot 10^{-8} T)^{-1} d_E$$

Движение среднего Солнца по прямому восхождению за эфемеридные сутки, измеренное относительно неподвижной точки весеннего равноденствия

$$= 3548,204205''$$

Среднее сидерическое движение Солнца по долготе за эфемеридные сутки [4]	= 3548,1927823'' – 0,000001''T
Движение среднего Солнца по тропической долготе за эфемеридные сутки	= 3548,330407'' + 0,000060''T
Средний поворот Земли за эфемеридные сутки [4]	= 1299548,204205'' – 0,0246''T
Средние солнечные сутки	= (86400 + 0,0015T) s _E = 24 ^h 03 ^m 56 ^s , 5554 звездного времени (в 1900 г.) = 1,00273791 звездных суток (в 1900)

Год

Тропический год (от равноденствия до равноденствия) [4]	= (365,24219878 – 0,00000616T) d _E = (31556925,9747 – 0,5307) s _E = (365,242199 – 0,000013T) средних солнечных суток
Сидерический год (относительно неподвижных звезд)	= (365,25636556 + 0,00000011T) d _E = (31558149,984 + 0,010T) s _E
Время изменения прямого восхождения среднего Солнца на 360°, измеренного относительно неподвижной эклиптики	= 365,2551897d _E
Аномалистический год (время между двумя последовательными прохождениями через перигелий)	= (365,25964134 + 0,00000304T) d _E
Затменный (драконический) год	= (346,620031 + 0,000032T) d _E
Юлианский год	= 365,25 сут
Григорианский календарный год	= 365,2425 сут
Начало бесселева года (когда для среднего Солнца $\alpha = 18^h 40^m$)	= январь 0,813516 ^d + 0,24219878 ^d (x – 1900) – 0,000308 ^d T ² – n, где n – число високосных лет между годом x и 1900 г., не считая год x
Период обращения кометы или астероида	= 1,00004027a ^{3/2} тропических лет = 365,256898a ^{3/2} сут (a в а. е.)

Луна

Синодический месяц (от новолуния до новолуния)	= (29,5305882 – 0,0000002T) сут
Сидерический месяц (относительно неподвижных звезд)	= (27,3216610 – 0,0000002T) сут
Период движения узла лунной орбиты, нутационный период	= 18,61 тропического года

Прецессия

Постоянные прецессии (вековой) взяты из [4]. Эпоха T выражена в тропических годах, считая от 1900 г. N – значение по Ньюкомбу [7].

Постоянная прецессии	$P = 5493,84'' - 0,004''T = N + p_g + 1,27''$
Постоянная лунно-солнечной прецессии	$p_0 = 5040,01'' + 0,49''T = N + p_g + 1,01''$
Геодезическая прецессия (релятивистский эффект)	$p_g = 1,92''$
	$p_1 = p_0 - p_g = 5038,09'' + 0,49''T$
Полная вековая прецессия по долготе	$p = 5026,65'' + 2,225''T = N + 1,01''$
Более поздняя оценка поправки [9]	$= N + 1,13''$
Прецессия от планет	$\lambda' = 12,48'' - 1,89''T$
Вековая прецессия по α	$m = 4609,43'' + 2,80''T = N + 0,92''$ $= 307,295^s + 0,186^sT$
Вековая прецессия по δ	$n = 2005,08'' - 0,85''T = N + 0,40''$
Период прецессии (неподвижная эклиптика)	= 25725 лет
(движущаяся эклиптика)	= 25784 года
Долгота восходящего узла на неподвижной эклиптике	$\Pi = 173^\circ 57' 10'' + 3288''T$

Скорость вращения эклиптики

$$\begin{aligned}\pi &= 47,11''T - 0,071''T^2 + 0,0006''T^3, \\ \pi \sin \Pi &= 4,96''T + 0,194''T^2 - 0,0002''T^3, \\ \pi \cos \Pi &= -46,84''T + 0,054''T^2 + 0,0003''T^3.\end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 10; 2, § 11.
2. Essen L., Metrologia, 4, 163 (1968).
3. Astronomical Ephemeris, 1970.
4. Clemence G. M., A. J., 53, 169 (1948).
5. Currott D. R., A. J., 71, 264 (1966).
6. Newcomb S., Astronomical Papers American Ephemeris, 8, 73 (1897).
7. Explanatory Supplement to the Ephemeris, 1961.
8. Newton R. R., Science, 166, 825 (1969).
9. Fricke W., A. J., 72, 1368 (1967).
10. Newton R. R., Mem. R. A. S., 76, 99 (1972).

§ 12. Единицы

Единицы выражены в системе СГС: см, г, с.

Приводятся также единицы системы СИ: метр м, килограмм кг, секунда с, ампер А, Кельвин К и кандела кд [2].

Безразмерные единицы

Градус	$1^\circ = \text{град} = (\text{прямой угол})/90$
Радян	рад = 57,29578 град
Стерadian	ср = 3282,8 град ²
Экспоненциальный интервал	exp = 0,4343 dex
Звездная величина	$1^m = -0,4000 \text{ dex}$ (в блеске звезды)

Длина, l

Метр (единица СИ)	м = 100 см = 1 650 763,73 длины волны ⁸⁶ Кг (в вакууме)
Километр	км = 10 ⁵ см
Ангстрем	Å = 10 ⁻⁸ см = 10 ⁻¹⁰ м
Микрометр	мкм = 10 ⁻⁴ см = 10 ⁻⁶ м
Атомная единица	$a_0 = 0,52918 \cdot 10^{-8}$ см
Астрономическая единица	а. е. = 1,49598 · 10 ¹³ см
Световой год	св. год. = 9,4605 · 10 ¹⁷ см = 63 240 а. е.
Парсек	пс = 3,0857 · 10 ¹⁸ см = 206 265 а. е. = 3,2616 св. лет = 30,4800 см = 12 дюймов
Фут	= 30,4800 см = 12 дюймов
Дюйм	= 2,540 000 см
Миля	= 1,609344 км = 5280 футов
Морская миля	= 1,853 км = 6080 футов
Радиус Солнца	$R_\odot = 6,960 \cdot 10^{10}$ см
Классический радиус электрона	$l = 2,818 \cdot 10^{-13}$ см

Площадь

Квадратный фут кв. фут	= 929,03 см ²
Акр	= 4046,85 м ² = 43 560 кв. футов
Барн	= 10 ⁻²⁴ см ²
Площадь первой боровской орбиты	$\pi a_0^2 = 8,7974 \cdot 10^{-17}$ см ²

Объем

Кубический фут куб. фут	= 28 316,8 см ³ = 6,229 галлона (Англия) = 7,481 галлона (США)
-------------------------	---

Литр (старое определение)	= 1000,027 см ³
Унция жидкости	= 480 капель (Англия и США)
	= 28,413 см ³ (Англия)
	= 29,574 см ³ (США)
Объем Солнца (4/3) πR _☉ ³	= 1,4122 · 10 ³³ см ³
Кубический парсек	= 2,93800 · 10 ⁵⁵ см ³
<i>Время</i>	
Секунда	с = единица систем СГС и СИ
Эфемеридная секунда	s _E = 1/31 556 925,9747 тропического года (1900,0)
Атомная секунда	s _A = 9 192 631 770 циклов ¹³³ Cs
Час	ч = 3600 с = 60 мин
Сутки	сут = 86 400 с
Тропический год	= 31556 926 с
	= 365,24219 сут
Сидерическая секунда	= 0,997 2696 с
Сидерический год	= 365,25636 сут
Атомная единица (период обращения электрона на первой борновской орбите, деленный на 2π)	τ ₀ = 2,4189 · 10 ⁻¹⁷ с
Йордановское элементарное время	l/c = 9,3996 · 10 ⁻²⁴ с
<i>Масса</i>	
Килограмм (единица СИ) кг	= 1000 г
Фунт торговый (Англия)	= 453,592 37 г = 7000 гран
(США)	= 453,592 43 г = 7000 гран
Фунт тройский и аптечный	= 373,242 г = 5760 гран
Гран (во всех системах)	= 0,064 7989 г
Карат	= 0,2000 г
Слаг	= 14,594 кг
Тонна	= 2240 фунтов
	= 1,016 047 · 10 ⁶ г
Метрическая тонна	т = 10 ⁶ г
Масса Солнца	M _☉ = 1,989 · 10 ³³ г
Атомная единица (масса электрона)	m _e = 9,1095 · 10 ⁻²⁸ г
Атомная единица массы	a. e. m. = 1,660 53 · 10 ⁻²⁴ г
<i>Энергия</i>	
Джоуль (единица СИ)	Дж = 10 ⁷ эрг
Калория [2]	кал = 4,1854 Дж = 4,1854 · 10 ⁷ эрг
Калория международная	= 4,1868 Дж
Калория термохимическая	= 4,1840 Дж
Киловатт-час	= 3600 · 10 ³ Дж = 8,6013 · 10 ⁵ кал
Британская тепловая единица	= 1055 Дж = 252,0 кал
Терм	= 100 000 британских тепловых единиц
Фут-фунт	= 1,35582 · 10 ⁷ эрг
Килотонна тротила	= 4,2 · 10 ¹⁹ эрг
Электрон-вольт	эВ = 1,6022 · 10 ⁻¹² эрг = 10 ⁻⁶ МэВ
	= 10 ⁻⁹ ГэВ
Атомная единица (2 ридберга)	= 4,3598 · 10 ⁻¹¹ эрг
Ридберг	= 2,1799 · 10 ⁻¹¹ эрг
Энергия, соответствующая единице волнового числа	= 1,9865 · 10 ⁻¹⁶ эрг
Энергия, соответствующая единице атомного веса	= 1,4924 · 10 ⁻³ эрг = 9,315 · 10 ⁸ эВ
Энергия, соответствующая 1 К	= 1,3806 · 10 ⁻¹⁶ эрг = 8,617 · 10 ⁻⁵ эВ

Мощность

Ватт (единица СИ)	Вт = 10^7 эрг/с = 1 Дж/с
Английская лошадиная сила	= 745,7 Вт
Французская лошадиная сила	= 735,5 Вт
Светимость звезды с $M_{bol} = 0$	= $2,97 \cdot 10^{28}$ Вт
Светимость Солнца	= $3,826 \cdot 10^{26}$ Вт

Сила

Ньютон (единица СИ)	Н = 10^5 дин
Паундаль	= $1,3825 \cdot 10^4$ дин
Фунт-вес	= $4,4482 \cdot 10^5$ дин
Слаг	= 14,594 кг
Грамм-сила	гс = 980,665 дин
Взаимное притяжение протона и электрона на расстоянии a_0	= $8,238 \cdot 10^{-3}$ дин

Ускорение

Гал	= 1 см/с^2
Ускорение силы тяжести (стандартное)	$g = 980,665 \text{ см/с}^2 = 32,174 \text{ фут/с}^2$
Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца	= $2,740 \cdot 10^4 \text{ см/с}^2$
Гравитационное ускорение на расстоянии 1 а. е. от Солнца	= $0,5931 \text{ см/с}^2$

Скорость

Метр в секунду (единицы СИ) м/с	= 100 см/с
Миля в час	= 44,704 см/с = 1,4667 фут/с
Скорость света	$c = 2,997\,925 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$
А. е. в год	= 4,7406 км/с
Парсек в год	= $9,7781 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$
Скорость электрона на первой боровской орбите	= $2,188 \cdot 10^8 \text{ см/с}$
Скорость электрона с энергией 1 эВ	= $5,931 \cdot 10^7 \text{ см/с}$
Узел	= 51,47 см/с

Давление

Паскаль (единица СИ)	= $10 \text{ дин/см}^2 = 10 \text{ мкбар}$
Бария (иногда называемая бар)	мкбар = $1,000 \text{ дин/см}^2$
Бар	бар = $1,000 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2 = 0,986923 \text{ атм}$ = $1,0197 \cdot 10^3 \text{ гс/см}^2$
Миллибар	мбар = $10^{-3} \text{ бар} = 10^3 \text{ мкбар} = 10^3 \text{ дин/см}^2$
Атмосфера (стандартная)	атм = $1,013\,250 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2$ = 760 мм рт. ст. = 1013,25 мбар
Миллиметр ртутного столба (=1 торричелли)	мм рт. ст. = $1333,22 \text{ дин/см}^2$ = 0,0013158 атм
Дюйм ртутного столба	= $3,386\,38 \cdot 10^4 \text{ дин/см}^2$ = 0,033 421 атм
Фунт на кв. дюйм	= $6,8947 \cdot 10^4 \text{ дин/см}^2$ = 0,068046 атм

Плотность

Килограмм на куб. метр (единица СИ)	= $1,000 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$
Плотность воды (при 4 °С)	= $0,999\,972 \text{ г/см}^3$
Плотность ртути (при 0 °С)	= $13,5951 \text{ г/см}^3$
Масса Солнца на кубический парсек	= $6,770 \cdot 10^{-23} \text{ г/см}^3$
Плотность газа при нормальных условиях	= $4,4616 \cdot 10^{-5} M_0 \text{ г/см}^3$,
где M_0 – молекулярный вес.	

Температура

Градусные шкалы (Кельвина К, Цельсия (стоградусная) С, Фаренгейта F)	1 град К = 1 град С = 1,8 град F	
Соотношения температур	0 °С = 273,150 К = 32 °F	
	100 °С = 373,150 К = 212 °F	
Тройная точка обычной воды	= 273,160 К = 0,010 °С	
Элементарная температура	$ch/lk = 8,1264 \cdot 10^{11}$ К	
Температура, соответствующая 1 эВ	= 11 605 К	
Температура, соответствующая 1 эВ, в десятичных логарифмах	= 5040 К	
Реперные точки (температурная шкала 1968 г.)		
Водород	Тройная точка	13,81 К
Кислород	Точка кипения	90,19
Сера	» »	717,75
Серебро	Точка плавления	1235,1
Золото [3]	» »	1337,58
Платина	» »	2044
Родий	» »	2236
Иридий	» »	2720

Вязкость (динамическая)

Пуаз	$\Pi = 1$ г/(см · с)
Единица СИ	$H \cdot c/m^2 = 10$ г/(см · с)

Вязкость (кинематическая)

Стокс	$Ст = 1$ см ² /с
Единица СИ	$m^2/c = 10\ 000$ см ² /с

Частота

Герц	$\Gamma_{ц} = 1$ цикл/с
Кайзер (единица волнового числа)	$cm^{-1} = c \cdot 1 \Gamma_{ц} \approx 3 \cdot 10^{10}$ Гц
Частота Ридберга	$cR_{\infty} = 3,289\ 84 \cdot 10^{15}$ Гц
Частота обращения электрона на первой боровской орбите	$2cR_{\infty} = 6,5797 \cdot 10^{15}$ Гц
Частота свободного электрона в магнитном поле \mathcal{H}	$= 2,7992 \cdot 10^6 \mathcal{H}$ Гц/Гс
Частота колебаний плазмы, соответствующая электронной плотности N_e	$= 8,979 \cdot 10^3 N_e^{1/2}$ Гц [N_e в см ⁻³]

Угловая скорость (2π × частота)

Единица угловой скорости	= 1 рад/с = (1/2π) Гц
1" дуги за тропический год	= 1,536 3147 · 10 ⁻¹³ рад/с
1" дуги в сутки	= 5,611 2695 · 10 ⁻¹¹ рад/с
Угловая скорость вращения Земли вокруг оси	= 7,292 1152 · 10 ⁻⁵ рад/с
Средняя угловая скорость движения Земли по орбите	= 1,990 9867 · 10 ⁻⁷ рад/с

Количество движения (импульс)

Единица СИ	= 10 ⁵ г · см/с
$m_e c$	= 2,730 98 · 10 ⁻¹⁷ г · см/с
Импульс электрона на первой боровской орбите	= 1,993 · 10 ⁻¹⁹ г · см/с

Момент импульса

Единица СИ	= 10 ⁷ г · см ² /с
Квантовая единица	$\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-27}$ эрг · с
Однородная сфера (R – радиус, \mathcal{M} – масса, ω – угловая скорость)	момент имп. = (2/5) $R^2 \mathcal{M} \omega$
Момент импульса Солнечной системы	= 3,148 · 10 ⁵⁰ г/(см ² · с)

Сила света

Сила света определена как световой поток на стерадиан.

Кандела (единица СИ)	кд =	(1/60) силы света с 1 см^2 поверхности абсолютно черного тела при температуре плавления платины (2044 К)
Сила света от звезды с $M_v = 0$ вне атмосферы Земли	=	$2,45 \cdot 10^{29}$ кд

Световой поток

Люмен (единица систем СИ и СГС)	лм =	поток от источника с силой света 1 кд в 1 ср
	=	поток от $(1/60\pi) \text{ см}^2$ поверхности абсолютно черного тела при температуре 2044 К
Люмен в области максимальной чувствительности глаза ($\lambda = 5550 \text{ \AA}$)	=	$1,470 \cdot 10^{-3}$ Вт
$\therefore 1 \text{ Вт при } \lambda = 5550 \text{ \AA} =$		680 лм

Световая энергия

Тальбот (единица СИ)	=	1 лм-эрг (единица системы СГС)
	=	1 лм · с

Поверхностная яркость

Стильб	сб =	$1 \text{ кд/см}^2 = \pi \text{ Лб}$
	=	$1 \text{ лм}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$
Ламберт	Лб =	$(1/\pi) \text{ кд/см}^2 = 1000 \text{ мЛб}$
	=	1 лм/см^2 для идеально матовой поверхности
Апостильб	=	1 лм/м^2 для идеально матовой поверхности
	=	10^{-4} Лб
Нит (единица СИ)	нт =	$10^{-4} \text{ сб} = 1 \text{ кд/м}^2$
Кандела на кв. дюйм	=	$0,487 \text{ Лб} = 0,155 \text{ сб}$
Фут-ламберт	=	$1,076 \cdot 10^{-3} \text{ Лб} = 3,43 \cdot 10^{-4} \text{ сб}$
1 звезда $m_v = 0$ на 1 кв. градус вне атмосферы Земли	=	$0,84 \cdot 10^{-6} \text{ сб} = 0,84 \cdot 10^{-2} \text{ нт}$
	=	$2,63 \cdot 10^{-6} \text{ Лб}$
1 звезда $m_v = 0$ на 1 кв. градус при наблюдении в зените при хорошей прозрачности	=	$0,69 \cdot 10^{-6} \text{ сб}$

Излучательная способность (поверхности)

Люмен на кв. метр (единица СИ)	=	10^{-4} лм/см^2
--------------------------------	---	---------------------------

Освещенность (свет, падающий на единицу поверхности)

Фот (единица системы СГС)	ф =	1 лм/см^2
Люкс (единица СИ)	лк =	$1 \text{ лм/м}^2 = 10^{-4} \text{ ф}$
	=	$1 \text{ м} \cdot \text{кд} = 1 \text{ кд с расстояния } 1 \text{ м}$
Фут-кандела	=	$10,76 \text{ лк} = 1,076 \cdot 10^{-3} \text{ ф}$
	=	1 лм/фут^2
Звезда $m_v = 0$ вне атмосферы Земли	=	$2,54 \cdot 10^{-10} \text{ ф}$

Электрические единицы

Основные соотношения между электрическими и магнитными единицами даны в § 13.

Электрический заряд

Кулон (единица СИ)	Кл =	$2,997\,925 \cdot 10^9 \text{ ед. СГСЭ}$
	=	$0,10 \text{ ед. СГСМ}$
	=	$-6,241\,45 \cdot 10^{18} \text{ электронов}$

Заряд электрона $e = -4,803\ 25 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ
 $= 1,602\ 19 \cdot 10^{-19}$ Кл

Электрический потенциал

Вольт (единица СИ) $V = 3,335\ 64 \cdot 10^{-3}$ ед. СГСЭ
 $= 10^8$ ед. СГСМ
 Потенциал электрона на первой боровской орбите $= 27,212\ В = 0,090\ 768$ ед. СГСЭ
 Потенциал ионизации с первой боровской орбиты $= 13,606\ В = 0,045\ 384$ ед. СГСЭ

Электрическое поле

Вольт на метр (единица СИ) $= 3,335\ 64 \cdot 10^{-5}$ ед. СГСЭ
 $= 10^6$ ед. СГСМ
 Поле ядра на расстоянии первой боровской орбиты $= 5,140 \cdot 10^{11}$ В/м $= 1,7145 \cdot 10^7$ ед. СГСЭ

Сопротивление

Ом (единица СИ) Ом $= 1,112\ 65 \cdot 10^{-12}$ ед. СГСЭ
 $= 10^9$ ед. СГСМ

Электрический ток

Ампер (единица СИ) А $= 2,997\ 925 \cdot 10^9$ ед. СГСЭ
 $= 0,10$ ед. СГСМ
 $= -6,241\ 45 \cdot 10^{18}$ электрон/с
 Ток на первой боровской орбите $= 1,054 \cdot 10^{-3}$ А $= 3,16 \cdot 10^6$ ед. СГСЭ

Электрический дипольный момент

Кулон-метр (единица СИ) Кл · м $= 2,9979 \cdot 10^{11}$ ед. СГСЭ $= 10$ ед. СГСМ
 Дипольный момент ядра и электрона на расстоянии первой боровской орбиты
 $= 0,8478 \cdot 10^{-29}$ Кл · м
 $= 2,5416 \cdot 10^{-18}$ ед. СГСЭ

Магнитное поле

Ампер-виток на метр (единица СИ) $= 4\pi \cdot 10^{-3}$ эрстед [эрстед = ед. СГСМ]
 $= 3,767 \cdot 10^8$ ед. СГСЭ
 Гаусс (в вакууме) Гс $= 1\ Э = 79,58$ Ав/м
 Гамма $\gamma = 10^{-5}\ Э$
 Атомная единица ($m_e^{1/2} a_0^{-1/2} \tau_0^{-1}$) $= 1,715 \cdot 10^7$ Гс
 Поле у ядра, создаваемое электроном на первой боровской орбите $\alpha m_e^{1/2} a_0^{-1/2} \tau_0^{-1}$
 $= 1,251 \cdot 10^5\ Э$

Плотность магнитного потока, магнитная индукция

Тесла (единица СИ) $= 10^4$ Гс
 $= 1$ Вб/м²

Магнитный момент

Вебер-метр (единица СИ) $= (1/4\pi) \cdot 10^{10}$ ед. СГСМ
 $= 0,026\ 54$ ед. СГСЭ [ед. СГСМ = эрг/Гс]
 Атомная единица ($m_e^{1/2} a_0^{5/2} \tau_0^{-1}$) $= 2,542 \cdot 10^{18}$ эрг/Гс
 Магнетон Бора, магнитный момент электрона на первой боровской орбите $= \frac{1}{2} \alpha m_e^{1/2} a_0^{5/2} \tau_0^{-1}$
 $\mu_B = 0,9274 \cdot 10^{-20}$ эрг/Гс
 Ядерный магнетон $\mu_K = \mu_B m_e / m_p = 5,051 \cdot 10^{-24}$ эрг/Гс
 Магнитный момент Земли $= 7,98 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ

Радиоактивность

Кюри [4] Ки $= 3,700 \cdot 10^{10}$ распадов/с
 Рентген Р = доза облучения, при которой образуются
 $2,082 \cdot 10^9$ пар ионов в 0,001 293 г воздуха

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. **1**, § 11; **2**, § 12.
2. Metrication in Scientific Journals, Royal Society, 1968.
3. *Labs D., Neckel H., Z. Ap.*, **69**, 1 (1968).
4. *Abramowitz M., Stegun I. A.*, Handbook of Mathematical Functions, Dover, 1965, p. 8.
5. Communications de l'Institut de Poids et Mesures, Metrologia, **5**, 35 (1969).

§ 13. Соотношения между электрическими и магнитными единицами

В таблице на стр. 36, сравнивающей электрические и магнитные единицы, принято приближенное значение скорости света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. Если потребуется, каждый из трех множителей легко можно заменить более точным значением, соответствующим $c = 2,997\,925 \cdot 10^{10}$ см/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. **1**, § 12; **2**, § 13.
2. *Rayner G. H., Drake A. E.*, SI Units in Electricity and Magnetism (published from National Physical Laboratory, 1971).

Электрические и магнитные единицы

Величина и символ	Единица в системе СИ и символ		Ед. СГСЭ	Ед. СГСМ	Размерность													
					СГСЭ				СГСМ				СГСЭ	СИ				
					L	M	T	κ	L	M	T	μ	СГСЭ	L	M	T	I	
Заряд	Q	кулон	Кл	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	3/2	1/2	-1	1/2	1/2	1/2	0	-1/2	1/c	0	0	1	1
Ток	I	ампер	А	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	3/2	1/2	-2	1/2	1/2	1/2	-1	-1/2	1/c	0	0	0	1
Потенциал, э. д. с.	V	вольт	В	$(1/3) \cdot 10^{-2}$	10^8	1/2	1/2	-1	-1/2	3/2	1/2	-2	1/2	c	2	1	-3	-1
Напряженность электрического поля	\mathcal{E}	вольт/метр		$(1/3) \cdot 10^{-4}$	10^6	-1/2	1/2	-1	-1/2	1/2	1/2	-2	1/2	c	1	1	-3	-1
Сопротивление	R	ом	Ом	$(1/9) \cdot 10^{-11}$	10^9	-1	0	1	-1	1	0	-1	1	c ²	2	1	-3	-2
Удельное сопротивление	ρ	ом · метр		$(1/9) \cdot 10^{-9}$	10^{11}	0	0	1	-1	2	0	-1	1	c ²	3	1	-3	-2
Проводимость	G	сименс, ом ⁻¹	См	$9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}	1	0	-1	1	-1	0	1	-1	1/c ²	-2	-1	3	2
Удельная проводимость	σ	ом ⁻¹ /метр		$9 \cdot 10^9$	10^{-11}	0	0	-1	1	-2	0	1	-1	1/c ²	-3	-1	3	2
Емкость	C	фарада	Ф	$[9 \cdot 10^{11} \text{ см}]$	10^{-9}	1	0	0	1	-1	0	2	-1	1/c ²	-2	-1	4	2
Поток электрического смещения	Ψ	кулон	Кл	$12\pi \cdot 10^9$	$4\pi \cdot 10^{-1}$	3/2	1/2	-1	1/2	1/2	1/2	0	-1/2	1/c	0	0	1	1
Плотность потока электрического смещения, электрическое смещение	D	кулон/метр ²		$12\pi \cdot 10^5$	$4\pi \cdot 10^{-5}$	-1/2	1/2	-1	1/2	-3/2	1/2	0	-1/2	1/c	-2	0	1	1
Поляризация	P	кулон/метр ²		$3 \cdot 10^5$	10^{-5}	-1/2	1/2	-1	1/2	-3/2	1/2	0	-1/2	1/c	-2	0	1	1
Электрический дипольный момент		кулон/метр		$3 \cdot 10^{11}$	10	5/2	1/2	-1	1/2	3/2	1/2	0	-1/2	1/c	1	0	1	1
Диэлектрическая проницаемость, постоянная	ϵ	фарада/метр		$36\pi \cdot 10^9$	$4\pi \cdot 10^{-11}$	0	0	0	1	-2	0	2	-1	1/c ²	-3	-1	4	2
Диэлектрическая проницаемость вакуума	ϵ_0	$(1/36\pi) \cdot 10^{-9}$ Ф/м		1	$(1/9) \cdot 10^{-20}$									1/c ²				
Индуктивность	L	генри	Г	$(1/9) \cdot 10^{-11}$	$[10^9 \text{ см}]$	-1	0	2	-1	1	0	0	1	c ²	2	1	-2	-2
Магнитный заряд	m	вебер	Вб	$(1/12\pi) \cdot 10^{-2}$	$(1/4\pi) \cdot 10^8$	1/2	1/2	0	-1/2	3/2	1/2	-1	1/2	c	2	1	-2	-1
Магнитный поток	Φ	вебер	Вб	$(1/3) \cdot 10^{-2}$	$[10^8 \text{ Мккс}]$	1/2	1/2	0	-1/2	3/2	1/2	-1	1/2	c	2	1	-2	-1
Напряженность магнитного поля	\mathcal{H}	ампер-виток/метр		$12\pi \cdot 10^7$	$[4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э}]$	1/2	1/2	-2	1/2	-1/2	1/2	-1	-1/2	1/c	-1	0	0	1
Магнитодвижущая сила, магнитный потенциал	\mathcal{F}	ампер-виток		$12\pi \cdot 10^9$	$[4\pi \cdot 10^{-1} \text{ Гб}]$	3/2	1/2	-2	1/2	1/2	1/2	-1	-1/2	1/c	0	0	0	1
Магнитный дипольный момент	M	вебер · метр		1/12π	$(1/4\pi) \cdot 10^{10}$	3/2	1/2	0	-1/2	5/2	1/2	-1	1/2	c	3	1	-2	-1
Электромагнитный момент	m	ампер · метр ²			10^3	7/2	1/2	-2	1/2	5/2	1/2	-1	-1/2	1/c	2	0	0	1
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	B	тесла	Т	$(1/3) \cdot 10^{-6}$	$[10^4 \text{ Гс}]$	-3/2	1/2	0	-1/2	-1/2	1/2	-1	1/2	c	0	1	-2	-1
Интенсивность намагничивания	J	вебер/метр ²		$(1/12\pi) \cdot 10^6$	$(1/4\pi) \cdot 10^4$	-3/2	1/2	0	-1/2	-1/2	1/2	-1	1/2	c	0	1	-2	-1
Плотность магнитной энергии	$B \times \mathcal{H}$	джоуль/метр ³			$[40\pi \text{ Гс} \cdot \text{Э}]$	-1	1	-2	0	-1	1	-2	0	1	-1	1	-2	0
Магнитная проводимость	Λ	генри	Г	$(1/36\pi) \cdot 10^{-11}$	$[(1/4\pi) \cdot 10^9 \text{ Мкс/Гб}]$	-1	0	2	-1	1	0	0	1	c ²	2	1	-2	-2
Магнитное сопротивление		1/генри		$36\pi \cdot 10^{11}$	$[4\pi \cdot 10^{-9} \text{ Гб/Мкс}]$	1	0	-2	1	-1	0	0	-1	1/c ²	-2	-1	2	2
Магнитная проницаемость	μ	генри/метр		$(1/36\pi) \cdot 10^{-13}$	$(1/4\pi) \cdot 10^7$	-2	0	2	-1	0	0	0	1	c ²	1	1	-2	-2
Магнитная проницаемость вакуума	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м		$(1/9) \cdot 10^{-20}$	1									c ²				

ГЛАВА 3

АТОМЫ

§ 14. Элементы, их атомные веса и распространенность в космическом пространстве

Атомные веса даны в шкале $^{12}\text{C} = 12$.

Приведены логарифмы распространенности элементов по числу атомов и по массе, причем для водорода принято значение 12,00. Предполагается, что мы выражаем космическую распространенность, но за стандарт принята Солнечная система. Приведенные значения получены в основном из наблюдений атмосферы Солнца, дополнительные сведения о некоторых элементах дали исследования метеоритов и земной коры. О распространенности изотопов см. в [1, 9, 10].

Следующие относительные распространенности групп элементов получены из таблицы. Для водорода везде принято значение 100.

Группа элементов	Число атомов	Масса	Число со- рванных электронов
H	100	100	100
He	8,5	34	17
C, N, O, Ne	0,116	1,75	0,9
Металлы и др.	0,014	0,50	0,23
Всего	108,63	136,25	118,1

Относительное содержание по массе

$$\begin{aligned} \text{Водород} & X = 0,73 \\ \text{Гелий} & Y = 0,25 \\ \text{Прочие элементы} & Z = 0,017 \end{aligned}$$

Средний атомный вес космического вещества = 1,26

Средний атомный вес на 1 атом водорода = 1,36

Средний атомный вес полностью ионизованной космической плазмы
= 0,60

Элемент	Символ [2]	Атомный номер	Атомный вес [1-3]	Логарифм распространенности	
				по числу атомов	по массе
				[4, 5, 7]	
Водород	H	1	1,0080	12,00	12,00
Гелий [6]	He	2	4,0026	10,93	11,53
Литий	Li	3	6,941	0,7	1,6
Бериллий	Be	4	9,0122	1,1	2,0
Бор	B	5	10,811	< 3	< 4
Углерод	C	6	12,0111	8,52	9,60
Азот	N	7	14,0067	7,96	9,11
Кислород	O	8	15,9994	8,82	10,02
Фтор	F	9	18,9984	4,6	5,9
Неон	Ne	10	20,179	7,92	9,22
Натрий	Na	11	22,9898	6,25	7,61
Магний	Mg	12	24,305	7,42	8,81
Алюминий	Al	13	26,9815	6,39	7,78
Кремний	Si	14	28,086	7,52	8,97
Фосфор	P	15	30,9738	5,52	7,01

Продолжение

Элемент	Символ [2]	Атомный номер	Атомный вес [1–3]	Логарифм распространенности	
				по числу атомов	по массе [4, 5, 7]
Сера	S	16	32,06	7,20	8,71
Хлор	Cl	17	35,453	5,6	7,2
Аргон	Ar	18	39,948	6,8	8,4
Калий	K	19	39,102	4,95	6,54
Кальций	Ca	20	40,08	6,30	7,90
Скандий	Sc	21	44,956	3,22	4,87
Титан	Ti	22	47,90	5,13	6,81
Ванадий	V	23	50,9414	4,40	6,11
Хром	Cr	24	51,996	5,85	7,57
Марганец	Mn	25	54,9380	5,40	7,14
Железо	Fe	26	55,847	7,60	9,35
Кобальт	Co	27	58,9332	5,1	6,9
Никель	Ni	28	58,71	6,30	8,07
Медь	Cu	29	63,546	4,5	6,3
Цинк	Zn	30	65,37	4,2	6,0
Галлий	Ga	31	69,72	2,4	4,2
Германий	Ge	32	72,59	2,9	4,8
Мышьяк	As	33	74,9216	2,3	4,2
Селен	Se	34	78,96	3,2	5,1
Бром	Br	35	79,904	2,6	4,5
Криптон	Kr	36	83,80	3,2	5,1
Рубидий	Rb	37	85,4678	2,4	4,3
Стронций	Sr	38	87,62	2,85	4,79
Иттрий	Y	39	88,9059	1,8	3,8
Цирконий	Zr	40	91,22	2,5	4,5
Ниобий	Nb	41	92,906	2,0	4,0
Молибден	Mo	42	95,94	1,92	3,90
Технеций	Tc	43	98,906	–	–
Рутений	Ru	44	101,07	1,60	3,60
Родий	Rh	45	102,905	1,2	3,2
Палладий	Pd	46	106,4	1,45	3,48
Серебро	Ag	47	107,868	0,80	2,83
Кадмий	Cd	48	112,40	1,8	3,8
Индий	In	49	114,82	1,4	3,5
Олово	Sn	50	118,69	1,5	3,6
Сурьма	Sb	51	121,75	1,0	3,1
Теллур	Te	52	127,60	2,0	4,1
Иод	I	53	126,9045	1,4	3,5
Ксенон	Xe	54	131,30	2,0	4,1
Цезий	Cs	55	132,905	1,1	3,2
Барий	Ba	56	137,34	1,95	4,1
Лантан	La	57	138,906	1,6	3,7
Церий	Ce	58	140,12	1,80	3,95
Празеодим	Pr	59	140,908	1,40	3,55
Неодим	Nd	60	144,24	1,78	3,94
Прометий	Pm	61	146	–	–
Самарий	Sm	62	150,4	1,45	3,63
Европий	Eu	63	151,96	0,75	2,93
Гадолиний	Gd	64	157,25	1,08	3,28
Тербий	Tb	65	158,925	0,3	2,5
Диспрозий	Dy	66	162,50	1,08	3,29
Гольмий	Ho	67	164,930	0,5	2,7
Эрбий	Er	68	167,26	0,82	3,04
Туллий	Tm	69	168,934	0,3	2,5
Иттербий	Yb	70	170,04	1,2	3,4
Лютеций	Lu	71	174,97	0,6	2,8
Гафний	Hf	72	178,49	0,8	3,0
Тантал	Ta	73	180,948	0,3	2,6
Вольфрам	W	74	183,85	1,0	3,3
Рений	Re	75	186,2	0,0	2,3

Продолжение

Элемент	Символ [2]	Атомный номер	Атомный вес [1-3]	Логарифм распространенности	
				по числу атомов [4, 5, 7]	по массе
Осмий	Os	76	190,2	0,9	3,2
Иридий	Ir	77	192,2	0,8	3,1
Платина	Pt	78	195,09	1,9	4,2
Золото	Au	79	196,967	0,60	2,89
Ртуть	Hg	80	200,59	0,9	3,2
Таллий	Tl	81	204,37	0,2	2,5
Свинец	Pb	82	207,19	1,78	4,10
Висмут	Bi	83	208,981	0,7	3,0
Полоний	Po	84	210	–	–
Астат	At	85	210	–	–
Радон	Rn	86	222	–	–
Франций	Fr	87	223	–	–
Радий	Ra	88	226,025	–	–
Актиний	Ac	89	227	–	–
Торий	Th	90	232,038	0,7	3,1
Протактиний	Pa	91	230,040	–	–
Уран	U	92	238,029	0,0	2,4
Нептуний	Np	93	237,048	–	–
Плутоний	Pu	94	242	–	–
Америций	Am	95	242	–	–
Кюрий	Cm	96	245	–	–
Берклий	Bk	97	248	–	–
Калифорний	Cf	98	252	–	–
Эйнштейний	Es	99	253	–	–
Фермий	Fm	100	257	–	–
Менделевий	Md	101	257	–	–
Нобелий	No	102	255	–	–
Лоуренсий	Lr	103	256	–	–

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 13; 2, § 14.
2. IUPAC, Comptes Rendus XXV Conference, p. 95, 1969.
3. *McGlashan M. L.*, R. Inst. Chem., Mon. 15 for Teachers, p. 64, 1968.
4. *Hauge Ø., Engvold O.*, Inst. Theor. Astrophys., Blindern, Oslo, Rep. 31, 1970.
5. *Alter L. H.*, Proc. Astron. Soc. Australia, 1, 133 (1968).
6. *Danziger I. J.*, Ann. Rev. Astron. Ap., 8, 161 (1970).
7. *Briggs M. H.*, Adv. Space Sci. and Tech., 9, 197 (1967).
8. *Garz T.*, Astron. Ap., 10, 175 (1971).
9. *Strominger D., Hollander, Seaborg*, Rev. Mod. Phys., 30, 585 (1958).
10. *Bashkin S.*, Stellar Structure, ed. Aller and McLaughlin, Chicago, 1965, p. 1. (Русский перевод: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Адлера и Д. Б. Мак-Лафлина, изд-во «Мир», М., 1970).
11. *Blackwell D. E., Collins, Petford*, Sol. Phys., 23, 292 (1972).

§ 15. Возбуждение, ионизация и функция распределения

Число атомов на различных энергетических уровнях 0, 1, 2, ... при термодинамическом равновесии с температурой T дается распределением Больцмана

$$N_2/N_1 = (g_2/g_1) \exp(-\chi_{12}/kT),$$

$$N_2/N = (g_2/U) \exp(-\chi_{02}/kT).$$

В логарифмической форме

$$\lg(N_2/N_1) - \lg(g_2/g_1) - \chi_{12} (5040/T) [\chi_{12} \text{ в эВ}],$$

где N – полное число атомов в 1 см^3 , N_0, N_1, N_2 – числа атомов в 1 см^3 на нулевом и более высоких уровнях, g_0, g_1, g_2 – соответствующие статистические веса, χ_{12} – разность потенциалов между уровнями 1 и 2, U – функция распределения.

Степень ионизации в условиях термодинамического равновесия дается уравнением Саха

$$\frac{N_{Y+1}}{N_Y} P_e = \frac{U_{Y+1}}{U_Y} 2 \frac{(2\pi m)^{3/2} (kT)^{5/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{\chi_{Y,Y+1}}{kT}\right).$$

В логарифмической форме

$$\lg\left(\frac{N_{Y+1}}{N_Y} P_e\right) = -\chi_{Y,Y+1} \frac{5040}{T} + \frac{5}{2} \lg T - 0,4772 + \lg\left(\frac{2U_{Y+1}}{U_Y}\right)$$

или

$$\lg\left(\frac{N_{Y+1}}{N_Y} N_e\right) = -\chi_{Y,Y+1} \Theta - \frac{3}{2} \lg \Theta + 20,9366 + \lg\left(\frac{2U_{Y+1}}{U_Y}\right),$$

где N_Y и N_{Y+1} – числа атомов в 1 см^3 в Y - и $Y+1$ -й стадиях ионизации ($Y=1$ для нейтрального атома, $Y=2$ для однократно ионизованного атома и т. д.), N_e – число электронов в 1 см^3 , P_e – электронное давление в дин/см^2 , $\chi_{Y,Y+1}$ – потенциал ионизации от Y - и $Y+1$ -й стадии ионизации в эВ, $\Theta = 5040 \text{ K/T}$, U_Y и U_{Y+1} – функции распределения, множитель 2 изображает статистический вес электрона.

Степень ионизации в случае, когда ионизация происходит при столкновениях с электронами, а рекомбинация сопровождается излучением, определяется выражением

$$N_{Y+1}/N_Y = S/\alpha,$$

где S – коэффициент ионизации столкновением (такой, что $SN_e N_Y$ – скорость ионизации, см. § 18), α – коэффициент рекомбинации (такой, что $\alpha N_e N_{Y+1}$ – скорость рекомбинации, см. §38, 39).

Функцию распределения можно рассматривать как эффективный статистический вес атома или иона при данных условиях возбуждения. За исключением экстремальных условий, она приблизительно равна весу самого нижнего, основного терма. Поэтому приводится вес основного терма g_0 ; экстраполируя его вдоль изоэлектронных последовательностей, можно получить приближенное значение функции распределения для любого иона. Функции распределения, представленные в таблице в виде $\lg U$ для $\Theta = 1,0$ и $0,5$, не учитывают сгущения термов на границе каждой серии. Ветвь функции распределения, соответствующая этим термам с большими квантовыми числами n , зависит одновременно и от температуры T , и от электронного давления P_e . Этой ветвью обычно пренебрегают, если только рассматриваемый атом не очень сильно ионизован, тогда термы с большими n следует учитывать.

Функция распределения [1–3]

Элемент	Y = I			Y = II			Y = III
	g_0	$\lg U$		g_0	$\lg U$		g_0
		$\Theta = 1,0$	$\Theta = 0,5$		$\Theta = 1,0$	$\Theta = 0,5$	
1 H	2	0,30	0,30	1	0,00	0,00	–
2 He	1	0,00	0,00	2	0,30	0,30	1
3 Li	2	0,32	0,49	1	0,00	0,00	2
4 Be	1	0,01	0,13	2	0,30	0,30	1
5 B	6	0,78	0,78	1	0,00	0,00	2
6 C	9	0,97	1,00	6	0,78	0,78	1
7 N	4	0,61	0,66	9	0,95	0,97	6
8 O	9	0,94	0,97	4	0,60-	0,61	9
9 F	6	0,75	0,77	9	0,92	0,94	4
10 Ne	1	0,00	0,00	6	0,73	0,75	9

Продолжение

Элемент	Y = I			Y = II			Y = III
	g ₀	lg U		g ₀	lg U		g ₀
		Θ = 1,0	Θ = 0,5		Θ = 1,0	Θ = 0,5	
11 Na	2	0,31	0,60	1	0,00	0,00	6
12 Mg	1	0,01	0,15	2	0,31	0,31	1
13 Al	6	0,77	0,81	1	0,00	0,01	2
14 Si	9	0,98	1,04	6	0,76	0,77	1
15 P	4	0,65	0,79	9	0,91	0,94	6
16 S	9	0,91	0,94	4	0,62	0,72	9
17 Cl	6	0,72	0,75	9	0,89	0,92	4
18 Ar	1	0,00	0,00	6	0,69	0,71	9
19 K	2	0,34	0,60	1	0,00	0,00	6
20 Ca	1	0,07	0,55	2	0,34	0,54	1
21 Sc	10	1,08	1,49	15	1,36	1,52	10
22 Ti	21	1,48	1,88	28	1,75	1,92	21
23 V	28	1,62	2,03	25	1,64	1,89	28
24 Cr	7	1,02	1,51	6	0,86	1,22	25
25 Mn	6	0,81	1,16	7	0,89	1,13	6
26 Fe	25	1,43	1,74	30	1,63	1,80	25
27 Co	28	1,52	1,76	21	1,46	1,66	28
28 Ni	21	1,47	1,60	10	1,02	1,28	21
29 Cu	2	0,36	0,58	1	0,01	0,18	10
30 Zn	1	0,00	0,03	2	0,30	0,30	1
31 Ga	6	0,73	0,77	1	0,00	0,00	2
32 Ge	9	0,91	1,01	6	0,64	0,70	1
34 Se	9	0,83	0,89	4	–	–	9
36 Kr	1	0,00	0,00	6	0,62	0,66	9
37 Rb	2	0,36	0,7	1	0,00	0,00	6
38 Sr	1	0,10	0,70	2	0,34	0,53	1
39 Y	10	1,08	1,50	1 + 15	1,18	1,41	10
40 Zr	21	1,53	1,99	28	1,66	1,91	21
48 Cd	1	0,00	0,02	2	0,30	0,30	1
50 Sn	9	0,73	0,88	6	0,52	0,61	1
56 Ba	1	0,36	0,92	2	0,62	0,85	1
57 La	10	1,41	1,85	21	1,47	1,71	10
70 Yb	1	0,02	0,21	2	0,30	0,31	–
82 Pb	9	0,26	0,54	6	0,32	0,40	1

Уменьшение потенциала ионизации $\chi_{Y, Y+1}$ в уравнении Саха, учитывающее слияние спектральных линий, соответствующих высоким уровням [4], равно

$$\Delta\chi_{Y, Y+1} = 7,0 \cdot 10^{-7} N^{1/3} (Y)^{2/3},$$

где $\Delta\chi$ в эВ, N_e в см^{-3} и Y – заряд иона в $Y + 1$ -й степени ионизации.

lg P_g

lg P _e	Θ и T							
	Θ 0,1 T 50 400	0,2 25 200	0,4 12 600	0,6 8 400	0,8 6 300	1,0 5 040	1,2 4 200	1,4 3 600
–2	–1,9	–1,8	–1,70	–1,67	–1,54	+0,78	+2,0	+2,4
–1	–0,8	–0,74	–0,70	–0,66	–0,01	2,57	3,1	3,9
0	+0,27	+0,29	+0,31	+0,35	+1,90	3,9	4,5	5,3
1	1,27	1,30	1,33	1,47	3,87	5,2	6,0	6,7
2	2,27	2,30	2,34	2,98	5,65	6,7	7,7	8,5
3	3,28	3,30	3,35	4,87	7,0	8,3	9,4	10,4
4	4,28	4,31	4,43	6,84	8,7	10,0	11,2	12,4
5	5,59	5,30	5,87	8,66	10,4	11,8	13,2	14,4

Ионизационные потенциалы, эВ

Элемент	Стадия ионизации													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
1 Н	13,598													
2 He	<u>24,587</u>	54,416												
3 Li	5,392	<u>75,638</u>	122,451											
4 Be	<u>9,322</u>	18,211	<u>153,893</u>	217,713										
5 В	8,298	<u>25,155</u>	37,930	<u>259,366</u>	340,22									
6 С	11,260	24,383	<u>47,887</u>	64,492	<u>392,08</u>	489,98								
7 N	14,534	29,601	47,448	<u>77,472</u>	97,89	<u>552,06</u>	667,03							
8 O	13,618	35,117	54,934	77,413	<u>113,90</u>	138,12	<u>739,32</u>	871,39						
9 F	17,422	34,970	62,707	87,138	114,24	<u>157,16</u>	185,18	<u>953,89</u>	1103,1					
10 Ne	<u>21,564</u>	40,962	63,45	97,11	126,21	157,93	<u>207,26</u>	239,09	<u>1195,8</u>	1362,2				
11 Na	5,139	<u>47,286</u>	71,64	98,91	138,40	172,15	208,48	<u>264,19</u>	299,9	<u>1465,1</u>	1648,7			
12 Mg	<u>7,646</u>	15,035	<u>80,143</u>	109,31	141,27	186,51	224,95	265,92	<u>328,0</u>	367,5	<u>1761,8</u>	1963		
13 Al	5,986	<u>18,826</u>	28,448	<u>119,99</u>	153,75	190,47	241,44	284,59	330,2	<u>398,6</u>	442,0	<u>2086</u>	2304	
14 Si	8,151	16,345	<u>33,492</u>	45,141	<u>166,77</u>	205,08	246,49	303,16	351,1	401,4	476,1	523	<u>2438</u>	2673
15 P	10,486	19,725	30,18	<u>51,42</u>	65,02	<u>220,45</u>	263,28	309,37	371,7	424,4	479,5	561	612	<u>2817</u>
16 S	10,360	23,33	34,83	47,30	<u>72,68</u>	88,05	<u>280,01</u>	328,33	379,1	447,1	504,7	565	652	707
17 Cl	12,967	23,81	39,61	53,46	67,7	<u>97,03</u>	114,19	<u>348,37</u>	400,4	455,6	529,3	592	657	750
18 Ar	<u>15,759</u>	27,629	40,74	59,81	75,04	91,01	<u>124,4</u>	143,45	<u>422,6</u>	478,9	539,0	618	686	756
19 K	4,341	<u>31,63</u>	45,72	60,92	82,66	99,9	117,7	<u>154,98</u>	175,8	<u>503,6</u>	564,4	629	714	787
20 Ca	6,113	11,871	<u>50,91</u>	67,15	84,43	108,78	127,7	147,4	<u>188,7</u>	211,3	<u>591,6</u>	657	725	817
21 Sc	6,54	12,80	24,76	<u>73,7</u>	91,7	111,1	138,0	158,7	180,2	<u>225,4</u>	249,8	686	756	830
22 Ti	6,82	13,58	27,49	43,26	99,4	119,36	140,8	169,4	193,0	216,2	265,3	292	<u>788</u>	862
23 V	6,74	14,65	29,31	46,71	65,23	<u>128,6</u>	150,3	173,6	205,8	230,5	255,1	308	336	<u>896</u>
24 Cr	6,766	16,50	30,96	49,1	70,2	<u>90,57</u>	161,1	184,6	209,3	244,4	270,7	298	355	384
25 Mn	7,435	15,640	33,67	51,4	73,0	97	<u>119,27</u>	<u>196,47</u>	221,8	248,3	286,0	314	344	404
26 Fe	7,870	16,16	30,651	54,8	75,5	100	128,3	151,12	<u>235,0</u>	262,1	290,4	331	361	392
27 Co	7,86	17,06	33,50	51,3	79,5	103	131	160	186,2	<u>276,2</u>	305	336	379	411
28 Ni	<u>7,635</u>	18,168	35,17	54,9	75,5	108	134	164	193	224,6	<u>321</u>	352	384	430
29 Cu	7,726	<u>20,292</u>	36,83	55,2	79,9	103	139	167	199	232	266	<u>369</u>	401	435
30 Zn	9,394	<u>17,964</u>	<u>39,72</u>	59,4	82,6	108	136	175	203	238	274	<u>311</u>	412	454

Ионизационные потенциалы, эВ

Элемент	Стадия ионизации													
	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
1 H														
2 He														
3 Li														
4 Be														
5 B														
6 C														
7 N														
8 O														
9 F														
10 Ne														
11 Na														
12 Mg														
13 Al														
14 Si														
15 P	3 070													
16 S	<u>3 224</u>	3 494												
17 Cl	809	<u>3 658</u>	3 946											
18 Ar	855	918	<u>4 121</u>	4 426										
19 K	862	968	1 034	<u>4 611</u>	4 934									
20 Ca	895	974	1 087	1 157	<u>5 129</u>	5 470								
21 Sc	927	1 009	1 094	1 213	1 288	<u>5 675</u>	6 034							
22 Ti	941	1 044	1 131	1 221	1 346	1 425	<u>6 249</u>	6 626						
23 V	975	1 060	1 168	1 260	1 355	1 486	1 569	<u>6 851</u>	7 246					
24 Cr	<u>1 011</u>	1 097	1 185	1 299	1 396	1 496	1 634	1 721	<u>7 482</u>	7 895				
25 Mn	435	<u>1 136</u>	1 224	1 317	1 437	1 539	1 644	1 788	1 879	<u>8 141</u>	8 572			
26 Fe	457	489	<u>1 266</u>	1 358	1 456	1 582	1 689	1 799	1 950	2 045	<u>8 828</u>	9 278		
27 Co	444	512	547	<u>1 402</u>	1 500	1 602	1 734	1 846	1 962	2 119	2 218	<u>9 544</u>	10 030	
28 Ni	464	499	571	607	<u>1 546</u>	1 648	1 756	1 894	2 010	2 131	2 295	2 398	<u>10 280</u>	10 790
29 Cu	484	520	557	633	671	<u>1 698</u>	1 804	1 919	2 060	2 182	2 310	2 478	2 560	<u>11 050</u>
30 Zn	490	542	579	619	698	738	1 856	1 970	2 088	2 234	2 363	2 495	2 660	2 730

Ионизационные потенциалы, эВ

Элемент	Стадия ионизации									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
31 Ga	5,999	<u>20,51</u>	30,71	<u>64</u>	87	116	140	170	212	243
32 Ge	7,899	15,934	<u>34,22</u>	45,71	<u>93,5</u>	112	144	174	207	250
33 As	9,81	18,633	28,351	<u>50,13</u>	62,63	<u>127,6</u>	147	179	212	242
34 Se	9,752	21,19	30,820	42,944	<u>68,3</u>	81,7	<u>155,4</u>	184	218	250
35 Br	11,814	21,8	36	47,3	59,7	<u>88,6</u>	103,0	<u>192,8</u>	224	257
36 Kr	<u>13,999</u>	24,359	36,95	52,5	64,7	78,5	<u>111,0</u>	126	<u>230,9</u>	263
37 Rb	4,177	<u>27,28</u>	40	52,6	71,0	84,4	99,2	<u>136</u>	150	<u>277,1</u>
38 Sr	5,695	11,030	<u>43,6</u>	57	71,6	90,8	106	122,3	<u>162</u>	177
39 Y	6,38	12,24	20,52	<u>61,8</u>	77,0	93	116	129	146,2	<u>191</u>
40 Zr	6,84	13,13	22,99	34,34	<u>81,5</u>	99	117	140	155	
41 Nb	6,88	14,32	25,04	38,3	50,55	<u>102,6</u>	125	142	161	
42 Mo	7,099	16,15	27,16	46,4	61,2	68	<u>126,8</u>	153	163	
43 Tc	7,28	15,26	29,54	46	55	80			187	
44 Ru	7,37	16,76	28,47	50	60	92				
45 Rh	7,46	18,08	31,06	48	65	97				
46 Pd	<u>8,34</u>	19,43	32,92	53	62	90	110	130	155	180
47 Ag	7,576	<u>21,49</u>	34,83	56	68	89	115	140	160	185
48 Cd	<u>8,993</u>	16,908	<u>37,48</u>	59	72	94	115	145	170	195
49 In	5,786	<u>18,869</u>	28,03	<u>54,4</u>	77	98	120	145	180	205
50 Sn	7,344	14,632	<u>30,502</u>	40,734	<u>72,28</u>	103	125	150	175	210
51 Sb	8,641	16,53	25,3	<u>44,2</u>	56	<u>108</u>	130	155	185	210
52 Te	9,009	18,6	27,96	37,41	<u>58,75</u>	70,7	<u>137</u>	165	190	220
53 I	10,451	19,131	33	42	66	<u>81</u>	100	<u>170</u>	200	230
54 Xe	<u>12,130</u>	21,21	32,1	46	57	82	<u>100</u>	120	<u>210</u>	240
55 Cs	3,894	<u>25,1</u>	35	46	62	74	100	<u>120</u>	145	<u>250</u>
56 Ba	5,212	10,004		49	62	80	95	120	<u>145</u>	160
57 La	5,577	11,06	19,175	<u>52</u>	66	80	100	115	145	<u>165</u>
58 Ce	5,47	10,87	20,20	36,72	<u>70</u>	85	100	120	140	165
59 Pr	5,42	10,55	21,62	38,95	57,45	<u>89</u>	105	120	145	160
60 Nd	5,49	10,72					<u>110</u>	130	150	170
61 Pm	5,55	10,90						<u>135</u>	155	175

Степень ионизации вещества звездных атмосфер дается таблицей на стр. 41, связывающей газовое давление P_g , электронное давление P_e и температуру T . Приведенные данные представляют собой среднее между значениями, соответствующими высокому [5] и низкому [6] содержанию металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 15; **2**, § 16.
2. *Cayrel R., Jugaku J.*, Ann. d'Ap., **26**, 495 (1963).
3. *Bolton C. T.*, Ap. J., **161**, 1187 (1970).
4. *Lochte-Holtgreven W.*, Rep. Prog. Phys., **21**, 312 (1958).
5. *Rosa A.*, Z. Ap., **25**, 1 (1948).
6. *Alter L. H.*, Stellar Atmospheres, ed. Greenstein, Chicago, 1961, p. 232. (Русский перевод: Звездные атмосферы, под ред. Дж. Гринштейна, ИЛ, М., 1963.)

§ 16. Ионизационные потенциалы

В таблицах (стр. 42–45) приводится энергия в эВ, необходимая для ионизации каждого элемента до следующей стадии ионизации. I ($Y = 1$) – нейтральный атом, II – однократно ионизованный атом и т. д. Тонкие и толстые линейки отделяют в таблице данные для оболочек и подоболочек и облегчают интерполяцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 16; **2**, § 16.
2. *Lotz W.*, Ionisierungsenergien von Ionen H bis Ni, Inst. Plasmaphys., München, 1966.
3. *Moore C. E.*, Ionization Potentials, NSRDS-NBS 34, Washington, 1970.
4. *Finkelnberg W., Humbach W.*, Naturwiss., **42**, 35 (1955).

§ 17. Электронное сродство

Электронное сродство положительно для атомов и молекул, образующих устойчивый отрицательный ион. Существует второе устойчивое состояние для H^- [2].

Атом	Электронное сродство, эВ	Атом	Электронное сродство, эВ	Молекула	Электронное сродство, эВ
H^-	+0,754	Ne^-	-0,7	O_2^-	+0,6
H^- [2]	+0,29	Na^-	+0,5	O_3^-	+2,9
He^-	-0,3	Mg^-	-0,4	OH^-	+1,9
Li^-	+0,65	Al^-	+0,7	SH^-	+2,6
Be^-	-0,4	Si^-	+1,42	C_2^-	+3,4
B^-	+0,38	P^-	+1,0	C_3^-	+2,2
C^-	+1,24	S^-	+2,3	CN^-	+3,3
N^-	-0,2	Cl^-	+3,62	NH_2^-	+1,2
O^-	+1,46	Br^-	+3,48	NO^-	+0,9
O^{--}	-6,7	I^-	+3,17	NO_2^-	+3,1
F^-	+3,47			NO_3^-	+3,9
				CH^-	+1,6

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 17; **2**, § 17.
2. *Hyleraas E.*, Ap. J., **111**, 209 (1950).
3. *Kaufman M.*, Ap. J., **137**, 1296 (1963).
4. *Branscomb L. M.*, Atomic and Molecular Processes, ed. Bates, Academic Press, 1962, p. 100. (Русский перевод: Атомные и молекулярные процессы, под ред. Д. Бейтса, изд-во «Мир», М., 1964.)
5. *Moiseiwitsch B. L.*, Adv. Atom, Mol, Phys., **1**, 61 (1965).

§ 18. Эффективное сечение атомов для электронных столкновений

- Q – эффективное сечение атома ($= Q(v)$)
 v – скорость электрона до столкновения
 πa_0^2 – атомная единица эффективного сечения, равная $8,797 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$
 N_e, N_a, N_i – электронная, атомная и ионная концентрации (в см^{-3})
 $L = vQ$ – частота соударений для каждого атома на единицу N_e
 $N_e L$ – частота соударений для одного атома (или иона)
 $N_e N_a L$ – частота соударений в 1 см^3
 P_c – число соударений, испытываемых электроном на пути 1 см при 0°C и давлении 1 мм рт. ст.; тогда $Q = 2,828 \cdot 10^{-17} P_c = 0,3215 \pi a_0^2 P_c$

Эффективное сечение ионизации

Классическое эффективное сечение атома для ионизации электронами [2]:

$$Q_1 = 4\pi n a_0^2 \frac{1}{\chi \varepsilon} \left(1 - \frac{\chi}{\varepsilon}\right),$$

где χ – энергия ионизации в ридбергах, ε – энергия электрона до столкновения в ридбергах, n – число оптических электронов.

Общее приближение для эффективного сечения атомов при ионизации электронами [1, 2, 4]:

$$Q_i = \pi n a_0^2 \frac{1}{\chi \varepsilon} F\left(Y, \frac{\varepsilon}{\chi}\right) = \frac{\pi n a_0^2}{\chi^2} q = 1,63 \cdot 10^{-14} n \left(\frac{1}{\chi_{ЭВ}^2}\right) \left(\frac{\chi}{\varepsilon}\right) F\left(Y, \frac{\varepsilon}{\chi}\right),$$

где Y – заряд ионизованного атома или следующая стадия ионизации, $\chi_{ЭВ}$ – энергия ионизации в ЭВ. Значения функции $F(Y, \varepsilon/\chi)$, а также величины $q = (\chi/\varepsilon) F(Y, \varepsilon/\chi)$ которую иногда называют приведенным эффективным сечением, даны в таблице. Значения для $Y=1$ и $Y=2$ определены экспериментально, а для $Y=\infty$ вычислены. Для водородных ионов можно ожидать точность около $\pm 10\%$. В других случаях точность, по-видимому, равна $\pm 0,3$ dex.

$F(Y, \varepsilon/\chi)$ и $q(Y, \varepsilon/\chi)$

ε/χ	1,0	1,2	1,5	2,0	3	5	10
F (классическая) $= 4(1 - \chi/\varepsilon)$	0,00	0,67	1,33	2,00	2,67	3,20	3,60
$F(1, \varepsilon/\chi)$	0,00	0,31	0,78	1,60	2,9	4,6	6,4
$F(2, \varepsilon/\chi)$	0,00	0,53	1,17	2,02	3,3	4,7	6,4
$F(\infty, \varepsilon/\chi)$	0,00	0,74	1,54	2,56	3,8	5,0	6,4
q (классическая) $= 4(\chi/\varepsilon)(1 - \chi/\varepsilon)$	0,00	0,56	0,89	1,00	0,89	0,64	0,36
$q(1, \varepsilon/\chi)$	0,00	0,26	0,52	0,80	0,97	0,92	0,64
$q(2, \varepsilon/\chi)$	0,00	0,44	0,78	1,01	1,09	0,94	0,64
$q(\infty, \varepsilon/\chi)$	0,00	0,62	1,03	1,28	1,28	1,00	0,64

Были предложены и другие эмпирические формы [8, 9, 22].

Максимальное эффективное сечение ионизации

Классический случай: $Q_{\max} = \pi n a_0^2 \chi^{-2}$ при $\varepsilon = 2\chi$.

Значение Q_{\max} приблизительно такое же в реальных случаях, но максимум бывает вблизи $\varepsilon = 4\chi$.

Скорость ионизации электронами $L_i = v\bar{Q}_i$ [1,2]

Приближение для нейтрального атома ($kT <$ энергии ионизации):

$$L_i = 1,1 \cdot 10^{-8} n T^{1/2} \chi_{ЭВ}^{-2} \cdot 10^{-5040 \chi_{ЭВ}/T} \text{ см}^3/\text{с}$$

Приближение для коронального иона ($kT <$ энергии ионизации):

$$L_i = 2,1 \cdot 10^{-8} n T^{1/2} \chi_{ЭВ}^{-2} \cdot 10^{-5040 \chi_{ЭВ}/T} \text{ см}^3/\text{с}$$

Эффективное сечение возбуждения (разрешенные переходы)

Приближение, для Q_{ex} – эффективного сечения возбуждения атома [2, 5]. Это приближение довольно хорошо применимо, когда $\Delta n \geq 1$ (обозначение из § 23). Для $\Delta n \geq 0$ приближенное значение меньше.

$$\begin{aligned} Q_{\text{ex}} &= \frac{8\pi}{\sqrt{3}} \pi a_0^2 \frac{f}{\varepsilon W} b \\ &= 1740 \pi a_0^2 \lambda^2 \left(\frac{W}{\varepsilon} \right) f b \\ &= 1,28 \cdot 10^{-15} \left(\frac{f}{\varepsilon W} \right) b \text{ см}^2, \end{aligned}$$

где f – сила осциллятора, W – энергия возбуждения в ридбергах (равная $0,0912/\lambda$, где λ в мкм), ε – энергия электрона перед столкновением также в ридбергах.

Числовые множители b и bW/ε

ε/W	1,0	1,2	1,5	2,0	3	5	10	30	100
b , нейтральные атомы	0,00	0,03	0,06	0,11	0,21	0,33	0,56	0,98	1,33
b , ионы	0,20	0,20	0,20	0,20	0,24	0,33	0,56	0,98	1,33
bW/ε , нейтральные атомы	0,00	0,03	0,04	0,06	0,07	0,07	0,06	0,03	0,01
bW/ε , ионы	0,20	0,17	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06	0,03	0,01

Максимальное эффективное сечение возбуждения

Приближение для нейтрального атома:

$$Q_{\text{max}} = 125 \pi a_0^2 \lambda^2 f, \text{ вблизи } \varepsilon = 3W.$$

Приближение для иона:

$$Q_{\text{max}} = 350 \pi a_0^2 \lambda^2 f, \text{ вблизи } \varepsilon = W \text{ } [\lambda \text{ в мкм}].$$

Скорость возбуждения [1, 5]:

$$L = \overline{\nu Q_{\text{ex}}} = 17,0 \cdot 10^{-4} \frac{f}{T^{1/2} W_{\text{эВ}}} \cdot 10^{-5040 W_{\text{эВ}}/T} P (W/kT),$$

где $W_{\text{эВ}}$ и W – энергия возбуждения в эВ и в эргах ($11600 W_{\text{эВ}}/kT = W/kT$), $P (W/kT)$ табулирована.

W/kT	$P (W/kT)$ [5]	
	нейтральные атомы	ионы
< 0,01	0,29 $E_1 (W/kT)$	
0,01	1,16	1,16
0,02	0,96	0,98
0,05	0,70	0,74
0,1	0,49	0,55
0,2	0,33	0,40
0,5	0,17	0,26
1	0,10	0,22
2	0,063	0,21
5	0,035	0,20
10	0,023	0,20
>10	$0,066/(W/kT)^{1/2}$	0,20

$E_1 ()$ – первый экспоненциальный интеграл.

Табулированная функция $P (W/kT)$ становится слишком малой, если полное квантовое число (§ 23) не меняется.

Приведенные приближения по возможности следует заменять квантовыми вычислениями [2, 3, 6, 16]. Приближение Кулона для ионов [15] дает $b = g_{\text{eff}} (2L + 1)/g_1$ [L определено в § 23]. Табличные значения g_{eff} , эффективного множителя Гаунта, изменяются от 0,5 до 0,9.

Эффективное сечение для столкновений второго рода (деактивация)

Эффективное сечение деактивации Q_{21} связано с сечением возбуждения Q_{12} (2 – верхний уровень) соотношением

$$g_2 \varepsilon_2 Q_{21} = g_1 \varepsilon_1 Q_{12},$$

где $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + W$, а g_2 и g_1 – статистические веса.

Скорость деактивации L_{21} и скорость возбуждения L_{21} связаны соотношением

$$g_2 L_{21} = g_1 L_{12} \exp(W/kT).$$

Эффективное сечение возбуждения (запрещенные переходы)

Сила столкновения Ω для каждой линии определяется из равенств [4, 12]

$$Q_f = \pi \Omega / g_1 k_v^2 = \pi a_0^2 \Omega / g_1 \varepsilon = \frac{h^2}{4\pi m^2} \frac{\Omega}{g_1 v^2} = 4,21 \Omega / g_1 v^2,$$

где $k_v/2\pi$ – волновое число налетающего электрона (тогда k_v^2 в атомных единицах равно ε в ридбергах), v – скорость электрона, g_1 – статистический вес исходного (нижнего) уровня, Q_f – эффективное сечение для запрещенной линии атомов, находящихся на этом уровне. Тогда Ω_{12} (возбуждение) = Ω_{21} (деактивация).

В настоящее время силы столкновений используются для описания и разрешенных, и запрещенных линий.

Для нейтральных атомов Ω меняется от 0 для порога возбуждения ($\varepsilon = W$) до максимума вблизи $\varepsilon - W \approx 1$ ридберг.

Для ионов Ω обычно имеет конечное значение для порога возбуждения и слабо увеличивается с увеличением $\varepsilon - W$.

Силы столкновений имеют следующие порядки величин:

Запрещенные переходы.	Низкая ионизация	$\Omega \approx 1$
	Высокая ионизация	$\Omega \approx 0,1$
Разрешенные переходы.	Низкая ионизация	$\Omega \approx 10$
	Высокая ионизация	$\Omega \approx 1$

Изменение Ω вдоль изоэлектронной последовательности (приближенно)

$$\Omega \propto Z^{-2} \quad [Z - \text{атомный номер}]$$

Значения Ω [17]

Атом или ион	$\lambda, \text{\AA}$	Переход	g_1	g_2	Ω	Ссылки
N II	6548↔83	$^3P - ^1D$	9	5	2,5	[10]
O I ($\varepsilon - W \approx 1$)	5577	$^1D - ^1S$	5	1	0,4	[10]
	6300↔63	$^3P - ^1D$	9	5	2,2	[10]
O II	3726↔29	$^4S - ^2D$	4	10	1,4	[10]
O III	4959↔5007	$^3P - ^1D$	9	5	2,0	[10]
Si VIII	1446	$^4S - ^2D$	4	4	0,16	[19]
Si IX	2149	$^3P - ^1D$	5	5	0,28	[19]
Fe X	1985	$^3P - ^1D$	3	5	0,17	[19]
	6374	$^2P - ^2P$	4	2	0,32	[18]
Fe XI	3987	$^3P - ^1D$	3	5	0,08	[21]
	7891	$^3P - ^3P$	3	5	0,36	[18]
Fe XII	1476	$^3P - ^1S$	3	1	0,01	[21]
	1242	$^4S - ^2P$	4	4	0,032	[20]
	1349	$^4S - ^2P$	4	2	0,016	[20]
Fe XIV	2169	$^4S - ^2D$	4	6	0,095	[20]
	5303	$^2P - ^2P$	2	4	0,25	[18]

Полное эффективное сечение атома для соударений (упругих и неупругих) [13]

Приближение для полного эффективного сечения [1]:

$$Q \approx 180\pi a_0^2 \lambda / \varepsilon^{1/2} \quad [\lambda \text{ в мкм, } \varepsilon \text{ в ридбергах}],$$

где λ – длина волны самой сильной линии, соответствующей переходу на нижний уровень.

Эффективное сечение ионных столкновений [7]

Эффективное сечение отклонения в результате столкновения по крайней мере на прямой угол

$$\begin{aligned} Q_{\perp} &= \pi (Y-1)^2 (e^2/mv^2)^2 = \pi (Y-1)^2 (e^2/2\varepsilon hcR)^2 \\ &= \pi a_0^2 (Y-1)^2 / \varepsilon^2 \quad [\varepsilon \text{ в ридбергах}], \end{aligned}$$

где $Y-1$ – заряд иона.

Эффективное сечение ионных столкновений обычно связано с более далекими столкновениями, вызывающими отклонения, много меньшие, чем на прямой угол. Из-за этого эффективное сечение Q растет с коэффициентом, который зависит логарифмически от наиболее далеких столкновений, входящих в интегрирование, а также от окружающей среды. Этот коэффициент обычно меняется от 10 до 50 (§ 22). Общее приближение имеет вид

$$Q \text{ (эффективное)} \approx 20\pi a_0^2 (Y-1)^2 / \varepsilon^2.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 18; **2**, § 18.
2. Bely O., Van Regemorter H., Ann. Rev. Astron. Ap. **8**, 329 (1970).
3. Moiseiwitsch B. L., Smith S. L., Rev. Mod. Phys., **40**, 238 (1968).
4. Seaton M. J., Atomic and Molecular Processes, ed. Bates, Academic Press, 1962, p. 375. (Русский перевод: Атомные и молекулярные процессы, под ред. Д. Бейтса, изд-во «Мир», М., 1964.)
5. Van Regemorter H., Ap. J., **136**, 906 (1962).
6. Seaton M. J., Trans. I. A. U., XIV A, p. 128 (1970), со ссылками на последние работы.
7. Spitzer L., Physics of fully ionized Gases, Interscience, 1956. (Русский перевод 1-го изд.: Спитцер Л., Физика полностью ионизованного газа, ИЛ, М., 1957.)
8. Lotz W., Ap. J. Suppl., **14**, 207 (1967).
9. Sampson D. H., Ap. J., **155**, 575 (1969).
10. Seaton M. J., Adv. Atom. Mol. Phys., **4**, 331 (1968).
11. Seaton M. J., Planetary Nebulae, I. A. U. Symp., **34**, 129 (1968).
12. Hebb M. H., Menzel D. H., Ap. J., **92**, 408 (1940).
13. Bederson B., Kieffer L. J., Rev. Mod. Phys., **43**, 601 (1971).
14. Flower D. R., J. Phys. B., **4**, 697 (1971).
15. Blaha M., Ap. J., **157**, 473 (1969).
16. Kieffer L. J., JILA Rep. 7, Boulder, 1969.
17. Carole Jordan, благодарность за сбор данных.
18. Blaha M., Astron. Ap., **1**, 42 (1969).
19. Saraph H. E. et al., Phil. Trans. Roy. Soc., **A264**, 77 (1969).
20. Czyzak S. J. et al., M. N., **148**, 361 (1970).
21. Czyzak S. J. et al., Proc. Phys. Soc., **92**, 1146 (1967).
22. Bely O., Faucher P., Astron. Ap., **18**, 487 (1972).

§ 19. Атомные радиусы

Атомные радиусы определяются по тесноте сближения в структуре молекул и кристаллов. Полученный таким способом радиус r приблизительно соответствует радиусу максимума радиальной плотности в распределении заряда нейтральных атомов. Для ионов соответствующий радиус измеряется до точки, где радиальная плотность падает до 10% от своего максимального значения. Масса атома, заключенная в атомном объеме $(4/3)\pi r^3$, дает плотность наиболее компактных тел. Величина $2r$ приблизительно равна газо-кинетическому диаметру одноатомных молекул. (См. табл. на стр. 51)

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 19; **2**, § 19.
2. Meggers W. F., ed., Chart of the Atoms, Welch Sci. Co., Chicago, 1959.
3. Handbook of Chem. and Phys., 44 ed., Chem. Rubber Pub. Co., 1963, p. 3507.
4. d'Ans J., Lax E., Taschenbuch für Chem. und Phys., Springer, 1949, p. 183.

Атомные радиусы

Атом	$r, \text{Å}$	Ион [3]	$r, \text{Å}$	Атом	$r, \text{Å}$	Ион [3]	$r, \text{Å}$	Атом	$r, \text{Å}$	Ион [3]	$r, \text{Å}$
H	0,7	H ⁻	1,8	S	1,1	S ²⁻	1,91	Br	1,2	Br ⁻	1,97
He	1,2			Cl	1,0	Cl ⁻	1,80	Kr	1,82		
Li	1,58	Li ⁺	0,68	Ar	1,6			Rb	2,8	Rb ⁺	1,50
Be	1,09	Be ²⁺	0,39	K	2,6	K ⁺	1,32	Sr	2,3	Sr ²⁺	1,22
B	0,9		0,28	Ca	2,1	Ca ²⁺	1,04	Ag	1,6	Ag ⁺	1,23
C	0,75	C ⁴⁺	0,22	Sc	1,8	Sc ³⁺	0,88	Cd	1,6	Cd ²⁺	1,01
N	0,7	N ³⁻	1,92	Ti	1,6	Ti ⁴⁺	0,74	Sn	1,52	Sn ⁴⁺	0,76
O	0,6	O ²⁻	1,40	V	1,5	V ⁵⁺	0,61	I	1,4	I ⁻	2,21
F	0,3	F ⁻	1,31	Cr	1,4			Xe	2,05		
Ne	1,3			Mn	1,4	Mn ²⁺	0,84	Cs	3,1	Cs ⁺	1,71
Na	1,95	Na ⁺	0,95	Fe	1,3	Fe ²⁺	0,77	Ba	2,5	Ba ²⁺	1,42
Mg	1,58	Mg ²⁺	0,72	Co	1,3	Co ²⁺	0,75	Pt	1,6		
Al	1,39	Al ³⁺	0,58	Ni	1,2	Ni ²⁺	0,72	Au	1,6	Au ⁺	1,37
Si	1,21	Si ⁴⁺	0,47	Cu	1,3	Cu ⁺	0,96	Hg	1,6	Hg ²⁺	1,14
P	1,2	P ³⁻	2,3	Zn	1,4	Zn ²⁺	0,77				

§ 20. Частицы современной физики

I – изотопический спин, J – спин, P – четность
 Время жизни – время жизни в вакууме
 Распад – основные продукты распада
 К адронам относятся мезоны, нуклоны и барионы

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 20; 2, § 20.
2. Barbaro-Galtieri A. et al., Rev. Mod. Phys., 42, 87 (1970).

Частицы современной физики

Название	Символ	Заряд	Масса а. е. м.	I	J^P	Время жизни, с	Распад
Бозоны							
Фотон	γ	0	0,000	0,1	1^-	∞	–
<i>Мезоны</i>							
π -мезон (пион)	π^+, π^-	+1, -1	0,149 84	1	0^-	$2,603 \cdot 10^{-8}$	$\mu\nu$
	π^0	0	0,144 90		0^-	$0,89 \cdot 10^{-16}$	$\gamma\gamma$
K-мезон (кайон)	K^+, K^-	+1, -1	0,530 15		0^-	$1,235 \cdot 10^{-8}$	$\mu\nu, \pi\pi^0$
	K_S^0	0	0,534 38	$\frac{1}{2}$	0^-	$0,862 \cdot 10^{-10}$	$\pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0$
	K_L^0	0	0,534 38	$\frac{1}{2}$	0^-	$5,38 \cdot 10^{-8}$	$\text{пев}, \pi\nu, 3\pi^0$
Фермионы							
<i>Лептоны</i>							
Нейтрино	$\nu\bar{\nu}$	0	$< 10^{-6}$		$\frac{1}{2}$	∞	
Электрон, позитрон	e	-1, +1	0,000 548 6		$\frac{1}{2}$	∞	
μ -мезон (мюон)	μ	-1, +1	0,113 4		$\frac{1}{2}$	$2,198 \cdot 10^{-6}$	$e\nu\bar{\nu}$
<i>Нуклоны</i>							
Протон	p	+1, -1	1,007 275	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	∞	
Нейтрон	n	0	1,008 664	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	$0,932 \cdot 10^3$	$p e^- \nu$
<i>Барионы</i>							
Λ -гиперон	Λ	0	1,197 6	0	$\frac{1}{2}^+$	$2,51 \cdot 10^{-10}$	$p\pi^-, n\pi^0$
Σ^+ -гиперон	Σ^+	+1, -1	1,277	1	$\frac{1}{2}^+$	$0,80 \cdot 10^{-10}$	$p\pi^0, n\pi^+$
Σ^0 -гиперон	Σ^0	0	1,280	1	$\frac{1}{2}^+$	$< 10^{-14}$	$\Lambda\gamma$
Σ^- -гиперон	Σ^-	-1, +1	1,285	1	$\frac{1}{2}^+$	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$n\pi^-$
Ξ^0 -гиперон	Ξ^0	0	1,410	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	$3,03 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^0$
Ξ^- -гиперон	Ξ^-	-1, +1	1,417	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	$1,66 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^-$
Составные частицы							
Водород ($^2S_{1/2}$)	^1H	0	1,007 82			∞	
Дейтерий ($^2S_{1/2}$)	^2H	0	2,014 10			∞	
Дейтрон	D	+1	2,013 55			∞	
α -частица	α	+2	4,001 40			∞	

§ 21. Молекулы

- N_A, N_B, N_{AB} – числа атомов А, В и молекул АВ в 1 см^3
 $m_{AB} = m_A m_B / (m_A + m_B)$ – приведенная масса
 r_0 – межъядерное расстояние (самое низкое состояние)
 D_0 – энергия диссоциации (самое низкое состояние)
 g_0 – электронный статистический вес (самое низкое состояние)
 = мультиплетность = $(2S + 1)$ для Σ -состояний
 = $2(2S + 1)$ для других состояний
 $\sigma = 1$ для гетероциклических молекул
 = 2 для гомоциклических молекул
 ν – колебательное квантовое число
 B_e, α_e – постоянные вращения [2, 3]
 $\Delta E = hcB = h^2/8\pi^2 I = h^2/8\pi^2 m_{AB} r_e^2$
 $\omega_e, \omega_e x_e$ – колебательные постоянные
 $I. P.$ – ионизационный потенциал
 U_A, U_B – атомные функции распределения [§ 15]
 $Q_{AB} = Q_{\text{rot}} \cdot Q_{\text{vib}} \cdot Q_{\text{el}}$ – молекулярная функция распределения, каждый член безразмерный
 I – момент инерции = $m_{AB} r_e^2$

Двухатомные молекулы [1, 2, 6–8]

Молекула	g_0	σ	D_0 , эВ	m_{AB} , а. е. м.	B_e , см^{-1}	α_e , см^{-1}	ω_e , см^{-1}	$\omega_e x_e$, см^{-1}	r_0 , Å	I. P., эВ
H ₂	1	2	4,477	0,504	60,81	2,99	4395	117	0,742	15,43
H ₂ ⁺	4	2	2,647	0,504						
He ₂	1	2	0,001	2,002	7,7	0,16	1800	40	1,041	22
BH	1	1	3,4	0,923	12,02	0,41	2366	49	1,232	10
BO	2	1	7,4	6,452	1,78	0,02	1886	11,8	1,205	7,0
C ₂	1	2	6,2	6,003	1,82	0,02	1854	13,3	1,302	12,0
CH	4	1	3,47	0,930	14,45	0,53	2860	64	1,120	10,64
CH ⁺	1	1	3,8	0,930	14,2	0,49	2739		1,131	
CO	1	1	11,09	6,859	1,93	0,02	2170	13,5	1,128	14,01
CO ⁺	2	1	8,3	6,859	1,98	0,02	2214	15,2	1,115	27,9
CN	2	1	7,8	6,465	1,90	0,02	2164	13,1	1,172	14
N ₂	1	2	9,758	7,004	2,00	0,02	2359	14,3	1,094	15,58
N ₂ ⁺	2	2	8,72	7,003	1,93	0,02	2207	16,1	1,116	
NH	3	1	3,76	0,940	16,66	0,64	3200	100	1,038	13,10
NO	4	1	6,505	7,469	1,70	0,02	1904	14,0	1,151	9,25
O ₂	3	2	5,115	8,000	1,45	0,02	1580	12,1	1,207	12,08
O ₂ ⁺	4	2	6,6	8,000	1,67	0,02	1876	16,5	1,123	
OH	4	1	4,39	0,984	18,87	0,71	3734	82,7	0,971	13,36
OH ⁺	3	1	4,6	0,984	16,79	0,73	2955		1,029	
MgH	2	1	2,3	0,968	5,82	0,17	1496	31,5	1,731	
AlH	1	1	2,9	0,972	6,40	0,19	1683	29,1	1,646	
AlO	2	1	3,8	10,044	0,64	0,01	978	7,1	1,618	9,5
SiH	4	1	3,2	0,973	7,49	0,21	2080		1,520	8,5
SiO	1	1	7,8	10,193	0,73	0,01	1242	6,0	1,510	10,51
SiN	2	1	4,5	9,346	0,73	0,01	1152	6,6	1,572	
SO	3	1	5,35	10,673	0,71	0,01	1124	6,1	1,493	12,1
CaH	2	1	1,5	0,983	4,28	0,10	1299	19,5	2,002	
CaO	1	1	4,5	11,435			650	6,6		
ScO	2	1	6,0	11,80			972	3,9		
TiO	6	1	6,8	11,996	0,54	0,00	1008	4,3	1,620	
VO	4	1	6,4	12,176	0,39	0,00	1013	4,9	1,890	
CrO		1	5,3	12,236			899	6,5		8,2
FeO		1	4,4	12,437			880	5		
YO	2	1	9	13,56			852	2,4		
ZrO	6	1	7,8	13,61	0,62	0,01	937	3,4	1,416	
LaO	2	1	8,2	14,347			812	2,2		4,8

$$\begin{aligned}
 \text{Диаметры молекул (двухатомных)} & \approx 3r_0 \approx 3,4\text{Å} \\
 \text{Диссоциация молекул} & N_A N_B / N_{AB} = 3,261\,633 \text{ св. года} \\
 \text{В логарифмической форме} & \lg(N_A N_B / N_{AB}) = 20,2735 + 3/2 \lg m_{AB} + \\
 & + \frac{3}{2} \lg T - 5040D/T + \lg(U_A U_B / Q_{AB}),
 \end{aligned}$$

где m в а. е. м., D в эВ, N в см^{-3} .

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{rot}} &= \frac{kT}{\sigma h c B_V} = \frac{\left(\frac{T}{1,439\text{К}}\right)}{\sigma B_V}, \\
 B_V &= B_e - \alpha_e \left(v + \frac{1}{2}\right), \\
 Q_{\text{vib}} &= \sum_v \exp\left(-\frac{1,439\text{К}}{T} [\omega_e v - \omega_e x_e (v^2 + v)]\right), \\
 Q_{\text{el}} &= \sum_v g_{\text{el}} \exp\left(-\frac{1,439\text{К}}{T} T_{\text{el}}\right),
 \end{aligned}$$

где B_V , ω_e , T_{el} (электронная энергия возбуждения) в см^{-1} .

В таблице приведены главные постоянные основного уровня, однако для расчетов диссоциации нужны также постоянные верхнего уровня [2, 3].

Избранные многоатомные молекулы [1, 6, 9]

Молекула	I. P., эВ	D, эВ	Диаметр, Å
H ₂ O	12,61	5,11	3,5
N ₂ O	12,89	1,68	4,0
CO ₂	13,77	5,45	3,8
NH ₃	10,15	4,3	3,0
CH ₄	13,0	4,4	3,5
HCN	13,91	5,6	

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 21; 2, § 22.
2. Herzberg G., Spectra of diatomic molecules, van Nostrand, 1950. (Русский перевод 1-го изд.: Герцберг Г., Спектры и строение двухатомных молекул, ИЛ, М., 1949.)
3. Tatum J. B., Publ. Dom. Ap. Obs., **13**, 1 (1966).
4. Schadee A., В. А. N., **17**, 311 (1964).
5. Tsuji T., Ann. Tokyo Astr. Obs., **9**, 1 (1964).
6. Handbook of Chem. and Phys., **44**, 2649, 3506, Chem. Rubber Pub. Co., 1963.
7. Chart of the Atoms, ed. Meggers W. F., Welch Sci. Co., Chicago, 1959.
8. d'Ans J., Lax E., Taschenbuch für Chem. und Phys., Springer, 1949, p. 183.
9. Herzberg G., Electronic spectra of polyatomic molecules, van Nostrand, 1966. (Русский перевод: Герцберг Г., Электронные спектры и строение многоатомных молекул, изд-во «Мир», М., 1969.)
10. Pearse R. W. B., Gaydon A. G., Identification of Molecular Spectra, Chapman and Hall, 1950. (Русский перевод 1-го изд.: Пирс Р., Гейдон А., Отождествление молекулярных спектров, ИЛ, М., 1949.)

§ 22. Плазма

- N_e, N_1, N_p, N – электронная, ионная, протонная концентрация и полная концентрация по всем тяжелым частицам
- Z_i – заряд иона в i -й степени ионизации (обозначенный в других параграфах как $Y_i - 1$)
- L – характерный размер (например, диаметр) плазмы
- T, B, ρ – температура, магнитное поле, плотность
- A – масса в а. е. м.

Дебаевский радиус экранирования электронов – расстояние от иона, на котором N_e может заметно отличаться от $\sum_i N_i Z_i$

$$\begin{aligned} D &= (kT/4\pi e^2 N_e)^{1/2} \\ &= 6,92(T/N_e)^{1/2} \text{ см} \\ &[T \text{ в К, } N_e \text{ в см}^{-3}] \end{aligned}$$

Плазменная частота колебаний

$$\begin{aligned} \nu_{pl} &= (N_e^2/\pi m_e)^{1/2} \\ &= 8,978 \cdot 10^3 N_e^{1/2} \text{ с}^{-1} [\text{в ед. СГС}] \end{aligned}$$

Гирочастота

электроны

$$\begin{aligned} \nu_{gy} &= (e/2\pi m_e c) B \\ &= 2,7994 \cdot 10^6 B \text{ с}^{-1} \end{aligned}$$

ионы

$$\begin{aligned} \nu_{gy} &= (Ze/2\pi m_i c) B \\ &= 1,535 \cdot 10^3 Z_i B/A \text{ с}^{-1} [B \text{ в гауссах}] \end{aligned}$$

Гирорадиус

электроны

$$\begin{aligned} a_e &= m_e v_{\perp} c / eB \\ &= 5,69 \cdot 10^{-8} v_{\perp} / B \text{ см} \\ &\approx 2,21 \cdot 10^{-2} T^{1/2} / B \text{ см} \end{aligned}$$

ионы

$$\begin{aligned} a_i &= m_e v_{\perp} c / Z_i eB \\ &= 1,036 \cdot 10^{-4} v_{\perp} A / Z_i B \text{ см} \\ &\approx 0,945 T^{1/2} A^{1/2} / Z_i B \text{ см,} \end{aligned}$$

где v_{\perp} – скорость, перпендикулярная вектору B .

Наиболее вероятная тепловая скорость

электроны

$$\begin{aligned} v &= (2kT/m_e)^{1/2} \\ &= 5,506 \cdot 10^5 T^{1/2} \text{ см/с} \end{aligned}$$

атомы, ионы

$$\begin{aligned} v &= (2kT/m)^{1/2} \\ &= 1,290 \cdot 10^4 (T/A)^{1/2} \text{ см/с} \end{aligned}$$

Чтобы получить среднеквадратичную скорость, надо умножить v на $\sqrt{3/2} = 1,225$.

Скорость звука

$$v_s = (\gamma kT/m)^{1/2} ((N + N_e)/N)^{1/2}$$

сравнима с тепловой скоростью.

Скорость Альвена (магнитогидродинамическая или гидромагнитная волна)

$$\begin{aligned} v_A &= B/(4\pi\rho)^{1/2} = 0,282B/\rho^{1/2} \\ &= c/(1 + 4\pi\rho c^2/B^2)^{1/2} \end{aligned}$$

Фазовая скорость

Скорость дрейфа электрона в пересекающихся магнитном и электрическом полях

$$= 10^8 E_{\perp} / B \text{ см/с} [E \text{ в вольт/см, } B \text{ в гауссах}]$$

Скорость дрейфа электрона в магнитном и гравитационном полях

$$m_e g c / eB = 5,686 \cdot 10^{-8} g / B \text{ см/с} [g \text{ в см/с}^2, B \text{ в гауссах}]$$

Радиус столкновения p для отклонения на прямой угол электрона ионом

$$\begin{aligned} p_0 &= Z_i e^2 / m_e v_e^2 \approx \frac{1}{2} Z_i e^2 / kT \\ &= 8,3 \cdot 10^{-4} Z_i / T \text{ см} \end{aligned}$$

Соответствующее эффективное сечение столкновения

$$\pi p_0^2 = 2,16 \cdot 10^{-6} Z_i^2 T^{-2} \text{ см}^2$$

Эффективное сечение для всех столкновений электронов с ионом

$$= \pi p_0^2 \ln \Lambda,$$

где

$$\ln \Lambda = \ln (d/c) = \int_c^d p^{-1} dp$$

и

c – минимум p в окружающей среде

d – максимум p в окружающей среде

Приближенные параметры некоторых видов плазм

Приведены логарифмы величин

Ион. – ионосфера, межпл. – межпланетное пространство, ☉ кор. – солнечная корона, ☉ обр. сл. – обращающий слой атмосферы Солнца, межзв. – межзвездное пространство, Н I – области Н I, Н II – области Н II

Величина	Единица измерения	Ион.	Межпл.	☉ кор.	☉ обр. сл.	Межзв.		
						Н I	Н II	
	$\lg L$	см	7,0	13,0	10,0	7,0	19,5	19,5
	$\lg N_e$	см ⁻³	5,5	0,5	8,0	12,5	-3,0	0,0
	$\lg N$	см ⁻³	11,0	0,5	8,0	16,5	0,0	0,0
	$\lg T$	К	3,0	5,0	6,0	3,7	2,0	4,0
	$\lg B$	Гс	-1,0	-5,0	0,0	0,0	-5,0	-5,0
Плазменная частота	$4,0 + \frac{1}{2} \lg N_e$	с ⁻¹	6,8	4,2	8,0	10,2	2,5	4,0
Дебаевский радиус	$0,7 + \frac{1}{2} \lg T - \frac{1}{2} \lg N_e$	см	-0,6	3,0	-0,3	-3,6	3,2	2,7
Гирочастота	электрона $6,4 + \lg B$	с ⁻¹	5,4	1,4	6,4	6,4	1,4	1,4
	иона $3,2 + \lg B$	с ⁻¹	2,2	-1,8	3,2	3,2	-1,8	-1,8
Частота столкновений	электрона $1,7 + \lg N_e - \frac{3}{2} \lg T$	с ⁻¹	2,7	-5,9	0,7	8,7	-4,3	-4,3
	иона $0,2 + \lg N_e - \frac{3}{2} \lg T$	с ⁻¹	1,2	-7,4	-0,8	7,2	-5,8	-5,8
Электропроводность	$6,3 + \frac{3}{2} \lg T$	ед. СГСЭ	10,8	13,8	15,3	11,9	9,3	12,3
	$-14,6 + \frac{3}{2} \lg T$	ед. СГСМ	-10,1	-7,1	-5,6	-9,0	-11,6	-8,6
Средняя длина свободного пробега	иона $5,7 + \frac{1}{2} \lg T - \lg N_e$	см	6,2	15,2	9,7	0,6	12,7	13,7
	нейтральной частицы $15,0 - \lg N$	см	4,0	14,5	7,0	-1,5	15,0	15,0
Гирорадиус	электрона $-1,7 + \frac{1}{2} \lg T - \lg B$	см	0,8	5,8	1,3	0,1	4,3	5,3
	протона $0,0 + \frac{1}{2} \lg T - \lg B$	см	2,5	7,5	3,0	1,8	6,0	7,0
Скорость Альвена	$11,3 - \frac{1}{2} \lg N + \lg B$	см/с	7,5	6,1	7,3	5,1	7,8	6,3
Скорость звука	$4,2 + \frac{1}{2} \lg T$	см/с	5,7	6,7	7,2	6,0	5,2	6,2
Время распада магнитного поля	$-13,1 + 2 \lg L + \frac{3}{2} \lg T$	с	5,4	19,4	15,9	6,5	29,9	31,9
		год	-2,1	11,9	8,4	-1,0	22,4	24,4

О спектре излучения высокотемпературной плазмы см. в § 84

c – наибольшее из	$c_1 = 8,3 \cdot 10^{-4} Z_i / T$ см по отклонению на прямой угол
и	$c_2 = 1,06 \cdot 10^{-6} T^{-1/2}$ см из размера электрона
d – наименьшее из	$d_1 = N^{-1/3}$ см из расположения ионов,
и	$d_2 = D = 6,9 T^{1/2} N^{-1/3}$, радиус Дебая
	$d_3 = 1,8 \cdot 10^5 T^{1/2} / \nu$ для столкновений, дающих свободно-свободное поглощение на частоте излучения ν
Наиболее общее приближение для Λ :	$\ln \Lambda = 9,00 + 3,45 \lg T - 1,15 \lg N_e$
Эффективное сечение столкновений для нейтральных атомов и молекул	$\approx 10^{-15} \text{ см}^2$
Частота столкновений для электронов	$= N_i v_e \times$ (эффективное сечение) $= 2,5 \ln \Lambda N_e T^{-1/3} Z_i \text{ с}^{-1}$
Частота столкновений ионов с ионами	$= 8 \cdot 10^{-2} \ln \Lambda N_e A^{-1/2} T^{-3/2} Z_i^2 \text{ с}^{-1}$
Средняя длина свободного пробега электронов среди заряженных частиц	$= 4,7 \cdot 10^5 T^2 N_i^{-1} N_i^{-2} \text{ см}$
Средняя длина свободного пробега электронов среди нейтральных частиц	$= 10^{15} N^{-1} \text{ см}$
Удельное электрическое сопротивление [2]	$\eta = 8 \cdot 10^{12} \ln \Lambda T^{-3/2}$ ед. СГСМ $8 \cdot 10^{-9} \ln \Lambda T^{-3/2}$ ед. СГСЭ,
	эта формула справедлива в случае, когда прирост энергии в течение свободного пробега $< kT$
Теплопроводность [1, 2, 5]	$= 1,0 \cdot 10^{-6} T^{5/2}$ эрг/(см · с · град)
Время жизни магнитного поля в плазме	$\tau = 4\pi L^2 / \eta$, η в ед. СГСМ $= 1,5 \cdot 10^{-12} L^2 (\ln \Lambda)^{-1} T^{-3/2} \text{ с}$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, 2, --
2. Spitzer L., Physics of Fully Ionized Gases, Interscience (John Wiley), 1962. (Русский перевод 2-го изд.: Спитцер Л., Физика полностью ионизованного газа, «Мир», М., 1965.)
3. Man G. V., Plasma Spectroscopy, Elsevier, 1968.
4. Lüst R., Progress in Radio Science, ed. Burgess, 7, 8, Elsevier, 1965.
5. Delcroix A., Lemaire A., Ap. J., 156, 787 (1969)

Спектры

§ 23. Обозначения атомных состояний, уровней, термов и т. д.

Спектроскопические уровни обычно описываются квантовыми числами, основанными на связи Рессела – Саундерса (LS -связь). Орбитальный момент количества движения (или азимутальное квантовое число) L есть векторная сумма орбитальных моментов количества движения l отдельных электронов. Единица измерения $h/2\pi = \hbar$, а обозначения следующие:

L (или l)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Обозначение (L)	S	P	D	F	G	H	I	K	L	M	N	O	Q	R	T	U
Обозначение (l)	s	p	d	f	g	h	i	k	l	m	n	o	q	r	t	u

Спиновый момент количества движения S есть векторная сумма спинов s отдельных электронов. Мультиплетность термов равна $(2S + 1)$.

Полный момент количества движения (или внутреннее квантовое число) J равен векторной сумме $L + S$ (в LS -связи).

При jj -связи для каждого электрона $j = l + s$ (векторная сумма) и $J = \sum j$.

Полное квантовое число каждого электрона $n = 1 + \text{орбитальное} + \text{радиальное квантовое число}$. Полное квантовое число тесно связано с энергией и определяет электронные оболочки следующим образом:

n	1	2	3	4	5	6	7
Обозначение оболочки	K	L	M	N	O	P	Q

Δn – изменение n при переходе.

Магнитные квантовые числа M_L , M_S , M выражают компоненты L , S и J в направлении магнитного поля.

Максимальные значения различных квантовых чисел ограничены следующим образом:

$$l \leq n - 1, \quad s = \frac{1}{2}, \quad J \leq S + L, \quad M_L \leq L, \quad M_S \leq S,$$

$$M \leq J, \quad S \leq \frac{1}{2} n_a, \quad L \leq n_a l,$$

где n_a – число электронов на открытой оболочке.

Расшифровка типичной записи для атомного уровня

	$2p^3 \ ^4S_{1\frac{1}{2}}^0$
2	полное квантовое число внешних электронов равно 2, т. е. L -оболочка
p^3	3 внешних электрона с $l = 1$
4	мультиплетность = 4, откуда $S = 1\frac{1}{2}$
S	орбитальный момент $L = 0$
$1\frac{1}{2}$	$J = 1\frac{1}{2}$, откуда статистический вес $g = 2J + 1 = 4$
0	уровень нечетный (0 опускается, если уровень четный)

Магнитные квантовые числа не указываются, если уровень не расщеплен магнитным полем.

Спектральные линии возникают при переходах между атомными уровнями в соответствии со следующей схемой:

Атомное подразделение	Характеристика	Статистический вес g	Переход
Состояние	Характеризуется квантовыми числами L, S, J, M или L, S, M_L, M_S	1	Компонента линии
Уровень	Характеризуется квантовыми числами L, S, J , например $^4S_{1/2}$	$2J + 1$	Спектральная линия
Терм	Группа уровней, характеризуется квантовыми числами L, S	$(2S + 1)(2L + 1)$	Мультиплет
Полиада	Группа термов, происходящих от одного исходного терма, с одинаковой мультиплетностью или S		Супермультиплет
Конфигурация	Характеризуется квантовыми числами n и l всех электронов	См. § 24	Набор переходов

Возможные уровни:

Синглеты	$^1S_0, ^1P_1, ^1D_2, ^1F_3, ^1G_4, ^1H_5, \dots$
Дуплеты	$^2S_{1/2}, ^2P_{1/2, 3/2}, ^2D_{1/2, 3/2}, ^2F_{3/2, 5/2}, ^2G_{3/2, 5/2}, \dots$
Триплеты	$^3S_1, ^3P_{0, 1, 2}, ^3D_{1, 2, 3}, ^3F_{2, 3, 4}, ^3G_{3, 4, 5}, \dots$
Квартеты	$^4S_{1/2}, ^4P_{1/2, 3/2, 5/2}, ^4D_{1/2, 3/2, 5/2}, ^4F_{3/2, 5/2, 7/2}, \dots$
Квинтеты	$^5S_2, ^5P_{1, 2, 3}, ^5D_{0, 1, 2, 3, 4}, ^5F_{1, 2, 3, 4, 5}, ^5G_{2, 3, 4, 5, 6}, \dots$
Секстеты	$^6S_{1/2}, ^6P_{1/2, 3/2, 5/2}, ^6D_{1/2, 3/2, 5/2, 7/2}, ^6F_{3/2, 5/2, 7/2, 9/2}, ^6G_{1/2, 3/2, 5/2, 7/2, 9/2}, \dots$
Септеты	$^7S_3, ^7P_{2, 3, 4}, ^7D_{1, 2, 3, 4, 5}, ^7F_{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}, ^7G_{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}, \dots$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 22; 2, § 22.

§ 24. Термы различных конфигураций

В таблице (стр. 59–60) даны мультиплеты и орбитальные моменты импульса различных термов, возникающих при LS -связи в приведенных конфигурациях. Если терм встречается более одного раза, число возможных термов написано под символом терма.

Любая заполненная оболочка s^2, p^6, d^{10}, f^{14} и т. д. дает только один терм 1S . Заполненные оболочки не принимаются во внимание при рассмотрении возможных термов внешних электронов.

Электроны с одинаковыми n и l называются эквивалентными. Неэквивалентные электроны разделяются точкой, например: $p \cdot p$. Термы, происходящие от дополнительных чисел эквивалентных электронов, одинаковы; например, одинаковы термы от p^2 и p^4 , так как 6 электронов заполняют p -оболочку.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 23; 2, § 23.
2. Moore C. E., Atomic Energy Levels, N. B. S. Circ, No. 467 (1949).

§ 25. Электронные конфигурации

В таблице (стр. 60–62) приведены электронные конфигурации основных уровней атомов. Имеются полные таблицы энергетических уровней [2].

Таблица первых ионов (Sc II и т. д.) ограничивается теми ионами, у которых основные уровни отличаются от основных уровней исходных атомов. В таблице даны только внешние и незаполненные оболочки.

Конфигурация	Термы	Полный вес
Эквивалентные <i>s</i> -электроны		
s	2S	2
s^2	1S	1
Эквивалентные <i>p</i> -электроны		
p	$^2P^0$	6
p^2	1SD 3P	15
p^3	$^2PD^0$ $^4S^0$	20
Эквивалентные <i>d</i> -электроны		
d	2D	10
d^2	1SDG 3PF	45
d^3	2PDFGH 4PF	120
d^4	1SDFGI 3PDFGH 5D	210
d^5	2SPDFGHI 4PDFG 6S	252
Эквивалентные <i>f</i> -электроны		
f	$^2F^0$	14
f^2	1SDGI 3PFH	91
f^3	$^2PDFGHIKL^0$ $^4SDFGI^0$	364
f^4	1SDFGHIKLN 3PDFGHIKLM 5SDFGI	1001
f^5	$^2PDFGHIKLMNO^0$ $^4SPDFGHIKLM^0$ $^6PFH^0$	2002
f^6	1SPDFGHIKLMNQ 3PDFGHIKLMNO 5SPDFGHIKL 7F	3003
f^7	$^2SPDFGHIKLMNOQ^0$ $^4SPDFGHIKLMN^0$ $^6PDFGHI^0$ $^8S^0$	3432
Система из 2-х электронов		
$s \cdot s$	1S 3S	4
sp	$^1P^0$ $^3P^0$	12
sd	1D 3D	20
sf	$^1F^0$ $^3F^0$	28
sg	1G 3G	36
$p \cdot p$	1SPD 3SPD	36
pd	$^1PDF^0$ $^3PDF^0$	60
pf	1DFG 3DFG	84
pg	$^1FGH^0$ $^3FGH^0$	108
$d \cdot d$	1SPDFG 3SPDFG	100
df	$^1PDFGH^0$ $^3PDFGH^0$	140
ff	1SPDFGHI 3SPDFGHI	196
Эквивалентные электроны и 1 <i>s</i> -электрон		
sp^2	2SPD 4P	30
sp^3	$^1PD^0$ $^3SPD^0$ $^5S^0$	40
sd^2	2SPDFG 4PF	90
sd^3	1PDFGH 3PDFGH 5PF	240
sd^4	2SPDFGHI 4PDFGH 6D	420
sd^5	1SPDFGHI 3SPDFGHI 5SPDFG 7S	504
sf^2	2SPDFGHI 4PFH	182
sf^3	$^1PDFGHIKL^0$ $^3SPDFGHIKL^0$ $^5SPDFGI^0$	728
3 электрона, 2 эквивалентных, <i>s</i> -электронов нет		
$p^2 \cdot p$	$^2SPDF^0$ $^4SPD^0$	90
p^2d	2SPDFG 4PDF	150
p^2f	$^2PDFGH^0$ $^4DFG^0$	210
pd^2	$^2SPDFGH^0$ $^3SPDFG^0$	270
$d^2 \cdot d$	2SPDFGHI 4PDFGH	450

Продолжение

Конфигурация	Термы	Полный вес
3 неэквивалентных электрона <i>s·sp</i>	${}^2P^0$ ${}^4P^0$	24
<i>s·sd</i>	2D 4D	40
<i>sp·p</i>	2SPD 4SPD	72
<i>spd</i>	${}^2PDF^0$ ${}^4PDF^0$	120
<i>spf</i>	2DFG 3DFG	168
<i>sd·d</i>	2SPDFG 4SPDFG	200

Нейтральные атомы

Атом	K 1s	L		M			N			O 5s	Основной уровень
		2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d		
H He	1 2										${}^2S_{1/2}$ 1S_0
Li Be B C N O F Ne	2 2 2 2 2 2 2 2	1 2 2 2 2 2 2 2									${}^2S_{1/2}$ 1S_0 ${}^2P_{1/2}^0$ 3P_0 ${}^4S_{1/2}^0$ 3P_1 ${}^2P_{1/2}^0$ 1S_0
Na Mg Al Si P S Cl Ar	2 2 2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6	1 2 2 2 2 2 2 2							${}^2S_{1/2}$ 1S_0 ${}^2P_{1/2}^0$ 3P_0 ${}^4S_{1/2}^0$ 3P_2 ${}^2P_{1/2}^0$ 1S_0
K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni	2 2 2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6						${}^2S_{1/2}$ 1S_0 ${}^2D_{1/2}$ 3F_2 ${}^4F_{1/2}$ 7S_3 ${}^6S_{1/2}$ 5D_4 ${}^4F_{4/2}$ 3F_4
Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr	2 2 2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6	10 10 10 10 10 10 10 10					${}^2S_{1/2}$ 1S_0 ${}^2P_{1/2}^0$ 3P_0 ${}^4S_{1/2}^0$ 3P_2 ${}^2P_{1/2}^0$ 1S_0
Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd	2 2 2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6	10 10 10 10 10 10 10 10					${}^2S_{1/2}$ 1S_0 ${}^2D_{1/2}$ 3F_2 ${}^6D_{1/2}$ 7S_3 ${}^6S_{1/2}$ 5F_5 ${}^4F_{4/2}$ 1S_0

Атом	K L M N	N 4f	O				P			Q 7s	Основной уровень		
			5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d				
Ag 47	46 атомный остов (K 1s, L 2s, 2p, M 3s, 3p, 3d, N 4s, 4p, 4d)		1								$2S_{1/2}$		
Cd 48			2								$1S_0$		
In 49			2	1							$2P_{1/2}^0$		
Sn 50			2	2							$3P_0$		
Sb 51			2	3							$4S_{1 1/2}^0$		
Te 52			2	4							$3P_2$		
I 53			2	5							$2P_{1 1/2}^0$		
Xe 54			2	6							$1S_0$		
Cs 55				2	6			1			$2S_{1/2}$		
Ba 56				8		1		2			$1S_0$		
La 57				8		1		2			$2D_{1 1/2}$		
Ce 58			1	2	6	1		2			$1G_4^0$		
Pr 59			3	8		1		2			$4I_{4 1/2}^0$		
Nd 60			4						2				$5I_4$
Pm 61			5						2				$6H_{2 1/2}^0$
Sm 62			6						2				$7F_0$
Eu 63			7						2				$8S_{3 1/2}^0$
Gd 64			7						2				$9D_2$
Tb 65			9						2				$6H_{7 1/2}^0$
Dy 66			10						2				$5I_8$
Ho 67			11						2				$4I_{7 1/2}^0$
Er 68			12						2				$3H_6$
Tm 69		13						2				$3F_{3 1/2}^0$	
Yb 70		14						2				$1S_0$	
Lu 71		14						1		2		$2D_{1 1/2}$	
Hf 72		14	2				6	2		2			$3F_2$
Ta 73		46 + 22			3		2			$4F_{1 1/2}$			
W 74							4		2			$5D_0$	
Re 75							5		2			$2S_{1 1/2}$	
Os 76							6		2			$5D_4$	
Ir 77							7		2			$4F_{1 1/2}$	
Pt 78							9		1			$3D_3$	
Au 79		14	2	6	10		1			$2S_{1/2}$			
Hg 80		46 + 32					2			$1S_0$			
Tl 81									2	1		$2P_{1/2}^0$	
Pb 82									2	2		$3P_0$	
Bi 83									2	3		$4S_{1 1/2}^0$	
Po 84									2	4		$3P_2$	
At 85									2	5		$2P_{1 1/2}^0$	
Rn 86									2	6		$1S_0$	
Fr 87		14	2	6	10		2	6	1	$2S_{1/2}$			
Ra 88		46 + 32							2	$1S_0$			
Ac 89											1	$2D_{1 1/2}$	
Th 90											2	$3F_2$	
Pa 91								2			1	$4K_{5 1/2}$	
U 92								3			1	$5L_6^0$	

Новые элементы

Элемент		O 5f	P			Q 7s	Основной уровень
			6s	6p	6d		
Np	93	4	2	6	1	2	$6I_{5\frac{1}{2}}^0$
Pu	94	6	2	6		2	$7F$
Am	95	7	2	6		2	$8S_{3\frac{1}{2}}^0$
Cm	96	7	2	6	1	2	$9D_2^0$
Bk	97	9	2	6		2	$6H_{7\frac{1}{2}}^0$
Cf	98	10	2	6		2	$5I_8$

Первые ионы

Элемент	Конфигурация	Основной уровень	Элемент	Конфигурация	Основной уровень	Элемент	Конфигурация	Основной уровень
Sc	$3d4s$	$3D_1$	La	$5d^2$	$3F_2$	Ta	$5d^36s$	$5F_1$
Ti	$3d^24s$	$4F_{1\frac{1}{2}}$	Ce	$4f5d^2$	$4H_{3\frac{1}{2}}^0$	W	$5d^46s$	$6D_{\frac{1}{2}}$
V	$3d^4$	$5D_0$	Pr	$4f^36s$	$5I_4^0$	Re	$5d^56s$	$7S_3$
Cr	$3d^5$	$6S_{2\frac{1}{2}}$	Nd	$4f^46s$	$6I_{3\frac{1}{2}}$	Os	$5d^66s$	$6D_{4\frac{1}{2}}$
Mn	$3d^54s$	$7S_3$	Pm	$4f^56s$	$7H_2^0$	Ir	—	—
Fe	$3d^64s$	$6D_{4\frac{1}{2}}$	Sm	$4f^66s$	$8F_{\frac{1}{2}}$	Pt	$5d^9$	$2D_{2\frac{1}{2}}$
Co	$3d^8$	$3F_4$	Eu	$4f^76s$	$9S_4^0$	Au	$5d^{10}$	$1S_0$
Ni	$3d^9$	$2D_{2\frac{1}{2}}$	Gd	$4f^75d6s$	$10D_{2\frac{1}{2}}^0$	Th	$6d^27s$	$4F_{1\frac{1}{2}}$
Cu	$3d^{10}$	$1S_0$	Tb	$4f^96s$	$7H_8^0$	Pa	$5f^27s^2$	$3H_4$
Zr	$4d^25s$	$4F_{1\frac{1}{2}}$	Dy	$4f^{10}6s$	$6I_{8\frac{1}{2}}$	U	$5f^37s^2$	$4I_{4\frac{1}{2}}^0$
Nb	$4d^4$	$5D_0$	Ho	$4f^{11}6s$	$5I_8^0$	Np	—	—
Mo	$4d^5$	$6S_{2\frac{1}{2}}$	Er	$4f^{12}6s$	$4H_{6\frac{1}{2}}$	Pu	$5f^67s$	$8F_{\frac{1}{2}}$
Tc	$4d4s$	$7S_3$	Tm	$4f^{13}6s$	$3F_4^0$	Am	$5f^77s$	$9S_4^0$
Ru	$4d^7$	$4F_{4\frac{1}{2}}$	Yb	$4f^{14}6s$	$2S_{\frac{1}{2}}$			
Rh	$4d^8$	$3F_4$						
Pd	$4d^9$	$2D_{2\frac{1}{2}}$						

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 24; 2, § 24.
2. Moore C. E., Atomic Energy Levels, N. B. S. Circ., No. 467 (1949, 1952, 1958) и частные сообщения.

§ 26. Интенсивности спектральных линий

Величины

f — сила осциллятора, или эффективное число электронов в атоме. Если нет специальных оговорок, под f понимается сила осциллятора при поглощении f_{abs} . Она связана с силой осциллятора при излучении f_{em} (которая отрицательна) следующим соотношением:

$$g_1 f_{\text{abc}} = -g_2 f_{\text{em}},$$

где индекс 1 означает нижний, а 2 — верхний уровень. Тогда $f_{12} = f_{\text{abs}}$ и $f_{21} = f_{\text{em}}$

- g — статистический вес уровня, $g = 2J + 1$. Уровень указывается индексом
- g_t — статистический вес терма, $g_t = (2S + 1)(2L + 1)$
- gf — взвешенная сила осциллятора, $gf = g_1 f_{12} = -g_2 f_{21}$. Взвешенные силы осциллятора для излучения и поглощения отличаются знаком. Величина gf для линий, мультиплетов и т. п. обладает свойством аддитивности
- gf — полная сила осциллятора для мультиплета
- A — вероятность спонтанного перехода (для переходов сверху вниз), в простых случаях величина, обратная среднему времени жизни

- B_{12}, B_{21} – вероятности вынужденных переходов снизу вверх и сверху вниз соответственно.
 $B_{ij}(\nu)$ – вероятность вынужденного перехода в поле излучения плотности $u(\nu)$, где ν – частота перехода. Коэффициенты B иногда определяются относительно интенсивности излучения вместо плотности
- S – сила линии (имеется в виду электрический диполь $e^2|x|^2$, если не определено иначе).
 $S_{12} = S_{21}$
- γ_{cl} – классическая постоянная затухания. $\gamma_{cl}/2\pi$ – классическая полуширина линии в единицах частоты
- γ_2 – величина, обратная среднему времени жизни уровня 2 = $\sum_1 A_{21} + \sum_1 B_{21}u(\nu_{21}) + \sum_3 B_{23}u(\nu_{23})$ + (члены, обусловленные соударениями), где уровни 1 расположены ниже, а уровни 3 – выше уровня 2
- γ – постоянная затухания = $\gamma_1 + \gamma_2$ для перехода $1 \rightarrow 2$
- σ_ν – атомный коэффициент рассеяния вблизи линии поглощения
- ν_0 – центральная частота линии
- σ_1 – интегральный атомный коэффициент рассеяния для спектральной линии = $\int \sigma_\nu d\nu$
- R_i, R_f – R_i/r и R_f/r – начальная и конечная радиальные волновые функции активного электрона в атомных единицах, r – радиус
- σ, ρ – величины, относящиеся к радиальным волновым функциям (не связанные с σ_ν или σ_1)
- \mathcal{S} – относительная сила мультиплета по шкале § 27
- $\mathcal{S}(\mathcal{M})$ – относительная сила мультиплета по шкале § 28
- $S(\mathcal{M})$ – полная абсолютная сила мультиплета = $\sigma^2 \mathcal{S}(\mathcal{M})$
- N_1 – число атомов в единице объема на уровне 1 (нижний уровень)
- E – энергия, излучаемая в линии во всех направлениях в единице объема и в единицу времени

Соотношения

$$\begin{aligned}
 g_2 A_{21} &= g_2 \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21} = g_1 \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{12} = \frac{64\pi^4}{3h\lambda^3} S_{12} \text{ или } 21 \\
 &= 3\gamma_{cl} g_1 f_{12} = -3\gamma_{cl} g_2 f_{21} = \frac{8\pi^2 e^2 \nu^2}{mc^3} g_1 f_{12}, \\
 \gamma_{cl} &= \frac{8\pi^2 e^2 \nu^2}{3mc^3} = \frac{8\pi^2 e^2}{3mc^3 \lambda^2}, \quad [m = m_e], \\
 gf &= g_1 f_{12} = -g_2 f_{21} = \frac{mh\nu}{\pi e^2} g_1 B_{12} = \frac{8\pi^2 m \nu}{3he^3} S_{12}, \\
 g_1 B_{12} &= g_2 B_{21} = \frac{8\pi^2}{3h^2} S_{12}, \\
 E &= N_2 A_{21} h\nu = \frac{N_2}{g_2} \frac{8\pi^2 e^2 h \nu^3}{mc^3} g_1 f_{12} = N_2 \frac{8\pi^2 e^2 h \nu^3}{mc^3} (-f_{21}) = \\
 &= N_2 \frac{8\pi^2 e^2 h}{m\lambda^3} (-f_{21}), \\
 \sigma^2 &= \frac{\rho^2}{4l^2 - 1} = \frac{1}{4l^2 - 1} \left(\int_0^\infty R_i R_f r dr \right)^2,
 \end{aligned}$$

где l – большее из двух орбитальных квантовых чисел, характеризующих данный переход.

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \int \sigma_\nu d\nu = \frac{\pi e^2}{mc} f_{abc} N_1, \\
 \sigma_\nu &= \frac{\pi e^2}{mc} f_{abc} \frac{\gamma}{4\pi^2} \frac{N_1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{4\pi}\right)^2}, \\
 \sigma_{\nu_0} &= \frac{4}{\gamma} \frac{\pi e^2}{mc} f_{abc} N_1.
 \end{aligned}$$

Числовые соотношения

$$gf = 0,03038S/\lambda = 1,499 \cdot 10^{-8} g_2 A \lambda^2$$

[S в атомных единицах, λ в мкм, A в с^{-1}].

$$S = |x|^2 / a_0^2 = 32,92gf\lambda = 4,94 \cdot 10^{-7} g_2 A \lambda^3$$

[те же единицы].

$$A = 2,026 \cdot 10^6 S / g_2 \lambda^3 = 2,677 \cdot 10^9 i^3 S / g_2 \\ = 0,6670 \cdot 10^8 g f / g_2 \lambda^2$$

[те же единицы, i – волновое число в ридбергах].

$$\sigma_1 = \int \sigma_\nu d\nu = \frac{\pi e^2}{mc} f_{\text{abc}} N_1 = 0,02654 f_{\text{abc}} N_1$$

[σ_1 в $\text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, σ_ν в см^{-1} , ν в с^{-1} , N_1 в см^{-3}].

$$f = 4,318 \cdot 10^{-9} \int \epsilon_\nu d(1/\lambda),$$

где ϵ_ν – молярный коэффициент экстинкции и $\epsilon_\nu l C = -\lg(I/I_0)$, где l – длина пути в см, C – концентрация в моль/л, $d(1/\lambda)$ в см^{-1} .

$$\gamma_{\text{el}} = 0,2223 \cdot 10^8 / \lambda^3 \text{ с}^{-1}, [\lambda \text{ в мкм}].$$

$$8\pi h \nu^3 / c^3 = 8\pi h / \lambda^3 = 1,665 \cdot 10^{-13} / \lambda^3, [\lambda \text{ в мкм}].$$

Атомная единица для S (электрический диполь)

$$a_0^2 e = 6,459 \cdot 10^{-36} \text{ см}^2 \cdot (\text{ед. СГСЭ})^2$$

Электрический квадруполь и магнитный диполь

$$g_2 A_{21} = \frac{32\pi^6 \nu^5}{5hc^5} S_q = 2674 i^5 S_q \text{ с}^{-1}$$

[i в ридбергах, S_q в атомных единицах], где атомная единица для электрической квадрупольной силы S_q есть $a_0^2 e^4 = 1,8088 \cdot 10^{-52} \text{ см}^4 \cdot (\text{ед. СГСЭ})^2$.

$$g_2 A_{21} = \frac{64\pi^4 \nu^3}{3hc^3} S_m = 35660 i^3 S_m \text{ с}^{-1}$$

[i в ридбергах, S_m в атомных единицах], где атомная единица для магнитной дипольной силы S_m есть $e^2 h^2 / 16\pi^2 m^2 c^2 = 0,8599 \cdot 10^{-40} \text{ эрг}^2 / \text{Гс}^2$.

Абсолютные интенсивности

Абсолютные значения f , A , B , S можно определить а) по оценкам σ^2 , б) используя правила f -суммирования и в) из абсолютных измерений.

Общий метод оценки σ [2] дает

$$\sigma = (1/Y) \mathcal{F}(n_l^*, l) \mathcal{J}(n_{l-1}^*, n_l^*, l),$$

где Y – степень ионизации (1 – для нейтральных атомов, 2 – для однократно ионизованных и т. д.), l – большее из двух орбитальных квантовых чисел (различающихся на 1) и n^* – эффективное главное квантовое число = $Y/(\chi - W)^{1/2}$, где χ и W – энергии ионизации и возбуждения в ридбергах. Функции \mathcal{F} и \mathcal{J} табулированы [2].

Правило f -сумм Куна – Томаса – Рейхе:

$$\sum_1 f_{21} + \sum_3 f_{23} = z,$$

где суммирование проводится для уровней 1, лежащих ниже выбранного уровня 2, и уровней 3, лежащих выше этого уровня (включая континуум), z – число оптических электронов. Величина f_{21} отрицательна; следовательно, для переходов снизу вверх $\sum_3 f_{23} \geq z$. Правило f -сумм можно применять для щелочных и щелочноземельных металлов.

Применение правила f -сумм к более сложным спектрам, где рассматриваемые линии являются обычно самыми слабыми членами своих серий и поэтому содержат большую часть полной силы осциллятора [4], дает

$$\sum_{\text{LS}} g_t f = b_1 b_2 g_t,$$

$$\text{где } \lg b_1 \approx \begin{cases} -0,1 \\ -1,1 \\ -0,2 \end{cases}$$

$$\left. \begin{matrix} s-p \\ p-s \\ p-d \end{matrix} \right\} \text{наборы переходов}$$

$$\lg b_1 \approx \begin{cases} -0,1 \\ -0,5 \end{cases}$$

при небольших нарушениях LS-связи
при очень сильных нарушениях LS-связи

Суммирование \sum_{LS} производится для мультиплетов, в которых выполняются правила LS-связи внутри наборов переходов, где переход осуществляет только один неэквивалентный электрон. Абсолютные ошибки величины g, f для отдельных мультиплетов в случае применения этого правила составляют около $\pm 0,35$ dex.

Правило Вигнера – Кирквуда для одного электронного перескока [3]:

$$\begin{aligned} \text{для } l \rightarrow l-1 \quad \sum f &= -\frac{1}{3} \frac{l(2l-1)}{2l+1}, \\ \text{для } l \rightarrow l+1 \quad \sum f &= \frac{1}{3} \frac{(l+1)(2l+3)}{2l+1} \end{aligned}$$

[l – орбитальное квантовое число], например,

$$\begin{aligned} p \rightarrow ns \quad \sum f &= -1/9; & s \rightarrow np \quad \sum f &= 1; \\ d \rightarrow np \quad \sum f &= -2/5; & p \rightarrow nd \quad \sum f &= 10/9. \end{aligned}$$

Это правило иногда можно применять для сложных спектров, оно точно применимо к спектру водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 26; 2, § 25.
2. Bates D. R., Damgaard A., Phil. Trans. Roy. Soc. London, A242, 101 (1949).
3. Unsöld A., Physik der Sternatmosphären, 2nd ed., Springer, 1955, p. 350. (Русский перевод 1-го изд.: Унзольд А., Физика звездных атмосфер, ИЛ, М., 1949.)
4. Allen C. W., M. N., 121, 299 (1960); 153, 295 (1971).

§ 27. Относительные силы линий в мультиплетах

Таблицы относительных сил линий в мультиплетах основаны на LS-связи. Полная сила \mathcal{S} для каждого мультиплета выбирается так, чтобы она была целым числом:

$$\mathcal{S} = g_1 g_2 / (2S_m + 1) = (2S_m + 1) (2L_1 + 1) (2L_2 + 1),$$

где g_1 и g_2 – полные веса g_i начального и конечного термов, $(2S_m + 1)$ – мультиплетность, S_m – спин, L_1 и L_2 – орбитальные квантовые числа. Следует заметить, что \mathcal{S} в общем случае не равно $\mathcal{S}(\mathcal{M})$ из § 28. x_1, x_2, \dots – силы на главной диагонали, y_1, y_2, \dots – первые спутники, z_1, z_2, \dots – вторые спутники. Существует следующая систематика мультиплетов:

Нормальные мультиплеты SP, PD, DF и т. д.

	J_m	$J_m - 1$	$J_m - 2$	$J_m - 3$	$J_m - 4$
$J_m - 1$	x_1	y_1	z_1		
$J_m - 2$		x_2	y_2	z_2	
$J_m - 3$			x_3	y_3	z_3
$J_m - 4$				x_4	y_4

Симметричные мультиплеты PP, DD и т. д.

	J_m	$J_m - 1$	$J_m - 2$	$J_m - 3$
J_m	x_1	y_1		
$J_m - 1$	y_1	x_2	y_2	
$J_m - 2$		y_2	x_3	y_3
$J_m - 3$			y_3	x_4

Максимальное значение внутреннего квантового числа J_m равно $S_m + L_m$, где L_m – орбитальное квантовое число (большее из двух в случае нормального мультиплета). При выбранном \mathcal{S} суммы сил по строкам и столбцам мультиплета (в таблицах, приведенных выше) являются целыми числами. Так как полная сила \mathcal{S} табулирована, легко определить силу линии относительно мультиплета.

Имеются таблицы логарифмов интенсивностей мультиплетов [4], а также таблицы, в которых сила первой линии главной диагонали x принята за 100 [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 27; **2**, § 26.
2. Shore B. W., Menzel D. H., Ap. J. Supp., **12**, No. 106, 187 (1965).
3. Condon E. U., Shortley G. H., Theory of Atomic Spectra, Cambridge U. P., 1935, p. 241. (Русский перевод; Кондон Е., Шортли Г., Теория атомных спектров, ИЛ, М., 1949.)
4. Russell H. N., Ap. J., **83**, 129 (1936).

	Мультиплетность										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SP											
\mathcal{S}	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
x_1	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
y_1		2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
z_1			1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
PP											
\mathcal{S}	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90	99
x_1	9,0	10,0	11,25	12,6	14,0	15,4	16,9	18,3	19,8	21,3	22,8
x_2		4,0	2,25	1,60	1,25	1,04	0,88	0,75	0,68	0,61	0,55
x_3			0,00	1,00	2,25	3,6	5,0	6,4	7,9	9,3	10,80
y_1		2,0	3,75	5,40	7,00	8,6	10,1	11,65	13,2	14,7	16,2
y_2			3,00	5,00	6,75	8,4	10,0	11,6	13,1	14,7	16,2
PD											
\mathcal{S}	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
x_1	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0	39,0	42,0	45,0
x_2		10,0	11,25	12,6	14,0	15,4	16,9	18,3	19,8	21,3	22,8
x_3			5,0	5,0	5,25	5,6	6,0	6,4	6,9	7,3	7,8
y_1		2,0	3,75	5,40	7,00	8,6	10,1	11,65	13,2	14,7	16,2
y_2			3,75	6,40	8,75	11,0	13,1	15,2	17,3	19,3	21,4
y_3				5,00	6,75	8,4	10,0	11,6	13,1	14,7	16,2
z_1			0,25	0,60	1,00	1,43	1,88	2,33	2,80	3,27	3,75
z_2				1,00	2,25	3,60	5,0	6,4	7,86	9,3	10,8
z_3					3,00	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0
DD											
\mathcal{S}	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
x_1	25,0	28,0	31,1	34,3	37,5	40,7	44,0	47,3	50,6	53,8	57,2
x_2		18,0	17,4	17,2	17,5	17,9	18,3	19,0	19,6	20,1	20,9
x_3			11,25	8,0	6,25	5,14	4,37	3,81	3,37	3,03	2,75
x_4				5,0	1,25	0,22	0,00	0,14	0,48	0,95	1,50
x_5					0,0	2,23	5,00	8,0	11,1	14,3	17,5
y_1		2,0	3,9	5,7	7,5	9,25	11,0	12,75	14,4	16,1	17,8
y_2			3,75	7,0	10,0	12,85	15,6	18,4	21,0	23,6	26,3
y_3				5,0	8,75	12,0	15,0	17,8	20,6	23,4	26,0
y_4					5,0	7,8	10,0	12,0	13,9	15,7	17,5
DF											
\mathcal{S}	85	70	105	140	175	210	245	280	315	350	385
x_1	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0
x_2		28,0	31,1	34,3	37,5	40,7	44,0	47,3	50,6	53,8	57,2
x_3			21,0	22,5	24,0	25,8	27,5	29,4	31,2	33,1	35,0
x_4				14,0	14,0	14,4	15,0	15,7	16,5	17,4	18,2
x_5					7,0	6,2	6,0	6,0	6,1	6,3	6,5
y_1		2,0	3,9	5,7	7,5	9,2	11,0	12,8	14,4	16,1	17,8
y_2			3,9	7,3	10,5	13,6	16,5	19,4	22,2	25,1	27,8
y_3				5,6	10,0	13,9	17,5	21,0	24,4	27,5	30,8
y_4					7,0	11,4	15,0	18,3	21,4	24,4	27,3
y_5						7,8	10,0	12,0	13,9	15,7	17,5
z_1			0,11	0,29	0,50	0,74	1,00	1,28	1,56	1,84	2,14
z_2				0,40	1,00	1,71	2,50	3,33	4,20	5,10	6,0
z_3					1,00	2,40	4,0	5,7	7,5	9,3	11,2
z_4						2,22	5,0	8,0	11,1	14,3	17,5
z_5							5,0	10,0	15,0	20,0	25,0

	Мультиплетность										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FF											
\mathcal{S}	49	98	147	196	245	294	343	392	441	490	539
x_1	49,0	54,0	59,0	64,1	69,3	74,4	79,6	84,8	90,0	95,2	100,4
x_2		40,4	41,2	42,7	44,5	46,2	48,2	50,1	52,2	54,2	56,4
x_3			31,1	28,9	27,6	26,7	26,3	25,9	25,9	25,9	26,0
x_4				22,4	17,5	14,4	12,3	10,7	9,5	8,5	7,7
x_5					14,0	7,6	4,38	2,50	1,36	0,67	0,26
x_6						6,2	0,89	0,00	0,49	1,60	3,06
x_7							0,00	3,50	7,89	12,6	17,5
y_1		2,0	3,94	5,8	7,7	9,5	11,4	13,2	15,0	16,8	18,6
y_2			3,88	7,5	11,0	14,2	17,5	20,7	23,9	26,9	30,0
y_3				5,6	10,5	15,0	19,2	23,3	27,4	31,1	35,0
y_4					7,0	12,6	17,5	22,0	26,3	30,3	34,2
y_5						7,7	13,1	17,5	21,4	25,0	28,5
y_6							7,0	10,5	13,1	15,4	17,3
FG											
\mathcal{S}	63	126	189	252	315	378	441	504	567	630	693
x_1	63,0	70,0	77,0	84,0	91,0	98,0	105,0	112,0	119,0	126,0	133,0
x_2		54,0	59,0	64,1	69,3	74,4	79,6	84,8	90,0	95,2	100,4
x_3			45,0	48,2	51,5	55,0	58,4	62,0	65,8	69,3	73,0
x_4				36,0	37,5	39,3	41,2	43,4	45,5	47,8	49,9
x_5					27,0	27,0	27,5	28,3	29,3	30,4	31,5
x_6						18,0	16,9	16,5	16,5	16,8	17,0
x_7							9,0	7,5	6,9	6,6	6,5
y_1		2,0	3,94	5,8	7,7	9,5	11,4	13,2	15,0	16,8	18,6
y_2			3,94	7,6	11,2	14,5	17,9	21,2	24,4	27,6	30,7
y_3				5,8	11,0	15,7	20,2	24,6	28,9	33,0	37,1
y_4					7,5	13,7	19,2	24,5	29,3	34,0	38,5
y_5						9,0	15,6	21,2	26,3	31,0	35,5
y_6							10,1	16,0	20,6	24,6	28,5
y_7								10,6	13,2	16,4	17,5
z_1			0,06	0,17	0,30	0,46	0,62	0,81	1,00	1,20	1,41
z_2				0,21	0,56	1,00	1,50	2,05	2,63	3,23	3,85
z_3					0,50	1,29	2,25	3,34	4,51	5,7	7,0
z_4						1,00	2,50	4,29	6,25	8,3	10,5
z_5							1,88	4,50	7,5	10,7	14,0
z_6								3,50	7,9	12,6	17,5
z_7									7,0	14,0	21,0
GG											
\mathcal{S}	81	162	243	324	405	486	567	648	729		
x_1	81,0	88,0	95,0	102,1	109,2	116,4	123,4	130,6	137,7		
x_2		70,0	73,0	76,1	79,9	83,5	87,0	90,9	94,2		
x_3			59,0	58,4	58,4	59,0	59,6	60,4	61,3		
x_4				48,2	44,5	41,8	39,7	38,2	37,1		
x_5					37,5	30,9	26,3	22,8	20,2		
x_6						27,0	18,4	13,0	9,4		
x_7							16,9	7,7	3,36		
x_8								7,5	0,67		
x_9									0,00		
y_1		2,0	3,96	5,9	7,8	9,7	11,6	13,4	15,3		
y_2			3,94	7,7	11,4	14,9	18,4	21,8	25,1		
y_3				5,8	11,2	16,2	21,1	25,7	30,4		
y_4					7,5	14,2	20,2	26,0	31,5		
y_5						9,0	16,5	23,2	29,2		
y_6							10,1	17,8	24,3		
y_7								10,5	17,3		
y_8									9,0		

	Мультиплетность						
	1	2	3	4	5	6	7
GH							
\mathcal{S}	99	198	297	396	495	594	693
x_1	99,0	108,0	117,0	126,0	135,0	144,0	153,0
x_2		88,0	95,0	102,1	109,2	116,3	123,4
x_3			77,0	82,0	87,4	92,6	97,9
x_4				66,0	69,1	72,9	76,5
x_5					55,0	56,6	58,4
x_6						44,0	44,0
x_7							33,0
y_1		2,0	3,96	5,9	7,8	9,7	11,6
y_2			3,96	7,8	11,4	15,1	18,6
y_3				5,9	11,3	16,5	21,6
y_4					7,7	14,6	21,1
y_5						9,4	17,5
y_6							11,0
z_1			0,04	0,11	0,20	0,31	0,43
z_2				0,13	0,36	0,65	1,00
z_3					0,30	0,80	1,44
z_4						0,57	1,50
z_5							1,00
HH							
\mathcal{S}	121	242	363	484	605	726	847
x_1	121,0	130,0	139,0	148,1	157,2	166,2	175,3
x_2		108,0	113,0	118,0	123,7	129,2	134,7
x_3			95,0	96,3	98,1	100,0	102,0
x_4				82,3	79,9	78,3	77,3
x_5					69,2	63,7	59,5
x_6						56,6	48,2
x_7							44,1
y_1		2,0	3,97	5,9	7,8	9,8	11,7
y_2			3,97	7,8	11,6	15,2	19,8
y_3				5,9	11,4	16,8	22,0
y_4					7,7	14,8	21,6
y_5						9,4	17,8
y_6							11,0
HI							
\mathcal{S}	143	286	429	572	715		
x_1	143,0	154,0	165,0	176,0	187,0		
x_2		130,0	139,0	148,1	157,2		
x_3			117,0	124,0	131,0		
x_4				104,0	109,0		
x_5					91,0		
y_1		2,0	3,97	5,9	7,8		
y_2			3,97	7,8	11,6		
y_3				5,9	11,6		
y_4					7,8		
z_1			0,03	0,08	0,14		
z_2				0,09	0,25		
z_3					0,20		

§ 28. Силы мультиплетов

В таблицах приведены суммы угловых матриц или относительные силы мультиплетов, $\mathcal{S}(\mathcal{M})$, по которым можно вычислить абсолютные силы мультиплетов $\mathcal{S}(\mathcal{M}) = \sigma^2 \mathcal{S}(\mathcal{M})$. σ^2 определено в § 26. Имеются более подробные таблицы [2], которые необходимо исправить с помощью коэффициентов, приведенных в [3]. Полная взвешенная сила осциллятора для мультиплета

$$g_{\text{т}} f = \sum_{\text{mult}} g f = 0,030 \, 38 \sigma^2 \mathcal{S}(\mathcal{M}) / \lambda$$

$$= 0,030 \, 38 S(\mathcal{M}) / \lambda \quad [\lambda \text{ в мкм}].$$

Таблицы расположены в порядке s, p, d, \dots . Орбитальное квантовое число l перескакивающего электрона всегда меняется на 1 и *более низкое* значение стоит слева. Если известна полная сила двух или более термов, а отдельные силы не известны, тогда дается полная сила, а число составляющих помещается перед символом терма. Например, 3^2D в переходе $p^3 - p^2d$ дается комбинированной силой трех переходов 2D .

Суммирование термов с более низким l (т. е. суммирование вдоль строки):

$$\sum \mathcal{S}(\mathcal{M}) = k(2S + 1)(2L + 1)(l + 1)(2l + 3),$$

где k – число эквивалентных электронов (например, $k = 1$ для p , 2 для p^2 и т. д.). Перескакивающий электрон может быть эквивалентным для суммируемого терма, но правило не применимо, если перескакивающий электрон является эквивалентным в начальной или конечной конфигурации.

Суммирование термов с более высокими l (т.е. суммирование по столбцам):

$$\sum \mathcal{S}(\mathcal{M}) = k(2S + 1)(2L + 1)l(2l - 1),$$

где k – число эквивалентных электронов. Снова правило не применимо для переходов, связанных с конфигурацией, в которой перескакивающий электрон является эквивалентным.

ЛИТЕРАТУРА

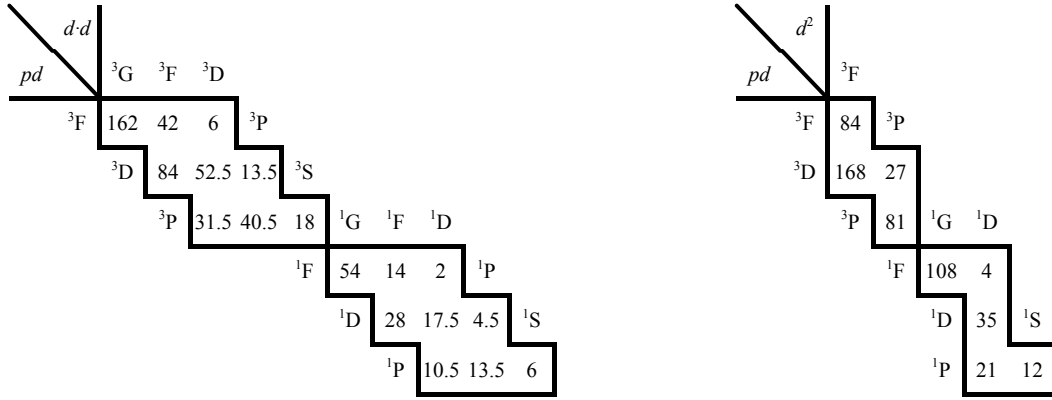
1. A. Q. 1, §28; 2, §27.
2. Goldberg L., Ap. J., **82**, 1 (1935).
3. Goldberg L., Ap. J., **84**, 11 (1936).
4. Rohrlich F., Ap. J., **129**, 441, 449 (1959).

1 электрон

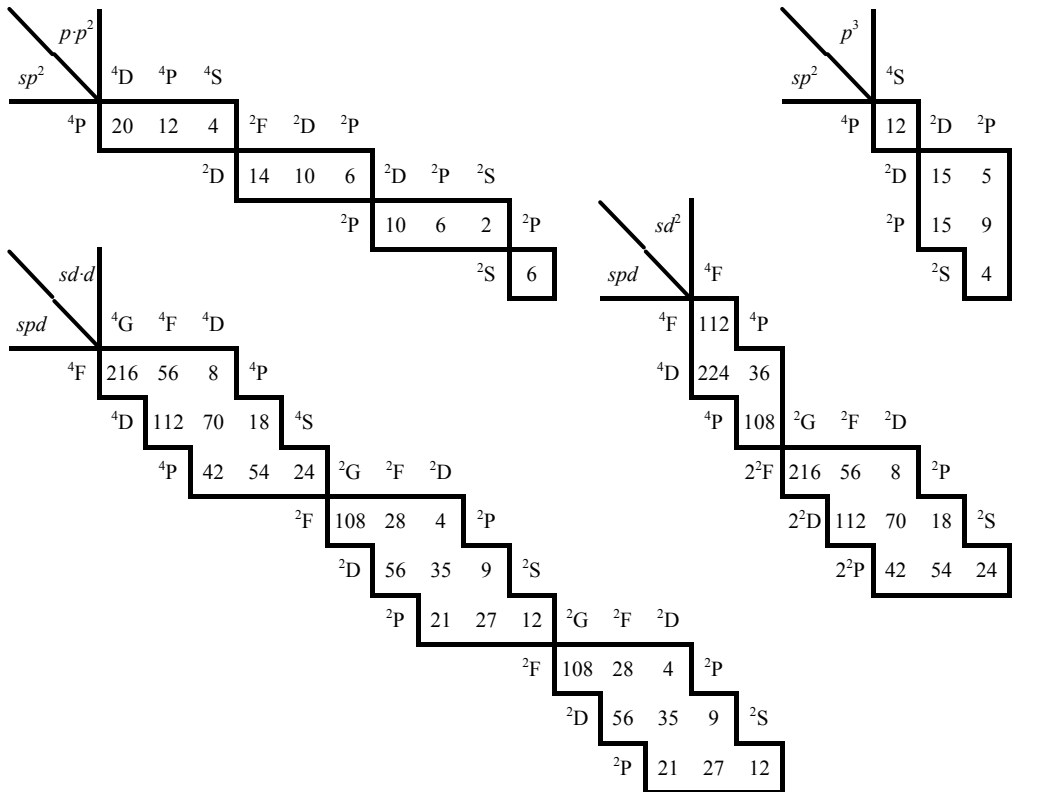
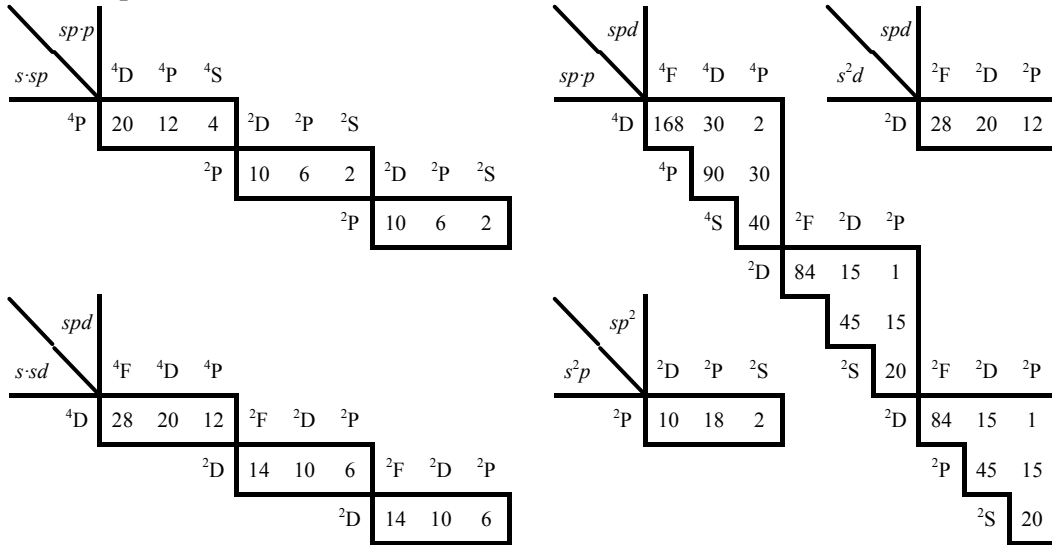
$s \rightarrow p$ $^2S \rightarrow ^2P$ 6	$p \rightarrow d$ $^2P \rightarrow ^2D$ 60	$d \rightarrow f$ $^2D \rightarrow ^2F$ 210	$f \rightarrow g$ $^2F \rightarrow ^2G$ 504	$g \rightarrow h$ $^2G \rightarrow ^2H$ 990
---	--	---	---	---

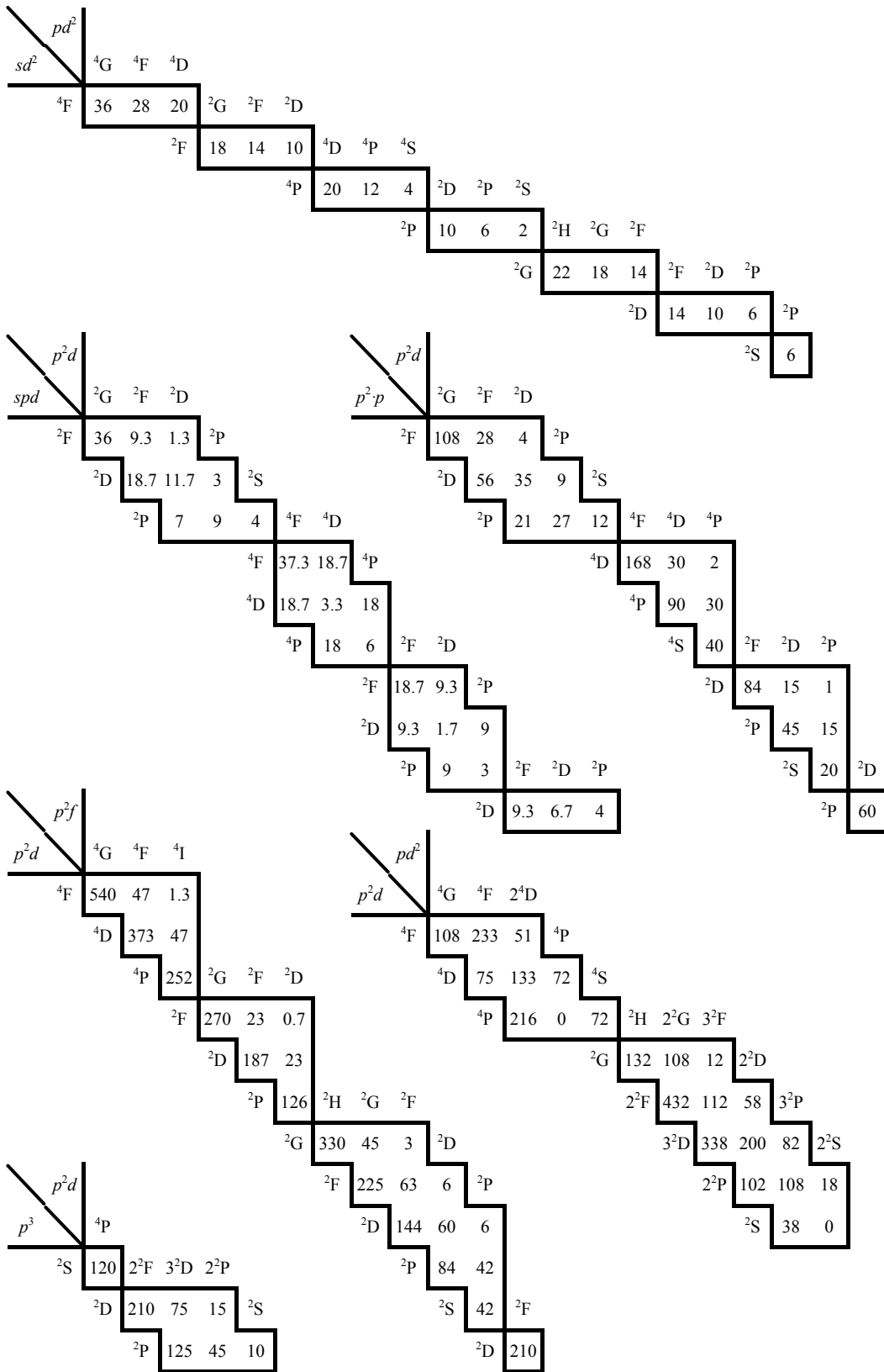
2 электрона

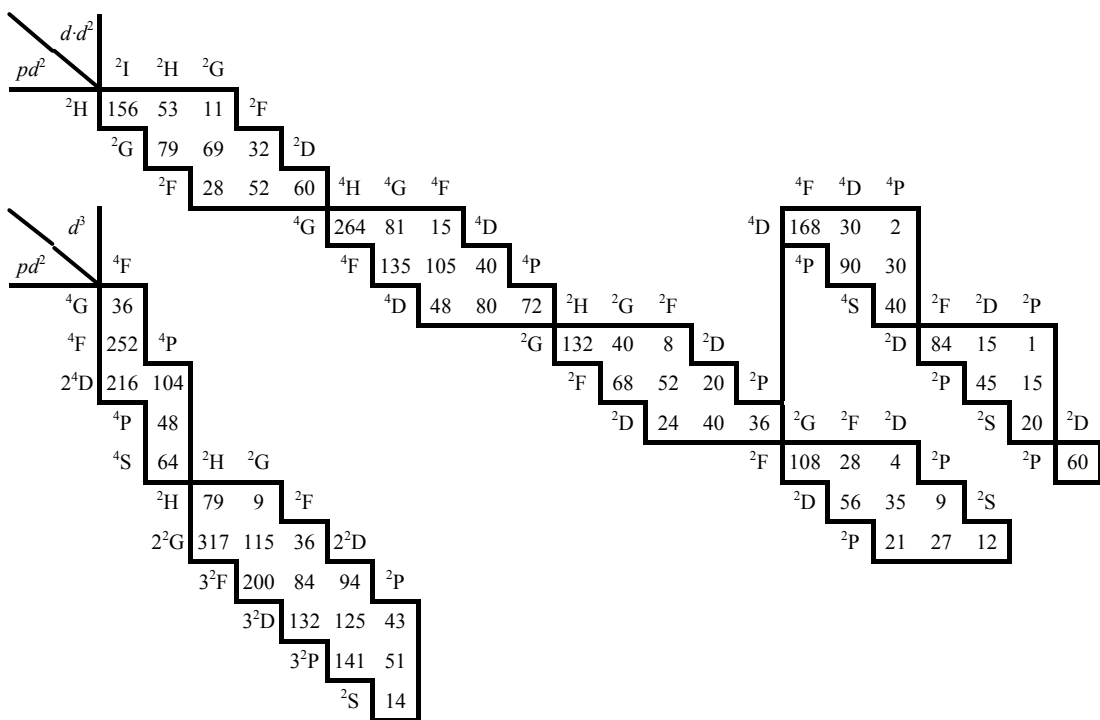
$s-s \rightarrow sp$ $^3S \rightarrow ^3P$ 9	$s^2 \rightarrow sp$ $^1S \rightarrow ^1P$ 6	$sp \rightarrow p-p$ $^3P \rightarrow ^3D, ^3P, ^3S$ 15 9 3	$sp \rightarrow p^2$ $^3P \rightarrow ^3P$ 18	$^1P \rightarrow ^1S$ 3	$^1D \rightarrow ^1P$ 5 3 1	$^1P \rightarrow ^1S$ 10 2					
$sp \rightarrow sd$ $^3P \rightarrow ^3D$ 90	$sd \rightarrow sf$ $^3D \rightarrow ^3F$ 315	$sd \rightarrow pd$ $^3D \rightarrow ^3F, ^3D, ^3P$ 21 15 9	$sf \rightarrow sg$ $^3F \rightarrow ^3G$ 756	$^1P \rightarrow ^1D$ 30	$^1D \rightarrow ^1P$ 105	$^1D \rightarrow ^1P$ 7 5 3	$^1F \rightarrow ^1D$ 252				
$pp \rightarrow pd$ $^3D \rightarrow ^3F, ^3D, ^3P$ 126 22.5 1.5	$pd \rightarrow p^2$ $^3P \rightarrow ^3D, ^3P$ 135 45	$pd \rightarrow pf$ $^3F \rightarrow ^3G, ^3F, ^3D$ 405 35 1		$^3P \rightarrow ^3S$ 67.5 22.5	$^1D \rightarrow ^1P$ 84 15 1	$^3D \rightarrow ^3P$ 280 35	$^3P \rightarrow ^3D$ 189	$^1G \rightarrow ^1F$ 135 11.7 0.3	$^1D \rightarrow ^1P$ 93.3 11.7	$^1S \rightarrow ^1P$ 10	$^1P \rightarrow ^1S$ 63



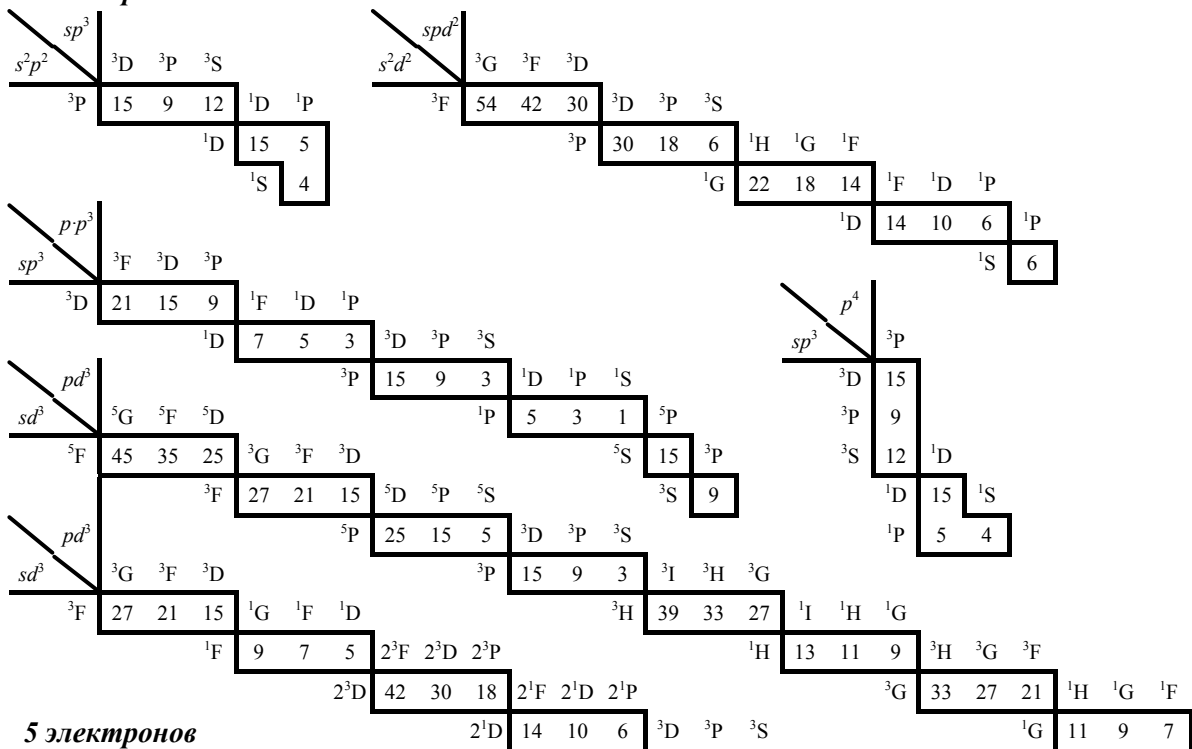
3 электрона



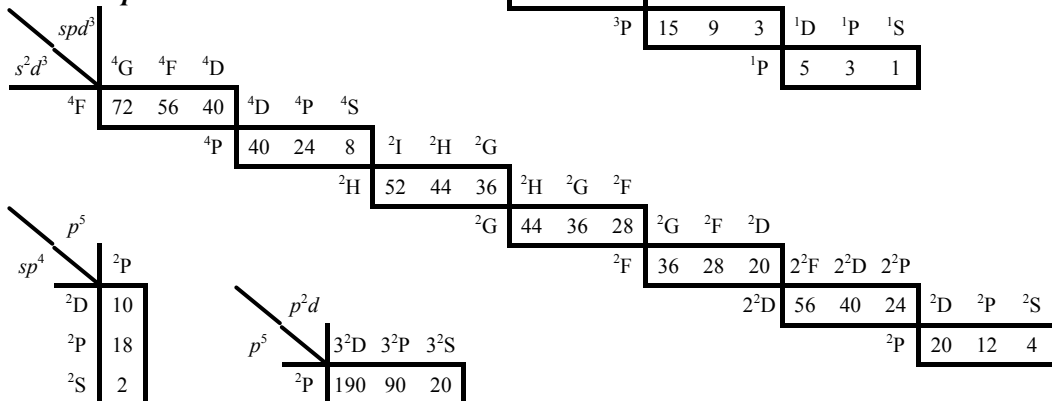




4 электрона



5 электронов



§ 29. Атомные силы осцилляторов для разрешенных переходов

Обозначения, использованные в таблице сил осцилляторов для разрешенных переходов, взяты из § 26. В качестве величины, выражающей интенсивности мультиплетов или линий, выбрана взвешенная сила осциллятора: $g_i f$ для мультиплетов и gf для линий. По ним с помощью соотношений из § 26 можно вычислить силы линий, вероятности переходов, излучательную способность и т. д.

Для того чтобы табличные значения могли охватить по возможности большую область спектра, данные об интенсивности линий ограничены величинами $g_i f$ для всего мультиплета и gf для главной линии. Если удовлетворяются условия применимости правил из § 27, по любой из этих величин можно вычислить gf для других линий; в противном случае надо использовать gf для главной линии и измеренную относительную интенсивность (из первоисточников). Заметим, в частности, что столбец gf относится только к линиям, определенным двумя предыдущими столбцами, даже если в обычной практике они не разрешаются относительно других линий.

Номера мультиплетов взяты из [2, 3] и помечены буквой u , если была использована таблица [3]. В последнем столбце указывается, каким способом были получены приведенные значения: s – вычислено, m – измерено.

Для атомов группы железа $Sc \leftrightarrow Ni$ была сделана попытка исправить прежние измерения за эффект потенциала возбуждения [7]. Исправленные значения помечены буквами adj .

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 29; 2, § 28.
2. Moore C. E., Multiplet Table, исправленные, Princeton, 1945.
3. Moore C. E., Ultra-violet Multiplet Table, N. B. S. Circ. No. 488 (1950, 1952).
4. Green L. C., Rush, Chandler, Ap. J. Supp., 3, 37 (1957).
5. Wiese W. L., Smith, Glennon, Atomic Transition Probabilities, H \leftrightarrow Ne, NSRDS-NBS 4, 1966.
6. Wiese W. L., Smith, Miles, Atomic Transition Probabilities, Na \leftrightarrow Ce, NSRDS-NBS 22, 1969.
7. Allen C. W., M. N., 121, 299 (1960); 152, 295 (1971).
8. Corliss C H., Warner B., Ap. J. Supp., 8, No. 83, 395 (1964); J. Res. N. B. S., 70A, 325 (1966).
9. Tatum J. B., Comm. U. Lond. Obs., No. 41, 1961.
10. Warner B., Mem. R. A. S., 70, 165 (1967).
11. Garz T., Kock M., Astron. Ap., 2, 274 (1969).
12. Goldberg L., Müller, Aller, Ap. J. Supp., 5, 1 (1960).
13. Bell G. D., Tubbs E. F., Ap. J., 159, 1093 (1970).
14. Corliss C H., J. Res. N. B. S., 69A, 87 (1965).
15. Lambert D. L., Maltia, Warner, M. N., 142, 71 (1969).
16. Penkin N. P., J. Q. S. R. T., 4, 41 (1964).
17. Miles B. M., Wiese W. L., N. B. S. Tech. Note, 474 1969.
18. Friedrich H., Treffitz E., J. Q. S. R. T., 9, 333 (1969).
19. Lawrence G. M., Link, King, Ap. J., 141, 293 (1965).
20. Friedrich H., Treffitz E., размноженный отчет, 1970.
21. Bridges J. M., Wiese W. L., Ap. J., 161, L71 (1970).
22. Blackwell D. E., Collins B. S., M. N., 157, 255 (1972).

Атомные силы осцилляторов для разрешенных переходов

Атом	Переход	Мультиплет			Линия			Примечания
		№	Обозначение	$g_i f$	J	$\lambda, \text{Å}$	gf	
H I Серия Лай- мана	$L\alpha\ 1s-2p$	1u	$^2S-^2P^0$	0,8324	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	1215	0,5549	с [1, 4] То же » » » » » » » » » » »
	$L\beta\ 1s-3p$	2u	$^2S-^2P^0$	0,1582	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	1025	0,1055	
	$L\gamma\ 1s-4p$	3u	$^2S-^2P^0$	0,0580	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	972	0,0387	
	$L\delta\ 1s-5p$	4u	$^2S-^2P^0$	0,0279	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	949	0,0186	
	$L\epsilon\ 1s-6p$	5u	$^2S-^2P^0$	0,0156	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	937	0,0104	
	$L\zeta\ 1s-7p$	6u	$^2S-^2P^0$	0,0096	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	930	0,0064	
	$L\eta\ 1s-8p$	7u	$^2S-^2P^0$	0,0064	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	926	0,0043	
	$L\theta\ 1s-9p$	8u	$^2S-^2P^0$	0,0044	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	923	0,0029	
	$L\iota\ 1s-10p$	9u	$^2S-^2P^0$	0,0032	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	920	0,0021	
	$L\kappa\ 1s-11p$	10u	$^2S-^2P^0$	0,0024	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	919	0,0016	
	$L\lambda\ 1s-12p$	11u	$^2S-^2P^0$	0,0018	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	918	0,0012	
	Предельный $1s-np$			$3,2n^{-3}$	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	912	$2,1n^{-3}$	
	Сумма			1,1282				
$1s$ континуум			0,8178					

Атом	Переход	Мультиплет			Линия			Примечания	
		№	Обозначение	$g_i f$	J	$\lambda, \text{Å}$	$g f$		
Серия Бальмера	2s-3p		$^2S-^2P^0$	0,8697	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	6562	0,5798	с [1, 4]	
	2p-3s		$^2P^0-^2S$	0,0815	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	6562	0,0543		
	2p-3d		$^2P^0-^2D$	4,1747	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	6562	2,5048		
	Ha	1			5,1260		6562		»
	2s-4p		$^2S-^2P^0$	0,2055	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4861	0,1370		
	2p-4s		$^2P^0-^2S$	0,0183	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4861	0,0122		
	2p-4d		$^2P^0-^2D$	0,7308	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4861	0,4385	»	
	Hβ	1			0,9546		4861		
	2s-5p		$^2S-^2P^0$	0,0839	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4340	0,0559		
	2p-5s		$^2P^0-^2S$	0,0073	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4340	0,0049	»	
	2p-5d		$^2P^0-^2D$	0,2262	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4340	0,1597		
	Hγ	1			0,3573		4340		
	2s-6p		$^2S-^2P^0$	0,0432	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4101	0,0288	»	
	2p-6s		$^2P^0-^2S$	0,0037	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4101	0,0025		
	2p-6d		$^2P^0-^2D$	0,1298	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4101	0,0778		
	Hδ	1			0,1767		4101	»	
	2s-7p		$^2S-^2P^0$	0,0255	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3970	0,0170		
	2p-7s		$^2P^0-^2S$	0,0022	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3970	0,0015		
	2p-7d		$^2P^0-^2D$	0,0740	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	3970	0,0444	»	
	Hε	1			0,1016		3970		
	2s-8p		$^2S-^2P^0$	0,0164	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3889	0,0108		»
	2p-8s		$^2P^0-^2S$	0,0014	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3889	0,0009		
	2p-8d		$^2P^0-^2D$	0,0465	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	3889	0,0279		
	Hζ	2			0,0643		3889	»	
	Hη n = 9	2			0,0434		3835		
	Hθ 10	2			0,0308		3797		
	Hι 11	2			0,0227		3770	»	
	Hκ 12	2			0,0172		3750		
	Предельный 2s-np		$^2S-^2P^0$	$7,4n^{-3}$	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3646	$4,9n^{-3}$		»
	2s-ns		$^2P^0-^2S$	$0,7n^{-3}$	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3646	$0,5n^{-3}$		
	2s-nd		$^2P^0-^2D$	$19,8n^{-3}$	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	3646	$11,8n^{-3}$		
	H(n)			$28 n^{-3}$		3646		»	
	Полный 2s-np		$^2S-^2P^0$	1,27	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$		0,85		»
2s-ns		$^2P^0-^2S$	0,12	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$		0,08			
2s-nd		$^2P^0-^2D$	5,54	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$		3,35			
Сумма			6,93				»		
2s-p континуум			0,724						
2p-s »			0,048						
2p-d »			1,128				»		
Бальмеровский »			1,900						
3s-4p		$^2S-^2P^0$	0,970	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	18 751	0,647		»	
3p-4s		$^2P^0-^2S$	0,19	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	18 751	0,128			
3p-4d		$^2P^0-^2D$	3,72	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	18 751	2,23			
3d-4p		$^2D-^2P^0$	0,110	$2\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	18 751	0,066	»		
3d-4f		$^2D-^2F^0$	10,16	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	18 751	5,80			
Pα			15,158		18 751				
3s-5p		$^2S-^2P^0$	0,242	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	12 818	0,161	»		
3p-5s		$^2P^0-^2S$	0,043	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	12 818	0,029			
3p-5d		$^2P^0-^2D$	0,835	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	12 818	0,500			
3d-5p		$^2D-^2P^0$	0,022	$2\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	12 818	0,013	»		
3d-5f		$^2D-^2F^0$	1,565	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	12 818	0,894			
Pβ	8			2,710		12 818			
Pγ	8			1,005		10 938	»		
Pδ	8			0,498		10 049			
Pε	8			0,289		9 545			
Pζ	8			0,184		9 229	»		
Pη	9			0,126		9 014			
Pθ	9			0,090		8 862			
Серия Брэкета	4s-5p		$^2S-^2P^0$	1,09	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	40 512	0,73	»	
	4p-5s		$^2P^0-^2S$	0,318	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	40 512	0,212		
	4p-5d		$^2P^0-^2D$	3,66	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	40 512	2,20		
	4d-5p		$^2D-^2P^0$	0,273	$2\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	40 512	0,164		
	4d-5f		$^2D-^2F^0$	8,90	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	40 512	5,09		
	4f-5d		$^2F^0-^2D$	0,124	$3\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	40 512	0,071		
	4f-5g		$^2F^0-^2G$	18,83	$3\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	40 512	10,45		

Атом	Переход	Мультиплет			Линия			Примечания		
		№	Обозначение	$g_i f$	J	$\lambda, \text{Å}$	$g f$			
Серия Брэкетта	V α			33,21		40 512		с [1, 4]		
	V β			5,74		26 252				
	V γ			2,10		21656				
	V δ			1,03		19 445				
He II Li III Be IV B V He I	Значения $g_i f$ и $g f$ для линий водородоподобных ионов такие же, как для аналогичных линий водорода.									
He I	$1s^2-1s2p$	2u	$1S-1P^0$	0,276	0-1	584	0,276	с [1, 5]		
	$1s^2-1s3p$	3u	$1S-1P^0$	0,073	0-1	537	0,073			
	$1s^2-1s4p$	4u	$1S-1P^0$	0,030	0-1	522	0,030			
	$1s2s-1s2p$	1	$3S-3P^0$	1,62	1-2	10 830	0,90		»	
	$1s2s-1s3p$			$1S-1P^0$	0,376	0-1	20 581		0,376	
			2	$3S-3P^0$	0,193	1-2	3 888		0,107	
	$1s2s-1s4p$		4	$1S-1P^0$	0,151	0-1	5 015		0,151	
			3	$3S-3P^0$	0,069	1-2	3 187		0,39	
	$1s2p-1s3s$		5	$1S-1P^0$	0,051	0-1	3 964		0,051	
			10	$3P^0-3S$	0,624	2-1	7 065		0,347	
	$1s2p-1s4s$		45	$1P^0-1S$	0,144	1-0	7 281		0,144	
			12	$3P^0-3S$	0,106	2-1	4 713		0,059	
	$1s2p-1s3d$		47	$1P^0-1S$	0,025	1-0	5 047		0,025	
			11	$3P^0-3D$	5,48	2-3	5 875		2,56	
	$1s2p-1s4d$		46	$1P^0-1S$	2,13	1-2	6 678		2,13	
			14	$3P^0-3D$	1,12	2-3	4 471		0,52	
	$1s2p-1s5d$		48	$1P^0-1D$	0,36	1-2	4 921		0,36	
			18	$3P^0-3D$	0,427	2-3	4 026		0,199	
	$1s3s-1s3p$		51	$1P^0-1D$	0,131	1-2	4 387		0,131	с [5]
				$3S-3P^0$	2,69	1-2	42 947		1,50	
			$1S-1P^0$	0,629	0-1	74 351	0,629			
			$3S-3P^0$	0,129	1-2	12 528	0,072			
$1s3s-1s4p$			$1S-1P^0$	0,140	0-1	15 083	0,140			
			$2S-2P^0$	1,51	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	6 707	1,00	То же		
Li I	$2s-2p$	1	$2S-2P^0$	1,01	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3 130	0,67	»		
Be II	$2s-2p$	1	$2S-2P^0$	1,01	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3 130	0,67	»		
C I	$2p3s-2p3p$	1	$3P^0-3D$	4,5	2-3	10 691	2,1	с [1, 5]		
		10	$1P^0-1S$	0,33	1-0	8 335	0,33			
	$2p3s-2p4p$	4	$3P^0-3D$	0,023	2-3	5 041	0,011			
		6	$3P^0-3P$	0,05	2-2	4 771	0,020			
		11	$1P-1P^0$	0,021	1-1	5 380	0,021			
		12	$1P^0-1D$	0,033	1-2	5 052	0,033			
		13	$1P^0-1S$	0,016	1-0	4 932	0,016			
C II	$2s^2 2p-2s 2p^2$	1u	$2P^0-2D$	1,6	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	1 335	1,0	То же		
		4u	$2P^0-2S$	0,27	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	858	0,18			
	$2p-3s$	5u	$2P^0-2D$	1,5	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	687	0,9			
	$2p-3d$	2	$2S-2P^0$	1,8	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	6 578	1,2			
	$2s-3p$	4	$2P^0-2S$	0,86	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3 920	0,57			
	$3p-4s$	3	$2P^0-2D$	3,5	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	7 234	2,1			
	$3d-4f$	6	$2D-2F^0$	9,4	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 267	5,4			
C III	$2s^2-2s 2p$	1u	$1S-1P^0$	0,8	0-1	977	0,8	»		
	$2s^2-2s 3p$	2u	$1S-1P^0$	0,26	0-1	386	0,26			
C III	$2s^2-2s 3p$	1	$3S-3P^0$	2,3	1-2	4 647	1,3	»		
C IV	$2s-2p$	1u	$2S-2P^0$	0,57	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	1 549	0,38			
C IV	$2s-3p$	2u	$2S-2P^0$	0,40	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	312	0,27	»		
	$3s-3p$	1	$2S-2P^0$	0,96	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	5 804	0,64			
C V	$1s^2-1s 1p$		$1S-1P^0$	0,65	0-1	40	0,65	с [5]		
N I	$2p^2 3s-2p^2 3p$	1	$4P-4D^0$	4,3	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	8 680	1,7	с [1, 5]		
		8	$2P-2P^0$	1,90	$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	8 629	1,07			
	$2p^2 3s-2p^2 4p$	6	$4P-4S^0$	0,025	$2\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 151	0,014			
N II	$2s^2 2p^2-2s 2p^3$	1u	$3P-3D^0$	1,5	2-3	1 085	0,7	»		
		3	$3P^0-3D$	4,1	2-3	5 679	1,9			
	$2p 3s-2p 3p$	12	$1P^0-1D$	1,9	1-2	3 995	1,9			
N III	$2p 3p-2p 3d$	19	$3D-3F^0$	9,5	3-4	5 004	4,1	»		
	$2s^2 2p-2s 2p^2$	1u	$2P^0-2D$	1,1	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	991	0,6			
	$3s-3p$	1	$2S-2P^0$	1,5	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 097	0,97			
	$2s 2p 3s-2s 2p 3p$	3	$4P^0-4D$	4,3	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 514	1,7			

Атом	Переход	Мультиплет			Линия			Примечания
		№	Обозначение	g, f	J	$\lambda, \text{Å}$	g, f	
N IV	$2s^2-2s2p$	1u	$1S-1P^0$	0,7	0-1	765	0,7	с [1, 5]
	$2s^2-2s3p$	2u	$1S-1P^0$	0,5	0-1	247	0,5	
	$2s3s-2s3p$	1	$3S-3P^0$	1,9	1-2	3 479	1,06	
	$2s3p-2s3d$	3	$1P^0-1D$	0,94	1-2	4 057	0,94	
N V	$2s-2p$	1u	$2S-2P^0$	0,47	$1/2-1/2$	1 238	0,31	То же
	$2s-3p$	2u	$2S-2P^0$	0,47	$1/2-1/2$	209	0,31	
	$3s-3p$	1	$2S-2P^0$	0,79	$1/2-1/2$	4 603	0,53	
N VI	$1s^2-1s2p$		$1S-1P^0$	0,67	0-1	28	0,67	»
	$2p^4-2p^33s$	2u	$3P-3S^0$	0,3	2-1	1 302	0,16	»
		5u	$3P-3D^0$	0,4	2-3	988	0,24	
O I	$2p^33s-2p^33p$	1	$5S^0-5P$	4,6	2-3	7 771	2,1	
		4	$3S^0-3P$	2,7	1-2	8 446	1,5	
O II	$2p^33s-2p^34p$	5	$3S^0-3P$	0,017	1-2	4 368	0,010	
	$2p^33p-2p^34d$	10	$5P-5D^0$	1,00	3-4	6 158	0,36	
	$2p^3-2p^23d$	3u	$4S^0-4P$	1,3	$1/2-2/2$	430	0,7	»
	$2s^22p^3-2s2p^4$	1u	$4S^0-4P$	1,8	$1/2-2/2$	834	0,9	
O III	$2p^23s-2p^23p$	1	$4P-4D^0$	6,6	$2/2-3/2$	4 649	2,6	
		3	$4P-4S^0$	1,5	$2/2-1/2$	3 749	0,76	
	$2p^23p-2p^23d$	20	$4P^0-4D$	7,4	$2/2-3/2$	4 119	3,0	
	$2s^22p^2-2s2p^3$	1u	$3P-3D^0$	1,4	2-3	835	0,6	»
O IV	$2p3s-2p3p$	2u	$3P-3P^0$	1,6	2-2	703	0,7	
	$2p3p-2p3d$	2	$3P^0-3D$	3,4	2-3	3 759	1,6	
	$2p-3d$	14	$3P-3P^0$	3,4	2-3	3 715	1,6	
O V	$2s^22p-2s2p^2$	5u	$2P^0-2D$	3,0	$1/2-2/2$	238	1,7	»
	$2s2p3s-2s2p3p$	1u	$2P^0-2D$	0,9	$1/2-2/2$	790	0,5	
		3	$4P^0-4D$	3,6	$2/2-3/2$	3 385	1,5	
O VI	$2s^2-2s2p$	1u	$1S-1P^0$	0,5	0-1	629	0,5	»
	$2s^2-2s3p$	2u	$1S-1P^0$	0,6	0-1	172	0,6	
	$2p3s-2p3p$	4	$3P^0-3D$	1,9	2-3	4 123	0,9	
O VII	$2p3p-2p3d$	11	$3S-3P^0$	0,60	1-2	4 158	0,33	
	$2s-2p$	1u	$2S-2P^0$	0,39	$1/2-1/2$	1 031	0,26	»
	$2s-3p$	2u	$2S-2P^0$	0,52	$1/2-1/2$	150	0,35	
Ne I	$2s-3p$	1	$2S-2P^0$	0,67	$1/2-1/2$	3 811	0,45	
	$1s^2-1s2p$		$1S-1P^0$	0,69	0-1	21	0,69	»
	$2p^53s-2p^53p$	1		4,0	$1/2-2/2$	6 402	1,9	с [5]
Ne II	$2p^43s-2p^43p$	1	$4P-4P^0$	3,2	$2/2-2/2$	3 694	1,2	То же
Ne VI	$2p-3d$		$3P^0-2D$	3,2	$1/2-2/2$	122	1,9	»
Ne VII	$2s^2-2s2p$		$1S-1P^0$	0,6	0-1	465	0,6	»
Ne VIII	$2s-2p$		$2S-2P^0$	0,30	$1/2-1/2$	770	0,20	»
Ne IX	$1s^2-1s2p$		$1S-1P^0$	0,72	0-1	13	0,72	»
Na I	$3s-3p$	1	$2S-2P^0$	1,96	$1/2-1/2$	5 889	1,31	с, m
	$3s-4p$	2	$2S-2P^0$	0,028	$1/2-1/2$	3 302	0,019	[1, 5]
	$3p-4s$	3	$2P^0-2S$	0,98	$1/2-1/2$	11 403	0,65	
	$3p-5s$	5	$2P^0-2S$	0,082	$1/2-1/2$	6 160	0,055	
	$3p-6s$	8	$2P^0-2S$	0,026	$1/2-1/2$	5 153	0,018	
	$3p-3d$	4	$2P^0-2D$	5,0	$1/2-2/2$	8 194	3,0	
	$3p-4d$	6	$2P^0-2D$	0,63	$1/2-2/2$	5 688	0,38	
	$3p-5d$	9	$2P^0-2D$	0,19	$1/2-2/2$	4 982	0,11	
	$3s^2-3s3p$	1u	$1S-1P^0$	1,6	0-1	2 852	1,6	с, m
		1	$1S-3P^0$	0,054	0-1	4 571	0,054	[1, 5, 20]
Mg I	$3s3p-3s4s$	2	$3P^0-3S$	1,6	2-1	5 183	0,9	
		6	$1P^0-1S$	0,6	1-0	11 828	0,6	
	$3s3p-3s5s$	4	$3P^0-3S$	0,15	2-1	3 336	0,08	
	$3s3p-3s3d$	3	$3P^0-3D$	5,6	2-3	3 838	2,6	
		7	$1P^0-1D$	1,2	1-2	8 806	1,2	
	$3s3p-3s4d$	5	$3P^0-3D$	1,2	2-3	3 096	0,56	
	$3s3p-3p^2$	6u	$3P^0-3D$	5,5	2-2	2 779	2,3	
	$3s-3p$	1u	$2S-2P^0$	1,9	$1/2-1/2$	2 795	1,25	То же
Mg II	$3p-4s$	2u	$2P^0-2S$	0,83	$1/2-1/2$	2 936	0,56	
	$3p-3d$	3u	$2P^0-2D$	5,5	$1/2-2/2$	2 797	3,3	
	$3d-4f$	4	$2D-2F^0$	9,5	$2/2-3/2$	4 481	5,4	
	$4p-4d$	8	$2P^0-2D$	7,4	$1/2-2/2$	7 896	4,4	
Mg IX	$2s^2-2s2p$		$1S-1P^0$	0,31	0-1	368	0,31	[1, 5, 20]
Mg X	$2s-2p$		$2S-2P^0$	0,25	$1/2-1/2$	609	0,17	То же
	$2s-3p$		$2S-2P^0$	0,64	$1/2-1/2$	57	0,42	

Атом	Переход	Мультиплет			Линия			Примечания	
		№	Обозначение	g, f	J	$\lambda, \text{Å}$	g, f		
Mg XI	$1s^2-1s2p$		$^1S-^1P^0$	0,74	0-1	9	0,74		
Al I	$3p-4s$	1	$^2P^0-^2S$	0,69	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	3 961	0,46	с[1, 5]	
	$4s-5p$	5	$^2S-^2P^0$	0,07	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	6 696	0,04		
	$3p-3d$	3	$^2P^0-^2D$	1,05	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	3 092	0,63		
Al II	$3s^2-3s3p$	2a	$^1S-^1P^0$	1,8	0-1	1 670	1,8	То же	
	$3s3p-3s4s$	4u	$^3P^0-^3S$	1,16	2-1	1 862	0,64		
Al III	$3s-3p$	1u	$^2S-^2P^0$	1,75	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	1 854	1,17	»	
	$4s-4p$	2	$^2S-^2P^0$	2,6	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	5 696	1,7		
Al X	$2s^2-2s2p$		$^1S-^1P^0$	0,29	0-1	332	0,29	»	
Si I	$3p^2-3p4s$	1u	$^3P-^3P^0$	1,4	2-2	2 516	0,6	с [1, 5]	
		43u	$^1D-^1P^0$	0,7	2-1	2 881	0,7		
		3	$^1S-^1P^0$	0,14	0-1	3 905	0,14		
	$3p^2-3p3d$	3u	$^3P-^3D^0$	0,6	2-3	2 216	0,3		
	$3p4s-3p4p$	4	$^3P^0-^3D$	5,5	2-3	12 031	2,6		
		5	$^3P^0-^3P$	3,5	2-2	10 827	1,5		
		6	$^3P^0-^3S$	1,2	2-1	10 585	0,7		
	Si II	$4s-4p$	2	$^2S-^2P^0$	2,5	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	6 347		1,7
		$3d-4f$	3	$^2D-^2F^0$	5,1	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 130		2,9
		$3s^23p-3s3p^2$	1u	$^2P^0-^2D$	0,04	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	1 816		0,02
$3p-3d$		4u	$^2P^0-^2D$	7	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	1 264	4		
Si III	$3p-4s$	2u	$^2P^0-^2S$	0,8	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	1 533	0,5		
	$3p-4d$	6u	$^2P^0-^2D$	1,2	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	992	0,7		
	$3s^2-3s3p$	2u	$^1S-^1P^0$	1,7	0-1	1 206	1,7		
Si IV	$3s4s-3s4p$	2	$^3S-^3P^0$	3,5	1-2	4 552	2,0		
		4	$^1S-^1P^0$	0,7	0-1	5 739	0,7		
	$3s-3p$	1u	$^2S-^2P^0$	1,61	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	1 393	1,08		
	$3s-4p$	2u	$^2S-^2P^0$	0,07	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	457	0,05		
Si XI	$4s-4p$	1	$^1S-^2P^0$	2,3	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 088	1,56		
	$2s^2-2s2p$	1	$^1S-^1P^0$	0,27	0-1	303	0,27		
Si XII	$2s-2p$		$^2S-^2P^0$	0,22	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	499	0,15		
S I	$3p^24s-3p^24p$	1	$^5S^0-^5P$	5,5	2-3	9 212	2,6		
S II	$3s^23p^3-3s3p^4$	1u	$^4S^0-^4P$	0,11	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	1 259	0,05		
S IV	$3p-4s$	5u	$^2P^0-^2S$	0,5	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	554	0,4		
S V	$3s^2-3s3p$	1u	$^1S-^1P^0$	1,46	0-1	786	1,46		
	$3s3p-3s3d$	3u	$^3P^0-^3D$	6,3	2-3	663	3,0		
K I	$4s-4p$	1	$^2S-^2P^0$	2,04	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	7 664	1,36		
	$4s-5p$	3	$^2S-^2P^0$	0,018	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 044	0,012		
	$4s^2-4s4p$	2	$^1S-^1P^0$	1,75	0-1	4 226	1,75		
Ca I		1	$^1S-^3P^0$	0,0 ⁴⁵	0-1	6 572	0,045	с, m [1, 5]	
	$4s4p-4s5s$	3	$^3P^0-^3S$	1,12	2-1	6 162	0,60		
	$4s4p-4s6s$	6	$^3P^0-^3S$	0,15	2-1	3 973	0,08		
	$4s4p-4s5d$	4	$^3P^0-^3D$	3,2	2-3	4 454	1,5		
	$4s4p-4s5d$	9	$^3P^0-^3D$	1,0	2-3	3 644	0,45		
	$4s4p-4s6d$	11	$^3P^0-^3D$	0,5	2-3	3 361	0,24		
	$4s4p-4p^2$	5	$^3P^0-^3P$	4,6	2-2	4 302	1,9		
	$3d4s-3d4p$	21	$^3D-^3D^0$	4,5	3-3	5 588	1,9		
	Ca II	$4s-4p$	1	$^2S-^2P^0$	2,1	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3 933		1,38
		$3d-4p$	2	$^2D-^2P^0$	0,72	$2\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	8 542		0,43
$4p-5s$		3	$^2P^0-^2S$	1,0	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	3 736	0,7		
$4p-4d$		4	$^2P^0-^2D$	5,5	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	3 179	3,3		
Sc I	$3d^24s-3d^24p$	12	$^4F-^4G^0$	7,8	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	5 671	2,6	m [7]	
		14	$^4F-^4D^0$	5,6	$4\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 743	1,9		
		15	$^2F-^2G^0$	3,8	$3\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	5 520	2,1		
	16	$^2F-^2F^0$	3,9	$3\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	5 481	2,2			
	$3d4s^2-3d4s4p$	5	$^2D-^2F^0$	0,03	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 779	0,02		
	6	$^2D-^2P^0$	0,3	$2\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 082	0,2			
Ti I	$3d^34s-3d^34p$	38	$^5F-^5G^0$	13	5-6	4 981	4	m [9] adj	
		42	$^5F-^5F^0$	10	5-5	4 533	3		
		104	$^3F-^3G^0$	1,4	4-5	6 258	0,4		
		145	$^6P-^6D^0$	5	3-4	4 617	1,6		
	$3d^24s^2-3d^24s4p$	4	$^3F-^3F^0$	0,35	4-4	5 210	0,14		
	6	$^3F-^3G^0$	0,18	4-5	4 681	0,08			
	12	$^3F-^3F^0$	2,2	4-4	3 998	0,8			
	24	$^3F-^3G^0$	2,6	4-5	3 371	1,2			
	$3d^34s-3d^24s4p$	110	$^3F-^3G^0$	3,7	4-5	5 035	1,5		

Атом	Переход	Мультиплет			Линия			Примечания		
		№	Обозначение	$g_i f$	J	$\lambda, \text{Å}$	$g f$			
Ti II	$3d^2 4s-3d^2 4p$	1	$^4F-^4G^0$	5	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	3 349	1,7	m [9, 10] adj		
		2	$^4F-^4F^0$	5	$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	3 234	1,4			
		7	$^4F-^4F^0$	2	$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	3 322	0,7			
		34	$^2G-^2G^0$	1,3	$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	3 900	0,7			
		41	$^4P-^4D^0$	0,9	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 300	0,3			
	V I	$3d^4 4s-3d^4 4p$	82	$^2H-^2G^0$	1,1	$5\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	4 549		0,6	m [7] adj
			21	$^6D-^6P^0$	1,9	$4\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 460		0,7	
			22	$^6D-^6F^0$	13	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	4 379		4	
			27	$^6D-^6D^0$	9	$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	4 111		2,5	
			35	$^4D-^4F^0$	4	$3\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	5 727		1,0	
V II		$3d^3 4s^2-3d^3 4s 4p$	88	$^4H-^4H^0$	6	$6\frac{1}{2}-6\frac{1}{2}$	4 268	2	m [10] adj	
			109	$^4F-^4G^0$	4	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	4 545	1,3		
			4	$^4F-^4G^0$	0,6	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	4 594	0,23		
			14	$^4F-^4G^0$	11	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	3 185	3		
			29	$^6D-^6P^0$	4	$4\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	3 703	1,5		
	Cr I	$3d^5 4s-3d^5 4p$	41	$^4D-^4F^0$	4	$3\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	4 090	1,9		m [7] adj
			125	$^6F^0-^6F$	2,5	$5\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	5 193	0,8		
			114	$^6G^0-^6H$	12	$6\frac{1}{2}-7\frac{1}{2}$	3 695	3		
			1	$^5F-^5G^0$	10	5-6	3 093	3		
			5	$^3F-^3D^0$	2,5	4-3	3 556	1,0		
Mn I		$3d^6 4s-3d^6 4p$	25	$^5P-^5D^0$	0,16	3-4	4 202	0,06	m [7] adj [22]	
			1	$^7S-^7P^0$	1,4	3-4	4 254	0,6		
			7	$^5S-^5P^0$	2,6	2-3	5 208	1,2		
			38	$^5G-^5H^0$	11	6-7	3 963	3		
			22	$^5D-^5F^0$	1,3	4-5	4 351	0,4		
	Fe I	$3d^5 4s-3d^5 4s 4p$	4	$^7S-^7P^0$	4	3-4	3 578	1,7		m [7, 8, 11] adj
			43	$^5G-^5G^0$	10	6-6	3 743	3		
			5	$^6D-^6D^0$	7	$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	4 041	2,3		
			6	$^6D-^6F^0$	6	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	3 806	2		
			2	$^6S-^6P^0$	0,7	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 030	0,35		
Fe II		$3d^5 4s 4p-3d^5 4s 4d$	1u	$^6S-^6P^0$	5	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	2 794	2,4	m [7, 8, 11] adj [11, 21]	
			18	$^8P^0-^8D$	12	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	3 569	4		
			20	$^5F-^5D^0$	3,7	5-4	3 820	1,4		
			23	$^5F-^5G^0$	3,2	5-6	3 581	1,2		
			41	$^3F-^5G^0$	4,6	4-5	4 383	2,3		
	Co I	$3d^7 4s^2-3d^6 4s 4p$	42	$^3F-^3G^0$	4,2	4-5	4 271	0,9		[10] [7] adj
			43	$^3F-^3F^0$	5,0	4-4	4 045	1,9		
			45	$^3F-^3D^0$	3,5	4-3	3 815	1,1		
			4	$^5D-^5D^0$	0,7	4-4	3 859	0,21		
			5	$^5D-^5F^0$	1,1	4-5	3 719	0,35		
Ni I		$3d^7 4s 4p-3d^6 4s 5s$	2	$^5D-^7F^0$	0,010	4-5	4 375	0,003	[10] [7] adj [14]	
			15	$^5F-^5D^0$	0,018	5-4	5 269	0,07		
			68	$^5P-^5D^0$	0,9	3-4	4 528	0,2		
			152	$^7D^0-^7D$	4	5-5	4 260	1,2		
			27	$^4P-^4D^0$	0,10	$2\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 233	0,04		
	Co I	$3d^8 4s-3d^8 4p$	38	$^4F-^4D^0$	0,16	$4\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	4 583	0,06		[7] adj
			22	$^4F-^4G^0$	7	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	3 453	3,0		
			23	$^4F-^4F^0$	6	$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	3 405	2,0		
			35	$^2F-^2F^0$	3,6	$3\frac{1}{2}-3\frac{1}{2}$	3 569	2,1		
			5	$^4F-^4G^0$	0,7	$4\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	3 465	0,4		
Ni I		$3d^8 4s-3d^7 4s 4p$	28	$^2F-^2G^0$	1,2	$3\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	4 121	0,5	[7] adj [14]	
			62	$^4P-^4P^0$	0,6	$2\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	3 732	0,2		
			158	$^6G^0-^6F$	4	$6\frac{1}{2}-5\frac{1}{2}$	4 867	1,0		
			19	$^3D-^3F^0$	2,9	3-4	3 414	0,8		
			35	$^1D-^1F^0$	1,4	2-3	3 619	1,4		
	Ni I	$3d^8 4s^2-3d^8 4s 4p$	7	$^3F-^3G^0$	0,35	4-5	3 232	0,16		[7] adj [14]
			78	$^3P-^3D^0$	1,0	2-3	3 181	0,6		
			25	$^3D-^3F^0$	4	3-4	3 050	1,0		
			111	$^5F^0-^5F$	2	5-5	5 017	0,6		
			106	$^5G^0-^5H$	16	6-7	3 374	5		
Ni I		$3d^8 4s 4p-3d^8 4s 5s$	123	$^5F^0-^5F$	7	5-5	3 516	2	[7] adj [14]	
			130	$^3P^0-^3P$	1,2	2-2	4 855			
			143	$^3F^0-^3G$	4	4-5	5 080	1,8		
			162	$^3D^0-^3F$	2	3-4	5 084	0,7		
			194	$^1F^0-^1G$	2	3-4	5 081	2		

Атом	Переход	Мультиплет			Линия			Примечания
		№	Обозначение	g, f	J	$\lambda, \text{Å}$	$g f$	
Cu I	$4s-4p$	1	$^2S-^2P^0$	0,7	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	3 247	0,45	[13]
	$3d^9 4s^2-3d^{10} 4p$	2	$^2D-^2P^0$	0,009	$2\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	5 105	0,006	[12]
	$4p-4d$	7	$^2P^0-^2D$	0,55	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	5 218	0,3	
Zn I	$4s4p-4s5s$	2	$^3P^0-^3S$	1,1	2-1	4 810	0,6	[1, 15]
	$4s4p-4s4d$	6	$^1P^0-^1D$	1,1	1-2	6 362	1,1	
Sr I	$5s^2-5s5p$	2	$^1S-^1P^0$	1,7	0-1	4 607	1,7	[1, 16]
	$5s5p-5s6s$	3	$^3P^0-^3S$	1,6	2-1	7 070	0,9	
Sr II	$5s-5p$	1	$^2S-^2P^0$	2,0	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	4 077	1,3	[1, 16]
	$4d-5p$	2	$^2D-^2P^0$	0,8	$2\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	10 327	0,5	
	$5p-6s$	3	$^2P^0-^2S$	1,0	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	4 305	0,7	
Ba I	$6s^2-6s6p$	2	$^1S-^1P^0$	1,6	0-1	5 535	1,6	[16, 17, 18]
Ba II	$6s-6p$	1	$^2S-^2P^0$	2,2	$\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	4 554	1,50	[16, 17]
	$5d-6p$	2	$^2D-^2P^0$	1,2	$2\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	6 141	0,7	
	$6p-6d$	4	$^2P^0-^2D$	6	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4 130	4,0	
Hg I	$6s^2-6s6p$		$^1S-^1P^0$	1,5	0-1	1 849	1,5	[1, 15, 16]
			$^1S-^3P^0$	0,03	0-1	2 536	0,03	
	$6s6p-6s7s$	1	$^3P^0-^3S$	0,9	2-1	5 460	0,45	
	$6s6p-6s6d$	4	$^1P^0-^1D$	2	1-2	5 790	2	
Pb I	$6p-7s$	1	$^3P^0-^3P$	0,26	2-1	4 057	0,14	[15]

§ 30. Вероятности переходов, соответствующих запрещенным линиям

Величина, выражающая интенсивность запрещенной спектральной линии, есть вероятность перехода A . Из § 26 видно, что интенсивность линии обычно пропорциональна $g_2 A_{21}$, где индекс 2 обозначает верхний уровень (который помещен в правой части соответствующего столбца таблицы). Обычно $g_2 = 2J_2 + 1$, но для линии H I 21,1 см мы имеем $g_2 = 1\frac{1}{2}$, $g_1 = \frac{1}{2}$ в принятой системе взвешивания.

Линии, приведенные в таблице, являются запрещенными в том смысле, что они не подчиняются правилу четности, т. е. соответствующие переходы не вызывают изменений четности. Во многих случаях может иметь место излучение и магнитного диполя (m), и электрического квадруполь (e). Доминирующее излучение указывается.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 29; 2, § 29.
2. Wiese W. L., Smith, Glennon, Miles, Atomic Transition Probabilities 1, H \leftrightarrow Ne; 2, Na \leftrightarrow Ca, NSRDS-NBS 4, 22, 1966, 1969.
3. Garstang R. H., Planetary Nebulae, IAU Symp., 34, 143 (1968).
4. Garstang R. H., Les transitions interdites dans le spectres des astres, Colloq. Liège, 35, 1969.
5. Krueger T. K., Czyzak S. J., Mem. R. A. S., 69, 145 (1965); M. N., 144, 1194 (1966).

Запрещенные линии

Атом	Состояние	Обозначение		J	$\lambda, \text{Å}$	$A, \text{с}^{-1}$	m или e
		нижний уровень	верхний уровень				
H I	$1s$		2S	$\frac{1}{2}$	21,1 см	$2,87 \cdot 10^{-16}$	m
C I	$2p^2$		$^1D-^1S$	2-0	8 727	0,6	e
N I	$2p^3$		$^4S^0-^2D^0$	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	5 198	$1,6 \cdot 10^{-5}$	m
			$^4S^0-^2D^0$	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	5 200	$7,0 \cdot 10^{-6}$	e
N II	$2p^2$		$^1D-^1S$	2-0	5 754	1,1	e
			$^3P-^1D$	1-2	6 548	0,0010	m
			$^3P-^1D$	2-2	6 583	0,0030	m
O I	$2p^4$		$^1D-^1S$	2-0	5 577	1,34	e
			$^3P-^1D$	2-2	6 300	0,0051	m
			$^3P-^1D$	1-2	6 363	0,0017	m
O II	$2p^3$		$^3P-^1S$	1-0	2 972	0,07	m
			$^4S^0-^2D^0$	$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	3 728	$4,8 \cdot 10^{-5}$	e
			$^4S^0-^2D^0$	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	3 726	$1,7 \cdot 10^{-4}$	m
O III	$2p^2$		$^2D^0-^2P^0$	$2\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	7 319	0,11	e
			$^2D^0-^2P^0$	$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	7 329	0,10	e
			$^1D-^1S$	2-0	4 363	1,6	e
F IV	$2p^2$		$^3P-^1D$	1-2	4 958	0,007	m
			$^3D-^1D$	2-2	5 006	0,021	m
			$^3P-^1D$	2-2	4 059	0,10	m

Атом	Состояние	Обозначение		J	λ , Å	A, с ⁻¹	m или e
		нижний уровень	верхний уровень				
Ne III	$2p^4$	$^3P - ^1D$		2-2	3 868	0,17	m
		$^3P - ^1D$		1-2	3 967	0,052	m
		$^1D - ^1S$		2-0	3 342	2,8	e
Ne IV	$2p^3$	$^2D^0 - ^2P^0$		$2\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 714	0,40	e
		$^2D^0 - ^2P^0$		$2\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	4 715	0,11	e
		$^2D^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 724	0,44	e
		$^2D^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	4 726	0,44	e
		$^3P - ^1D$		2-2	3 425	0,38	m
Ne V	$2p^2$	$^3P - ^1D$		1-2	3 345	0,14	m
		$^1D - ^1S$		2-0	7 725	1,8	e
S I	$3p^4$	$^4S^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 068	0,34	m
S II	$3p^3$	$^4S^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	4 076	0,13	m
		$^4S^0 - ^2D^0$		$1\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	6 716	0,0005	e
		$^4S^0 - ^2D^0$		$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	6 730	0,0043	e
		$^1D - ^1S$		2-0	6 312	2,5	e
S III	$3p^2$	$^3P - ^1D$		1-2	9 069	0,025	m
		$^4S^0 - ^2D^0$		$1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	5 537	0,007	m
Cl III	$3p^3$	$^1D - ^1S$		2-0	5 322	3,2	e
Cl IV	$3p^2$	$^3P - ^1D$		2-2	8 045	0,20	ш.
		$^1D - ^1S$		2-0	5 191	6	e
Ar III	$3p^4$	$^3P - ^1D$		2-2	7 135	0,3	m
Ar V	$3p^2$	$^3P - ^1D$		1-2	6 435	0,25	m
		$^1D - ^1S$		2-0	4 625	4	e
Ar X	$2p^5$	$^2P^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	5 534	106	m
Ar XIV	$2p$	$^2P^0 - ^2P^0$		$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	4 359	104	m
K IV	$3p^4$	$^1D - ^1S$		2-0	4 511	4	e
		$^3P - ^1D$		2-2	6 101	0,84	m
Ca V	$3p^4$	$^3P - ^1D$		2-2	5 309	1,9	m
Ca XII	$2p^5$	$^2P^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	3 329	484	m
Ca XIII	$2p^4$	$^3P - ^3P$		2-1	4 086	320	m
Ca XV	$2p^2$	$^3P - ^3P$		1-2	5 445	78	m
		$^3P - ^3P$		0-1	5 694	95	m
Fe II	$3d^6 4s$	$^6D - ^4P$		$3\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4 889	0,36	m
		$^6D - ^4F$		$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	4 416	0,46	m
	$3d^6 4s-3d^5 4s^2$	$^6D - ^6S$		$4\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4 287	1,1	e
		$^6D - ^6S$		$3\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4 359	0,83	e
		$^4F - ^2D$		$3\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	5 527	0,27	m
		$^5D - ^3F$		4-4	4 658	0,44	m
Fe III	$3d^6$	$^5D - ^3P$		3-2	5 270	0,40	m
Fe IV	$3d^5$	$^4G - ^4F$		$5\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	4 906	0,32	m
Fe V	$3d^4$	$^5D - ^3F$		4-4	3 891	0,74	m
		$^5D - ^3P$		3-2	3 896	0,71	m
Fe VI	$3d^3$	$^4F - ^4P$		$4\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	5 677	0,05	m
		$^4F - ^2G$		$4\frac{1}{2}-4\frac{1}{2}$	5 176	0,56	m
Fe VII	$3d^2$	$^3F - ^3P$		4-2	5 276	0,06	m
		$^3F - ^1D$		2-2	5 721	0,30	m
Fe X	$3p^5$	$^2P^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	6 374	69	m
Fe XI	$3p^4$	$^3P - ^1D$		1-2	3 987	9,5	m
		$^3P - ^3P$		2-1	7 891	43	m
Fe XIII	$3p^2$	$^3P - ^3P$		0-1	10 747	14	m
		$^3P - ^3P$		1-2	10 798	9,6	m
		$^3P - ^1D$		2-2	3 387	90	m
		$^2P^0 - ^2P^0$		$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	5 303	60	m
Fe XIV	$3p$	$^3P^0 - ^3P^0$		1-2	7 060	38	m
Fe XV	$3s 3p$	$^2D - ^2F$		$2\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	6 667	0,062	m
Ni II	$3d^9-2d^8 4s$	$^2D - ^2D$		$2\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}$	4 326	1,4	m
		$^3F - ^3P$		3-1	6 402	0,038	m
Ni III	$3d^8$	$^2P^0 - ^2P^0$		$1\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	4 231	237	m
Ni XII	$3p^5$	$^3P - ^1D$		1-2	3 643	17	m
		$^3P - ^3P$		2-1	5 116	156	m
Ni XIII	$3p^4$	$^3P - ^3P$		0-1	6 701	56	m
		$^3P - ^3P$		1-2	8 024	22	m
Ni XV	$3p^2$	$^2P^0 - ^2P^0$		$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	3 601	191	m
Ni XVI	$3p$						

§ 31. Силы осцилляторов спектральных полос

При рассмотрении спектров двухатомных молекул силы линий S_{12} из § 26 заменяются электронными, колебательными и вращательными множителями. Для отдельной линии полосы имеем

$$(2J' + 1)f_{em} = (2J'' + 1)f_{abs} = \frac{8\pi^2 m\nu}{3he^2} \times |R_e|^2 \times |R_{v'v''}|^2 \times \sum_{M'M''} |R_{rot}|^2,$$

а числовые соотношения почти такие же, как в § 26. Одним штрихом (') обозначены верхние, а двойным (") – нижние уровни.

Квантовые числа и обозначения:

S – спин электрона, величина $(2S + 1)$ дается верхним левым индексом

Λ – компонента орбитального момента импульса электрона вдоль оси, обозначается символами $\Sigma, \Pi, \Delta, \dots$

ν – колебательное квантовое число

M – магнитное квантовое число

Ω – электронное квантовое число, $\Omega = |\Lambda + \text{компонента } S \text{ вдоль оси}|$ для связи Хунда, случай (a)

N – полный момент импульса отдельно от спина

= векторная сумма Λ и вращения R для связи Хунда, случай (б)

R изображает вращение ядра

J – полный момент импульса

= векторная сумма Ω и R в случае (a)

= векторная сумма S и N в случае (б)

Вращательные множители $|R_{rot}|^2$ подчиняются правилам сумм:

$$\sum_{J'} \sum_{M'M''} |R_{rot}|^2 = 2J'' + 1; \quad \sum_{J''} \sum_{M'M''} |R_{rot}|^2 = 2J' + 1.$$

Здесь суммирование $\sum_{M'M''}$ проводится по магнитным состояниям, которые обычно не разрешаются.

Правило сумм не дает полного определения величины $|R_{rot}|^2$, но в простых случаях оно приводит к следующему приближению для P - и R -ветвей:

$$\sum_{M'M''} |R_{rot}|^2 \approx \frac{1}{2}(2J'' + 1).$$

Известна полная формула для некоторых случаев ([2], стр. 127, 208, 250, 258, 265); можно также использовать множители Хёнль – Лондона [3]. В случае связи Хунда типа (б) число N может играть роль, подобную J .

$$f = f_{abs}$$

Молекула	Полоса		$\lambda, \text{Å}$	f	Примечания
C ₂	$A \ ^3\Pi_g - X \ ^3\Pi_u$	Свана	4700 ↔ 5600	0,031	[1, 6, 8]
	$c \ ^1\Pi_g - b \ ^1\Pi_u$	Деландра– д'Азамбуйа	3600 ↔ 4100	0,06	[1]
N ₂	$C \ ^3\Pi_u - B \ ^3\Pi_g$	2-я положительная	3370 ↔ 4000	0,05	[1, 9, 10]
N ₂ ⁺	$B \ ^2\Sigma_u^+ - X \ ^2\Sigma_g^+$	1-я отрицательная	3700 ↔ 4600	0,36	[1, 9, 10]
O ₂	$B \ \Sigma_u^- - X \ ^3\Sigma_g^-$	Шумана–Рунге	1790 ↔ 1880	0,21	[1]
CH	$A \ ^2\Delta - X \ ^2\Pi$		4314	0,006	[1, 10]
	$C \ ^2\Sigma^+ - X \ ^2\Pi$		3200	0,008	[1]
CN	$B \ ^2\Sigma^+ - X \ ^2\Sigma^+$	Фиолетовая	3850 ↔ 4216	0,022	[1, 5, 9]
	$A \ ^2\Pi - X \ ^2\Sigma$	Красная	5800 ↔ 9200	0,006	[9]
OH	$A \ ^2\Sigma^+ - X \ ^2\Pi_1$		2800 ↔ 3100	0,003	[1, 7]
CO ⁺	$A \ ^2\Pi - X \ ^2\Sigma$	В кометных хвостах	3780 ↔ 4560	0,002	[1, 9, 10]
H ₂	$B \ ^1\Sigma_u^+ - X \ ^1\Sigma_g^+$	Лаймана	1100	0,2	[1]
	$C \ ^1\Pi_u - B \ ^1\Sigma_g^+$	Вернера	1000	0,4	
NO	$A \ ^2\Sigma^+ - X \ ^2\Pi$	γ -полоса	2360 ↔ 2720	0,0022	[1,9]
NH	$A \ ^3\Pi - X \ ^3\Sigma^-$		3360	0,003	[1, 10]

Колебательные множители $|R_{v'v''}|^2$ обычно определяются с помощью интегралов «перекрывания» (множители Франка – Кондона):

$$R_{v'v''} = \int \Psi_{v'}^* \Psi_{v''} dr,$$

которые подчиняются правилу сумм:

$$\sum_{v'} |R_{v'v''}|^2 = \sum_{v''} |R_{v'v''}|^2 = 1.$$

Абсолютные силы осцилляторов полосы обычно выражают величиной f для электронной полосы:

$$f = f_{\text{abs}} = \frac{8\pi^2 m v}{3 h e^2} |R_e|^2.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 2, § 30.
2. Herzberg G., Spectra of Diatomic Molecules, 2nd ed., van Nostrand, 1950. (Русский перевод 1-го издания: Герцберг Г., Спектры и строение двухатомных молекул, ИЛ, М., 1949.)
3. Tatum J. B., Ap. J. Supp., **14**, No. 124, 21 (1967).
4. Pearse R. W. B., Gaydon A. G., The Identification of Molecular Spectra, Chapman and Hall, 1950. (Русский перевод 1-го издания: Пурс Р., Гейдон А., Отождествление молекулярных спектров, ИЛ, М., 1949.)
5. Reis V. H., J. Q. S. R. T., **5**, 585 (1965).
6. Fairbairn A. R., J. Q. S. R. T., **6**, 325 (1966).
7. Watson R., J. Q. S. R. T., **4**, 1 (1964).
8. Arnold J. O., J. Q. S. R. T., **8**, 1781 (1968).
9. Schadee A., J. Q. S. R. T., **7**, 169 (1967).
10. Nicholls R. W., Stewart A. L., Atomic and Molecular Processes, ed. Bates, Academic Press, 1962. (Русский перевод: Атомные и молекулярные процессы, под ред. Д. Бейтса, изд-во «Мир», М., 1964.)

§ 32. Стандарты длин волн

Стандарты спектральных длин волн выражены в ангстремах (Å) или международных ангстремах I. A. (оба = 10^{-8} см). Обычно используют длины волн в вакууме (λ_{vac}) для $\lambda < 2000$ Å и длины волн в сухом воздухе при 15 °C и 760 мм рт. ст. (λ_{air}) для $\lambda > 2000$ Å. Однако иногда длины волн в вакууме используются вдоль всего спектра и главный стандарт, линия ^{86}Kr , дается именно в этой форме.

Длина волны стандартной линии ^{86}Kr ($2p_{10}-5d_5$) [2]

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{vac}} &= 6057,802\ 105 && \text{Главный стандарт} \\ \lambda_{\text{air}} &= 6056,125\ 25 \\ 1\ \text{м} &= 1\ 650\ 763,73\lambda_{\text{vac}} \end{aligned}$$

Другие линии ^{86}Kr [2, 3]

λ_{vac} в Å	4377,3502	5651,1286
	4455,1666	6013,8196
	4464,9416	6422,8006
	4503,6162	6458,0720

Линии ^{198}Hg [2, 3]

λ_{vac} в Å	4047,7144	5771,1983
	4359,5624	5792,2683
	5462,2705	
λ_{air} (зеленая линия)	5460,7531	

Линии Cd [1, 3]

λ_{vac}	4801,2521	5087,2379	6440,2480
λ_{air}	4799,9139	5085,8230	6438,4696

Переход от длины волны в воздухе к длине волны в вакууме:

$$\lambda_{\text{vac}} = n\lambda_{\text{air}},$$

где n – показатель преломления сухого воздуха при 15 °C и 760 мм рт. ст.

Перевод длин волн от λ_{air} к λ_{vac}

$$\lambda_{\text{vac}} - \lambda_{\text{air}} = (n - 1) \lambda_{\text{air}} [1] \text{ (в } \text{Å})$$

$\lambda_{\text{air}}, \text{Å}$	000	100	200	300	400	500	600	700	800	900
2 000	0,648	0,667	0,687	0,708	0,731	0,754	0,777	0,801	0,825	0,850
3 000	0,875	0,900	0,925	0,950	0,976	1,001	1,027	1,053	1,079	1,105
4 000	1,131	1,157	1,183	1,210	1,236	1,262	1,289	1,315	1,342	1,368
5 000	1,395	1,421	1,448	1,475	1,501	1,528	1,555	1,581	1,608	1,635
6 000	1,662	1,689	1,715	1,742	1,769	1,796	1,823	1,850	1,877	1,904
7 000	1,931	1,957	1,984	2,011	2,038	2,065	2,092	2,119	2,146	2,173
8 000	2,200	2,227	2,254	2,281	2,308	2,335	2,362	2,389	2,417	2,444
9 000	2,471	2,498	2,525	2,552	2,579	2,606	2,633	2,660	2,687	2,714
10 000	2,741	2,769	2,796	2,823	2,850	2,877	2,904	2,931	2,958	2,985
$\lambda_{\text{air}}, \text{Å}$	0000	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
10 000	2,741	3,012	3,284	3,556	3,827	4,099	4,371	4,643	4,915	5,188
20 000	5,460	5,732	6,004	6,276	6,549	6,821	7,094	7,366	7,638	7,911
30 000	8,183	8,455	8,728	9,000	9,273	9,545	9,818	10,090	10,363	10,635
40 000	10,908	11,180	11,453	11,725	11,998	12,270	12,543	12,815	13,088	13,360
50 000	13,633	13,906	14,178	14,451	14,723	14,996	15,268	15,540	15,813	16,086

Имеются таблицы для непосредственного преобразования λ_{air} в Å в волновое число ($1/\lambda_{\text{vac}}$) [4, 5]. Единицей волнового числа является кайзер (см^{-1}).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 30; 2, § 31.
2. Trans. I. A. U., **11**, 97 (1962).
3. J. Opt. Soc. Am., **53**, 401 (1963).
4. Table of Wavenumbers, NBS Mon. 3, 1960.
6. *Kaysers H.*, Tabelle der Schwingungszahlen, Leipzig, 1925.

§ 33. Эффект Штарка

Смещения вследствие эффекта Штарка даны в единицах волнового числа для электрического поля 100 кВ/см. Приведены только наиболее сильные компоненты. Выбраны линии, представляющие интерес для астрофизики, а в случае Fe даны линии с наибольшим смещением [2]. Знак + означает смещение в коротковолновую область.

Если смещение пропорционально электрическому полю вблизи 100 кВ/см, линия принадлежит к типу l (линейный эффект Штарка), а если смещение пропорционально квадрату поля – к типу q (квадратичный эффект Штарка). Для π -компоненты электрический вектор излучения параллелен электрическому полю, а для σ -компоненты – перпендикулярен полю. Если компоненты не разделяются или не известны, величина смещения помещается в центре столбца. Среднее микроскопическое электрическое поле Хольцмарка [3]

$$\begin{aligned} F_0 &= 46,8 (P_e/T)^{2/3} \text{ ед. СГСЭ} \\ &= 2,61 e N_e^{2/3} = 1,25 \cdot 10^{-9} N_e^{2/3} \text{ ед. СГСЭ} \\ &= 3,75 \cdot 10^{-7} N_e^{2/3} \text{ В/см,} \end{aligned}$$

где электронное и ионное давления и плотности обозначены через P_e и N_e и даны в единицах системы СГС.

Слияние бальмеровских линий из-за расширения (формула Инглис – Теллера с постоянными из [7, 8]):

$$\lg N_e = 22,7 - 7,5 \lg n_m,$$

где N_e – электронная плотность в см^{-3} , а n_m – главное квантовое число последней разрешаемой линии.

Эффект Штарка

Атом	$\lambda, \text{Å}$	Обозначение	Тип	Смещение для 100 кВ/см	
				$\pi, \text{см}^{-1}$	$\sigma, \text{см}^{-1}$
H I	1216	$L\alpha$	l	$\pm 12,8$	0
	1026	$L\beta$	l	$\pm 38,5$	$\pm 19,3$
	973	$L\gamma$	l	± 77	$\pm 51,4$
	6563	$H\alpha$	l	$\pm 25,7; 19,2$	$\pm 6,4; 0$
	4861	$H\beta$	l	$\pm 64; 51,4$	$\pm 38,5; 25,7$
	4340	$H\gamma$	l	$\pm 116, 96$	$\pm 83, 64, 0$
	4100	$H\delta$	l	$\pm 181, 154$	$\pm 141, 116, 64, 39$
He I	3889	$2^3S - 3^3P^0$	$q?$	-0,8	-0,8
	5016	$2^1S - 3^1P^0$	q	+5	+3
	3188	$2^3S - 4^3P^0$	q		-6,0
	3965	$2^1S - 4^1P^0$	$q?$	+38	+30
	7065	$2^3P^0 - 3^3S$	$q?$	-0,3	-0,3
	4713	$2^3P^0 - 4^3S$	q	-2,8	-2,8
	5048	$2^1P^0 - 4^1S$	q	-5,2	-5,2
	5876	$2^3P^0 - 3^3D$	$q?$	+0,8	+0,7
	6678	$2^1P^0 - 3^1D$	q	-3,4, -2,9	-3,4, -2,9
	4471	$2^3P^0 - 4^3D$	l	-23	-23
	4922	$2^1P^0 - 4^1D$	l	-41	-41, -23
	Li I	4603	$2^2S - 2^2P^0$	q	-24
Na I	5896	$3^2S - 3^2P_{1/2}^0$	q	-0,008	-0,008
	5890	$3^2S - 3^2P_{3/2}^0$	q	-0,011	-0,011, -0,004
Mg I	5184	$3^3P_2 - 4^3S$	$q?$	-0,05	-0,05
	5173	$3^3P_1 - 4^3S$	$q?$	-0,05	-0,05
	3838	$3^3P_2 - 3^3D$	q	+1,8	+2,5
	5528	$3^1P - 4^1D$	q	-1,3	-
	4703	$3^1P - 5^1D$	q	-4,3	-
	4352	$3^1P - 6^1D$	q	-11,3	-
K I	4040	$4^2S - 5^2P_{1/2}$	q		-0,37
	4044	$4^2S - 5^2P_{3/2}$	q		-0,41, -0,21
Ca I	4226	$4^1S - 4^1P$	q		-0,002
Fe I	5065	$y^5F_3^0 - e^3G_4$	q	+2,14	+1,77
	[2] 5079	$a^5P_2 - y^5P_1^0$	q	+1,67	+2,18
	5134	$y^5F_5^0 - f^5G_6$	q	+3,14	+2,90
	5162	$y^5F_5^0 - g^5F_5$	q	-8,8	-6,15
	5367	$z^5G_3^0 - e^5H_4$	q	+1,91	+1,17
	5424	$z^5G_6^0 - e^5H_7$	q	+1,70	+1,27
	5455	$z^5G_6^0 - f^5G_6$	q	+3,00	+2,86
Sr I	4607	$5^1S - 5^1P^0$	q	-0,008	+0,0025

Профили линий водорода

Профили линий водорода связаны с расширением Хольцмарка, которое пропорционально $N_e^{2/3}$. Приведены профили $S(\alpha)$ излучения или поглощения для балмеровских линий. Смещение относительно центра линии равно

$$\Delta\lambda = \alpha F_0 \text{Å} = \alpha \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} N_e^{2/3} \text{Å}.$$

Для каждой линии величина $S(\alpha)$ нормирована с помощью условия $\int S(\alpha) d\alpha = 1$. Имеются вторичные, но не пренебрежимые вариации $S(\alpha)$, зависящие от T , и большие вариации N_e [4, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 31; **2**, § 32.
2. Panter S. F., Foster J. S., Proc. Roy. Soc., **162**, 336 (1937).
3. Unsöld A., Phys. Sternatmosphären, 2nd ed., Springer, 1955, p. 309. (Русский перевод 1-го издания: Унзольд А., Физика звездных атмосфер, ИЛ, М, 1949).
4. Griem H. R., Plasma Spectroscopy, McGraw-Hill, 1964, p. 447.
5. Kepple P., Griem H. R., Phys. Rev., **173**, 317 (1968).
6. Vidal C. R., Cooper, Smith, J. Q. S. R. T., **11**, 263 (1971).
7. Alter L. H., Gaseous Nebulae, Chapman and Hall, 1956, p. 216.
8. Курочка Л. Н., Масленникова Л. Б., Sol, Phys., **11**, 33 (1970).

Профили $S(\alpha)$ для линий серии Бальмера

Линия	α							
	0,00	0,01	0,02	0,05	0,10	0,2	0,5	1,0
H α	19	11	6	2,4	0,8	0,16	0,016	0,003
H β	1,8	3,3	5,1	4,6	1,7	0,35	0,03	0,005
H γ	4,5	3,9	3,1	2,4	1,8	0,6	0,08	0,014
H δ	1,6	1,9	2,0	2,1	1,6	0,8	0,12	0,022

§ 34. Расширение линий

Полную ширину B спектральной линии на уровне половины максимума интенсивности (полная полуширина) можно получить при учете всех возмущающих факторов: эффекта Доплера, столкновений, инструментальных эффектов и т. д. С этой целью удобно разложить каждый фактор на следующие составляющие: 1) гауссовский член с полушириной на уровне $1/e$, равной g из выражения для интенсивности $\exp(-x^2/g^2)$, и 2) лоренцовский член, характеризующий затухание, с полушириной на уровне $1/2$, равной d из выражения $1/(1+x^2/d^2)$. Разложение можно произвести с помощью выбора величин d/b , d/g и т. д., соответствующих табулированным профилям Фойгта [1, 2]. b – полная полуширина линии при данном расширяющем факторе.

Параметры профиля Фойгта [1, 2]

d/b	$a = d/g$	g/b	g^2/b^2	p
0,00	0,000	0,601	0,361	1,064
0,05	0,088	0,568	0,322	1,108
0,10	0,188	0,533	0,284	1,154
0,15	0,302	0,497	0,247	1,201
0,20	0,435	0,459	0,210	1,251
0,25	0,599	0,417	0,174	1,302
0,30	0,807	0,372	0,138	1,354
0,35	1,086	0,322	0,104	1,408
0,40	1,53	0,262	0,069	1,462
0,45	2,41	0,187	0,035	1,517
0,48	4,1	0,117	0,014	1,548
0,50	∞	0,000	0,000	1,571

Комбинируя компоненты, получим

$$b \approx (d^2 + 2,80g^2)^{1/2} + d \quad (\pm 0,8\%), \quad B \approx (D^2 + 2,80G^2)^{1/2} + D,$$

$$G \approx (g_1^2 + g_2^2 + \dots)^{1/2}, \quad D \approx d_1 + d_2 + \dots$$

Площадь, ограниченная кривой интенсивности (в единицах центральной интенсивности), равна pB (или pb для компонент).

Ширина профиля Фойгта в единицах полной полуширины

$\frac{d}{b}$	Ордината в единицах центральной интенсивности											
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
0,00	0,39	0,57	0,72	0,86	1,00	1,15	1,32	1,52	1,82	2,08	2,38	2,58
0,05	0,39	0,56	0,71	0,86	1,00	1,15	1,33	1,54	1,87	2,19	2,64	3,11
0,10	0,39	0,56	0,71	0,85	1,00	1,16	1,34	1,57	1,94	2,33	3,08	4,05
0,15	0,38	0,56	0,71	0,85	1,00	1,16	1,35	1,60	2,02	2,52	3,61	4,93
0,20	0,38	0,55	0,71	0,85	1,00	1,16	1,36	1,63	2,12	2,75	4,16	5,71
0,25	0,37	0,55	0,70	0,85	1,00	1,17	1,38	1,67	2,24	3,02	4,64	6,50
0,30	0,37	0,54	0,69	0,84	1,00	1,18	1,40	1,73	2,37	3,29	5,13	7,22
0,35	0,36	0,54	0,69	0,84	1,00	1,19	1,42	1,78	2,51	3,55	5,60	7,88
0,40	0,36	0,53	0,68	0,83	1,00	1,20	1,45	1,85	2,68	3,82	6,07	8,60
0,45	0,35	0,52	0,67	0,83	1,00	1,21	1,49	1,92	2,84	4,09	6,53	9,27
0,48	0,34	0,51	0,66	0,82	1,00	1,21	1,51	1,97	2,93	4,23	6,82	9,70
0,50	0,33	0,50	0,66	0,82	1,00	1,22	1,53	2,00	3,00	4,36	7,00	9,95

Если отношения (d/g) и соответственно (d/b) малы, что характерно для звездных спектров, профили Фойгта удобнее выразить в единицах $a = (d/g)$ [5] в виде

$$I_x/I_0 = H_0(u) + aH_1(u) + a^2H_2(u) + a^3H_3(u) + \dots,$$

где x – сдвиг вдоль спектра от центра линии в тех же единицах, в которых выражены g , d и т. д., $u = x/g$, I_x и I_0 – интенсивность линии в точке x и воображаемое значение при $x = 0$. Реальная центральная интенсивность

$$I_c = \pi^{1/2} I_0 G / pB.$$

Функция H для профилей Фойгта

u	$H_0(u)$	$H_1(u)$	$H_2(u)$	$H_3(u)$
0,0	+1,000	-1,128	+1,000	-0,752
0,2	+0,961	-1,040	+0,884	-0,637
0,4	+0,852	-0,803	+0,580	-0,342
0,6	+0,698	-0,486	+0,195	+0,007
0,8	+0,527	-0,168	-0,148	+0,280
1,0	+0,368	+0,086	-0,368	+0,405
1,2	+0,237	+0,245	-0,445	+0,386
1,4	+0,1408	+0,318	-0,411	+0,280
1,6	+0,0773	+0,316	-0,318	+0,153
1,8	+0,0392	+0,280	-0,215	+0,051
2,0	+0,0183	+0,232	-0,128	-0,010
2,5	+0,0019	+0,130	-0,022	-0,036
3,0	+0,0001	+0,079	-0,002	-0,017
3,5	+0,0000	+0,0534	-0,0001	-0,0068
4,0	0,0000	+0,0392	0,0000	-0,0033
5,0	0,0000	+0,0241	0,0000	-0,0011
6,0	0,0000	+0,0165	0,0000	-0,0005
7,0	0,0000	+0,0119	0,0000	-0,0002
8,0	0,0000	+0,0090	0,0000	-0,0002
10,0	0,0000	+0,0057	0,0000	-0,0001
12,0	0,0000	+0,0040	0,0000	-0,0000

Гауссовские компоненты и компоненты затухания

Разрешающая способность идеального спектрографа

$$g \approx 0,43l, \quad d \approx 0,14l,$$

где l – расстояние разрешения от максимума до первого минимума.

Эффект конечной ширины щели, равной s ,

$$g \approx 0,41s, \quad d = 0.$$

Тепловое доплеровское расширение

$$g = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{2kT}{m} \right)^{1/2}, \quad d = 0,$$

где g – в единицах длины волны, m – масса атома.

Затухание вследствие столкновений

$$g = 0, \quad d = 1/2\pi\tau,$$

где d – в единицах частоты, а τ – среднее время между столкновениями.

Затухание вследствие излучения

$$g = 0, \quad d = \gamma/4\pi,$$

где d – в единицах частоты, γ – постоянная затухания (§ 26).

Классическое затухание вследствие излучения

$$g = 0, \quad d = 5,901 \cdot 10^{-5} \text{ \AA},$$

где d становится постоянной, если выражена в ангстремах.

Функция распределения Хольцмарка $W(\beta)$ [6]:

$$g \approx 3,0, \quad d \approx 0,61,$$

в единицах β . β – смещение спектральной линии вследствие линейного эффекта Штарка, вызванного полями ионов, в единицах смещения из-за одного иона при среднем расстоянии $r_0 = (3/4\pi N_i)^{1/3}$, где N_i – ионная плотность.

Расширение вследствие столкновений

Изменение частоты в результате столкновения имеет вид

$$\Delta\nu = C_n/r^n,$$

где C_n – постоянная, а r – расстояние от возмущающей частицы.

γ_{col} – постоянная затухания вследствие столкновений = $2/\tau$,

τ – среднее время между столкновениями,

v – средняя относительная скорость возмущающих частиц

$$= \{(8kT/\pi)(1/m_a + 1/m_b)\}^{1/2}.$$

$n = 4$. Квадратичный эффект Штарка

$$\gamma_{\text{col}} = 2/\tau = 39C_4^{2/3} v^{1/3} N_e,$$

где N_e – электронная (или ионная) плотность,

$$C_4 = 6,2 \cdot 10^{-14} \times (\text{смещение в см}^{-1} \text{ для поля } 100 \text{ кВ/см}).$$

$n = 6$. Силы Ван-дер-Ваальса [7]

$$\gamma_{\text{col}} = 2/\tau = 17C_6^{2/5} v^{3/5} N_H,$$

где N_H – концентрация нейтральных атомов водорода,

$$C_6 = 6,46 \cdot 10^{-34} \Delta\bar{r}^2,$$

$\Delta\bar{r}^2$ – разница величин \bar{r}^2 , среднего квадрата радиуса (в атомных единицах, a_0^2), для верхнего и нижнего уровней,

$$\bar{r}^2 = \frac{n^{*2}}{2Y^2} \{5n^{*2} + 1 - 3l(l+1)\} \quad [8],$$

l – как в § 23, $(n^*)^2 = 13,6Y^2/(\chi - W)$, $(\chi - W)$ – энергия в эВ, необходимая для ионизации с возбужденного уровня, Y – степень ионизации.

Численно

$$\lg \gamma_6 = -9,53 + 0,40 \lg \Delta\bar{r}^2 + \lg N_H + 0,30 \lg T.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 32; **2**, § 33.
2. Davies J. T., Vaughan J. M., Ap. J., **137**, 1302 (1963).
3. Finn G. D., Mugglestone D., M. N., **129**, 222 (1965).
4. Hummer D. G., J. I. L. A. Report 24, Boulder, 1964.
5. Harris D. L., Ap. J., **108**, 112 (1948).
6. Böhm K.-H., Stellar Atmospheres, ed. Greenstein, Chicago, 1961, p. 88, 131 (Русский перевод: Звездные атмосферы, под ред. Дж. Гринштейна, ИЛ, М., 1963.)
7. Unsöld A., Phys. Sternatmosphären, Springer, 1955, p. 306. (Русский перевод 1-го издания: Унзольд А., Физика звездных атмосфер, ИЛ, М., 1949.)
8. Warner B., M. N., **136**, 381 (1967).

Излучение

§ 35. Основные величины и соотношения

Количественной характеристикой излучения является величина I – поток излучения, проходящий в данном месте и в данном направлении через единичную площадку поверхности, нормальной к этому направлению, в единицу времени и внутри единичного телесного угла. Эта величина называется *удельной интенсивностью* или просто *интенсивностью*.

Поток излучения через единичную площадку, называемый *поверхностным потоком* или *плотностью потока*,

$$\mathcal{F} = \int_{4\pi} I \cos \theta \, d\omega,$$

где θ – угол между лучом и внешней нормалью поверхности, а интегрирование проводится по всем направлениям.

Светимость – поток излучения, испускаемый единицей поверхности,

$$\mathcal{F} = \int_{2\pi} I \cos \theta \, d\omega$$

$$= \pi I \text{ для изотропного излучения,}$$

в этом случае интегрирование проводится по внешней полусфере.

Плотность излучения

$$u \text{ (1/c)} = \int_{4\pi} I \, d\omega = (4\pi/c) \bar{I}.$$

Величины, характеризующие излучение, отнесенные к единичному интервалу частот или длин волн, обозначаются как I_ν , I_λ , \mathcal{F}_ν и т.д.

$$I = \int I_\nu \, d\nu = \int I_\lambda \, d\lambda,$$

$$I_\lambda = \frac{c}{\lambda^2} I_\nu = \frac{\nu^2}{c} I_\nu, \quad \lambda I_\lambda = \nu I_\nu,$$

$$d\lambda = -\frac{\lambda^2}{c} d\nu = -\frac{c}{\nu^2} d\nu, \quad c = \lambda\nu.$$

Линейный коэффициент поглощения κ_s :

$$dI/ds = -\kappa_s I.$$

Коэффициент рассеяния σ_s определяется аналогично коэффициенту поглощения, но при этом рассматривается только рассеянное излучение. Он имеет тот смысл, что разность $\kappa_s - \sigma_s$ представляет долю излучения, которая поглощается и переходит в тепло.

Коэффициент поглощения на единицу массы κ_m (индекс обычно опускается)

$$dI/ds = -\rho \kappa_m I,$$

где ρ – плотность.

Коэффициент поглощения, рассчитанный на один атом или частицу, или эффективное сечение a :

$$dI/ds = -NaI,$$

где N – число атомов или частиц в единице объема, a – эффективная площадь, на которой падающее излучение полностью поглощается.

Коэффициент излучения j равен световому потоку, который излучается единицей объема внутри единичного телесного угла.

Изотропное рассеяние

$$j = \frac{\sigma}{4\pi} \times \int_{4\pi} I d\omega$$

рассеянное падающее
излучение излучение

Рассеяние электронами, атомами и молекулами

$$j = \frac{\sigma}{4\pi} \int_{4\pi} \frac{3}{4} (1 + \cos^2\theta) I d\omega$$

θ – угол между направлениями падающего и рассеянного света.

Оптическая толщина, или глубина

$$\tau = \int \kappa_s ds = \int \rho \kappa_m ds.$$

Функция источника (source function – *англ.*, или Ergiebigkeit – *нем.*)

$$S = j/\kappa_s.$$

Интенсивность излучения поглощающей среды

$$I = \int j \exp(-\tau) ds = \int S \exp(-\tau) dx.$$

Закон Кирхгофа

а) для элемента объема:

$$j_v = \kappa_{s,v} B_v(T),$$

где $B_v(T)$ – интенсивность излучения абсолютно черного тела при температуре T ;

б) для элемента поверхности:

$$I_v = A_v B_v(T),$$

где A_v – отношение поглощенного излучения к падающему, т.е. $(1 - A_v)$ – коэффициент отражения, аналогичный альбедо.

Поляризуемость атома α равна индуцированному дипольному моменту на единицу напряженности электрического поля ($\bar{\alpha}$ означает поляризуемость в случае постоянного или низкочастотного поля).

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= 4a_0^3 \sum_n f_n / (v_n/cR_\infty)^2 \\ &= 5,926 \cdot 10^{-25} \sum_n f_n / (v_n/cR_\infty)^2 \text{ см}^3 \\ &= 7,128 \cdot 10^{-23} \sum_n f_n \lambda_n^2 \text{ см}^3 [\lambda \text{ в мкм}], \end{aligned}$$

где v_n/cR_∞ – частота перехода на основной уровень в ридбергах, f_n – соответствующая сила осциллятора.

Рассеяние

$$\begin{aligned} \sigma_s &= (128\pi^5/3) N (v/c)^4 \alpha^2 \\ &= (128\pi^5/3\lambda^4) N \alpha^2 \\ &= 1,3057 \cdot 10^{20} N \alpha^2 / \lambda^4 [\lambda \text{ в мкм}]. \end{aligned}$$

Показатель преломления n :

$$\begin{aligned} n - 1 &= 2\pi N \alpha \\ &= 1,689 \cdot 10^{20} \alpha \text{ для нормальных условий.} \end{aligned}$$

Молекулярное преломление:

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi}{3} N_0 \alpha,$$

где M – молекулярный вес, ρ – плотность, N_0 – число Авогадро.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 33; 2, § 34.

§ 36. Показатель преломления и поляризуемость

Показатель преломления и поляризуемость атомных и молекулярных газов:

n – показатель преломления при нормальных условиях,
 $n - 1 = A (1 + B/\lambda^2)$ [λ в мкм],
 $\bar{\alpha}$ – поляризуемость при низкой частоте.

Атом	$\bar{\alpha}, 10^{-25} \text{ см}^3$	n (линия D)	$A, 10^{-5}$	$B, 10^{-3}$
H	6,70			
He	2,07	1,000 0350	3,48	2,8
Li	200			
Be	93			
O	1,5			
Ne	3,96	1,000 0671	6,66	2,4
Na	270			
Ar	16,54	1,000 2837	27,92	5,6
K	380			
Kr	24,8	1,000 4273	41,89	6,97
Rb	500			
Xe	40,4	1,000 702	68,23	10,14
Cs	500			
Hg	52	1,000 935	87,8	22,65

Молекула	n (линия D)	$A, 10^{-5}$	$B, 10^{-3}$
Воздух	1,000 2918	28,71	5,67
H ₂	1,000 1384	13,58	7,52
O ₂	1,000 272	26,63	5,07
N ₂	1,000 297	29,06	7,7
N ₂ O	1,000 254	516 (радиочастоты)	
CO ₂	1,000 4498	43,9	6,4
CO	1,000 334	32,7	8,1
NH ₃	1,000 375	37,0	12,0
NO	1,000 297	28,9	7,4
CH ₄	1,000 441		

Показатели преломления даны по отношению к воздуху при температуре 15 °С. Температуры сред равны примерно 18 °С, температурные коэффициенты, приведенные в таблице, равны изменению показателя преломления для линии D натрия при повышении температуры на 1 °С. В точных оптических расчетах следует пользоваться данными заводских испытаний. В таблице приведены также спектральные пределы (λ в мкм), внутри которой линейный коэффициент поглощения меньше 1 см^{-1} (т.е. пропускание слоя в 1 см > 37%).

Об атмосферной рефракции в § 55.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 34; 2, § 35.

2. Garton W. R. S., Adv. Atom. Mol. Phys., 2, 93 (1966).

Показатель преломления оптических сред [1, 2]

λ , мкм	Известковый шпат		Стекло		Флюорит CaF ₂	Кварц		Плавле- ный кварц	Каменная соль	Вода
	обыкно- венный луч	необык- новен- ный луч	бороси- ликатный кронглас	тяжелый флинт- глас		обыкно- венный луч	необык- новен- ный луч			
0,2	1,91	1,58			1,495	1,651	1,663	1,550	1,792	1,423
0,3	1,722	1,515	1,557		1,455	1,579	1,589	1,489	1,602	1,358
0,4	1,683	1,499	1,531	1,650	1,442	1,558	1,567	1,471	1,568	1,343
0,5	1,666	1,491	1,522	1,627	1,437	1,549	1,558	1,463	1,552	1,336
0,6	1,657	1,486	1,517	1,616	1,434	1,544	1,553	1,458	1,543	1,332
0,7	1,652	1,483	1,513	1,610	1,432	1,541	1,550	1,455	1,538	1,330
0,8	1,648	1,481	1,511	1,605	1,430	1,539	1,548		1,535	1,328
1,0	1,643	1,479	1,507	1,600	1,429	1,536	1,544		1,532	1,325
2	1,626	1,476	1,496		1,424	1,520	1,528		1,526	1,315
5					1,398				1,519	
10					1,303				1,494	
Температурный коэф- фициент	+0,0 ⁵ 5	+0,0 ⁴ 14	-0,0 ⁵ 1	+0,0 ⁵ 3	-0,0 ⁴ 1	-0,0 ⁵ 5	-0,0 ⁵ 6	-0,0 ⁵ 3	-0,0 ⁴ 4	-0,0 ⁴ 8
Спектральные пределы [2]										
малые λ		0,23	0,32	0,37	0,13	0,17	0,16	0,20	< 0,2	
большие λ	2,2	4	2,2	2,8	9,0	3,6	21	17	1,14	

§ 37. Поглощение и рассеяние частицами

Рассеяние на свободных электронах σ_e (томпсоновское рассеяние)

$$\sigma_e = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left(1 - 2 \frac{hv}{mc^2} \right) = 0,655 \cdot 10^{-24} \left(1 - 2 \frac{hv}{mc^2} \right) \text{ см}^2,$$

где σ_e – (экспоненциальный) коэффициент рассеяния, рассчитанный на один электрон (§ 35), а релятивистским членом $2hv/mc^2$ обычно пренебрегают.

Рэлеевское рассеяние на атомах или молекулах

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{32\pi^3}{3N} \frac{(n-1)^2}{\lambda^4} \frac{6+3\Delta}{6-7\Delta} \\ &= 3,307 \cdot 10^{18} (n-1) \delta / \lambda^4 N \text{ см}^{-1} \quad [\lambda \text{ в мкм}], \end{aligned}$$

где N – число атомов или молекул в единице объема, n – показатель преломления среды, σ_s – линейный коэффициент рассеяния и $\delta = (6 + 3\Delta)/(6 - 7\Delta)$ – коэффициент деполаризации [2, 3]. $\Delta = 0,030$ для N₂ и 0,054 для O₂ [4].

Эффективное сечение атома или молекулы для рэлеевского рассеяния.

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \frac{32\pi^3 \delta}{3\lambda^4} \frac{(n-1)^2}{N} = \frac{128\pi^5}{3\lambda^4} \delta \alpha^2 \\ &= 1,306 \cdot 10^{20} \delta \alpha^2 / \lambda^4 \text{ см}^2 \quad [\lambda \text{ в мкм}], \end{aligned}$$

где $\alpha = (n - 1) / (2\pi N)$ – поляризуемость.

Атомное рассеяние вне линии поглощения

$$\sigma_a = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left(\sum_2 \frac{f_{12} v^2}{v_{12}^2 - v^2} \right)^2,$$

где f_{12} – сила осциллятора (индекс 1 относится к основному уровню, если возбуждение низкое).

Поглощение малыми (сферическими) частицами радиуса a выражается в единицах πa^2 [2]. Факторы эффективности экстинкции, рассеяния, поглощения и лучистого давления имеют обозначения

$$\begin{aligned} &Q_{\text{ext}}, Q_{\text{sca}}, Q_{\text{abs}}, Q_{\text{pr}}, \\ Q_{\text{ext}} &= Q_{\text{sca}} + Q_{\text{abs}}, \\ Q_{\text{pr}} &= Q_{\text{ext}} - \langle \cos \theta \rangle Q_{\text{sca}}, \end{aligned}$$

где $\langle \cos \theta \rangle$ – асимметрия рассеяния вперед [5].

Для больших объектов $Q_{\text{ext}} = 2,0$; причем 1,0 соответствует поглощению и 1,0 – рассеянию с $\langle \cos \theta \rangle = 1,0$.

Факторы эффективности Q зависят от комплексного показателя преломления $m = n - in'$, формы частицы, ее размера, приблизительно равного $2a$, и длины волны λ . Они выражены в зависимости от величины $x = 2\pi a/\lambda$ и сглажены.

Фактор эффективности экстинкции Q_{ext} для сферических частиц [2]

x	$m = 1,33$, водяные капли	$m = 2$, высокое отражение	$m = \infty$, полное отражение	$m = 1,27-1,37 i$, железные частицы	$m = 1,33-0,09 i$, загрязненный лед [6]
Малые	$0,1 x^4$	$1 x^4$	$3 x^4$	$3 x$	$0,3x$
0,5	0,007	0,1	0,22	1,7	0,2
1,0	0,07	1,0	2,0	3,0	0,5
2,0	0,6	5	2,2	3,0	1,0
3,0	1,8	3	2,2	2,9	1,7
5,0	3,6	2,1	2,1	2,6	2,4
10+	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Факторы Q для железных частиц [2, 7]

x	Q_{ext}	Q_{pr}	Q_{abs}	Q_{sca}	$Q_{\text{sca}}(\cos \theta)$
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	1,8	1,8	1,6	0,2	0,0
1	2,9	2,7	1,9	1,0	0,2
2	3,0	2,2	1,5	1,5	0,8
3	2,9	1,9	1,3	1,6	1,0
10+	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 35; 2, § 36.
2. Hulst H. C. van de, Light Scattering by Small Particles, Chapman and Hall, Wiley, 1957. (Русский перевод: ван де Хюлст Г., Рассеяние света малыми частицами, ИЛ, М., 1961.)
3. Stergis C. G., J. Atm. Terr. Phys., **28**, 273 (1966).
4. Penndorf R., J. Opt. Soc. Am., **47**, 176 (1957).
5. Irvine W. M., J. Opt. Soc. Am., **65**, 16 (1965).
6. Spitzer L., Diffuse Matter in Space, Interscience, 1968.
7. Friedmann Ch., Giese R.-H., Ap. Space Sci., **15**, 401 (1972).

§ 38. Непрерывное атомное поглощение и рекомбинация

Величины

ε – энергия свободного электрона. Единица измерения – ридберг = $hcR = 2,18 \cdot 10^{-11}$ эрг = 13,60 эВ.

χ – энергия ионизации в ридбергах, $\nu_0 = cR\chi$.

ν – частота, $\nu = cR(\chi + \varepsilon)$; $d\nu = cRd\varepsilon$.

a_ν – коэффициент атомного поглощения на частоте ν , т. е. a_ν равно эффективному сечению атома для ионизации его фотоном.

$\frac{df}{d\nu}$ и $\frac{df}{d\varepsilon}$ – производные по частоте и по энергии свободного электрона силы осциллятора для континуума

f_c – интегральная сила осциллятора для континуума,

$$f_c = \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{df}{d\nu} d\nu$$

α – коэффициент рекомбинации, такой, что величина $\alpha N_e N_i$ дает полное число рекомбинаций за 1 с в 1 см³ (N_e – число электронов в 1 см³, N_i – число ионов в 1 см³)

α_t – коэффициент рекомбинации, соответствующий отдельному уровню, терму, конфигурации и т. д., которые обозначены индексом t

Q_t – эффективное сечение иона для рекомбинации на отдельный уровень, терм и т. д.

g_i, g_t – статистические веса отдельного уровня, терма или конфигурации для иона и атома (не путать с множителями Гаунта g и \bar{g})

v – средняя скорость электрона в см/с

T – температура в К

Y – степень ионизации ($Y = 1$ для нейтрального атома и т. д.), равная заряду более высокого иона

Соотношения

$$\alpha_t = vQ_t,$$

$$a_v = \frac{\pi e^2}{mRc^2} \frac{df}{d\varepsilon} = 8,067 \cdot 10^{-18} \frac{df}{d\varepsilon},$$

$$a_v = \frac{mc}{2\pi e^2 R} \frac{2g_i}{g_t} \frac{\varepsilon^{1/2} \alpha_t}{(\chi_t + \varepsilon)^2} = 1,713 \cdot 10^{-4} \frac{2g_i}{g_t} \frac{\varepsilon^{1/2} \alpha_t}{(\chi_t + \varepsilon)^2} \text{ (соотношение Милна) [1],}$$

$$v = \frac{2\pi e^2}{h} \varepsilon^{1/2} = \left(\frac{\pi k T}{2m} \right)^{1/2} = 2,188 \cdot 10^8 \varepsilon^{1/2} = 4,880 \cdot 10^5 T^{1/2},$$

в данном случае v – средняя скорость относительного движения.

$$\varepsilon = \frac{h^2 k}{8\pi e^4 m} T = 4,975 \cdot 10^{-6} T,$$

$$\begin{aligned} \alpha_t T^{1/2} &= \frac{4\pi e^2}{m} \left(\frac{hR^3}{\pi c k} \right)^{1/2} (\chi_t + \varepsilon)^2 \frac{g_t}{2g_i} a_v \\ &= 2,612 \cdot 10^6 (\chi_t + \varepsilon)^2 \frac{g_t}{2g_i} a_v. \end{aligned}$$

Основные приближения

Общую процедуру для вычисления α_v см. в [2].

Зависимость обобщенного поглощения от атомного номера Z [3]

$\lg(v/cRZ)$	$\lg \alpha_v$ (α_v в см ²)	
	атомы, лишённые оболочки	атомы, наполовину лишённые оболочки
-2,0	-17,0	-17,8
-1,0	-17,1	-17,6
0,0	-17,7	-17,9
1,0	-19,4	-19,4
2,0	-22,0	-22,0
3,0	-25,0	-25,0

Обобщенное значение коэффициента рекомбинации [1]

$$\begin{aligned} \alpha \text{ (для основного состояния)} &\approx 1 \cdot 10^{-11} Y^2 T^{-1/2} \\ \alpha \text{ (для всех состояний)} &\approx 3 \cdot 10^{-10} Y^2 T^{-3/4} \end{aligned}$$

Обобщенное значение эффективного сечения рекомбинации [1]

$$\begin{aligned} Q \text{ (для основного состояния)} &\approx 2 \cdot 10^{-17} Y^2 T^{-1} \\ Q \text{ (для всех состояний)} &\approx 6 \cdot 10^{-16} Y^2 T^{-5/4} \end{aligned}$$

Поглощение и рекомбинация для водородоподобных атомов

$$\begin{aligned} \alpha_v \text{ (Крамерс – Гаунт)} &= \frac{64\pi^4}{3\sqrt{3}} \frac{Z^4 m e^{10}}{c h^6 n^5} \frac{1}{v^3} g \\ &= 2,815 \cdot 10^{29} \frac{Z^4}{n^5} \frac{1}{v^3} g \\ &= 1,046 \cdot 10^{-14} \frac{Z^4 \lambda^3}{n^5} g, \text{ } [\lambda \text{ в мкм}], \end{aligned}$$

где $Z = 1$ для водорода, n – главное квантовое число, g – множитель Гаунта [5] порядка единицы.

На границе полосы поглощения, $v = v_0$,

$$\begin{aligned} \alpha_{v_0} &= \frac{8}{3\sqrt{3}\pi^2} \frac{h^3 g}{m^2 c e^2 Z^2} n = 7,906 \cdot 10^{-18} \frac{ng}{Z^2} \text{ см}^2, \\ \left(\frac{df}{d\varepsilon} \right)_{v_0} &= \frac{16}{3\sqrt{3}\pi} \frac{ng}{Z^2} = 0,98014 \frac{ng}{Z^2} \end{aligned}$$

Множители Гаунта для атома водорода [5, 6]

Конфигурация	g для границы поглощения	g для всего континуума		
1 s	0,80	0,84		
2 s	0,96 } 0,88 }	1,20 } 0,83 }		
2 p			0,89	0,94
3 s	1,14 } 1,14 } 0,73 }	1,6 } 1,31 } 0,64 }		
3 p			0,92	0,99
3 d				
4 s	1,3 } 1,3 }	1,95 } 1,74 } 1,18 } 0,43 }		
4 p			0,94	1,01
4 d				
4 f				
5	0,95	1,02		
6	0,96	1,02		
7	0,97	1,02		

Сила осциллятора для континуума

$$f_c = \frac{8\bar{g}}{3\sqrt{3}\pi n} = 0,4901 \frac{\bar{g}}{n}$$

Эффективное сечение атома водорода для рекомбинации на n -й уровень [8]

$$Q_n = \frac{2^4 h e^2}{3\sqrt{3} m^2 c^3} \frac{(hcR)^2}{h\nu \frac{1}{2} m v^2} \frac{g}{n^3} = 2,11 \cdot 10^{-22} \frac{g}{n\varepsilon(1+n^2\varepsilon)}$$

Коэффициент рекомбинации на n -й уровень для атома водорода

$$\begin{aligned} \alpha_n &= v Q_n = 2,07 \cdot 10^{-11} \frac{g}{n T^{1/2} (1+n^2\varepsilon)} \\ &= \frac{2^9 \pi^5}{(6\pi)^{3/2}} \frac{e^{10}}{m^2 c^3 h^3} \left(\frac{m}{kT}\right)^{3/2} \frac{1}{n^3} \exp\left(\frac{\chi_n}{kT}\right) E_1\left(\frac{\chi_n}{kT}\right) \\ &= 3,262 \cdot 10^{-6} M(n, T), \end{aligned}$$

где

$$M(n, T) = n^{-6} T^{-3/2} \exp\left(\frac{\chi_n}{kT}\right) E_1\left(\frac{\chi_n}{kT}\right).$$

Функция $M(n, T)$ табулирована [7], она имеет величину порядка 10^{-8} для 10^4 К. В множителях вида (χ_n/kT) χ_n выражена в эргах, но эти множители можно записать и в форме (χ_n/T) , где χ_n – в ридбергах (т. е. $= 1/n^2$). Экспоненциальный интеграл $E_1(x)$ табулирован [9]. Заметим, что $\exp(x) E_1(x) \approx 1/x$ для $x > 5$.

Коэффициент рекомбинации для всех уровней атома водорода [1]

$$\alpha_H = 2,07 \cdot 10^{-11} T^{-1/2} \varphi \quad \text{см}^3/\text{с},$$

где φ медленно меняется с температурой следующим образом:

$\lg T$	2	3	4	5
φ	4,6	3,4	2,3	1,2

Новые значения α_H [4] почти на 20% ниже.

Общее приближение для коэффициента рекомбинации, сопровождающейся излучением, α вблизи $T \approx 10^5$ К [10]

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-11} Y^2 T^{-1/2}.$$

Общее приближение для диэлектронной рекомбинации [10, 11].

$$\alpha_{\text{diel}} = 2,5 \cdot 10^{-4} T^{-3/2} (Y+1)^2 \sum_j f W_{Y+1}^{1/2} 10^{-4600W_{(Y+1)}/T} \quad \text{см}^3/\text{с},$$

где W_{Y+1} – энергия возбуждения (в эВ) уровней иона в $Y+1$ -й стадии ионизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 36; **2**, § 37.
2. Burgess A., Seaton M. J., M. N., **120**, 121 (1960).
3. Brandt W., Eden L., J. Q. S. R. T. **7**, 185 (1967).
4. Boardman W. J., Ap. J. Supp., **9**, 185 (1964).
5. Gaunt J. A., Phil. Trans. Roy. Soc., London, **229**, 163 (1930)
6. Glasco H. P., Zirin H., Ap. J. Supp., **9**, 193 (1964).
7. Cillié G., M. N., **92**, 820 (1932).
8. Spitzer L., Ap. J., **107**, 6 (1948).
9. Abramowitz M., Stegun I. A., Handbook of Mathematical Functions, Dover, 1955, p. 228.
10. Allen C. W., Space Sci. Rev., **4**, 91 (1965).
11. Burgess A., Ap. J., **141**, 1588 (1965).

§ 39. Таблица коэффициентов атомного поглощения и рекомбинации

Атом	Терм	χ, рид- берг	α_{v_0} , 10^{-18} см ²	df/dε, ридберг		Зависимость от ε	f _c	10 000 К		Ссылки
				ε = 0	ε = 0,05			α_b , 10^{-14} см ³ /с	Q_b , 10^{-22} см ²	
H I	1s	1,000	6,3	0,78	0,69	$(\chi + \epsilon)^{-3}$	0,436	15,8	32	[1]
	2s	0,250	15	1,86	1,1	$(\chi + \epsilon)^{-2,5}$	0,362	2,3	4,7	
	2p	0,250	14	1,74	1,1	$(\chi + \epsilon)^{-3}$	0,196	5,3	11	
	3s	0,111	26	3,1	1,0	$(\chi + \epsilon)^{-2}$	0,293	0,8	1,6	
	3p	0,111	26	3,2	1,0	$(\chi + \epsilon)^{-3}$	0,217	2,0	4,1	
	3d	0,111	18	2,2	0,7	$(\chi + \epsilon)^{-3}$	0,100	2,0	4,1	
	4s	0,062	38	4,65	1,3	$(\chi + \epsilon)^{-2}$	0,248	0,4	0,7	
	4p	0,062	40	4,9	1,1	$(\chi + \epsilon)^{-2}$	0,214	1,0	2,0	
	4d	0,062	39	4,8	0,8	$(\chi + \epsilon)^{-2}$	0,149	1,0	2,0	
	4f	0,062	15	1,8	0,3		0,057	0,6	1,2	
	Сумма							43	88	
He I	1s ² 1S	1,807	7,6	0,95	0,88	$(\chi + \epsilon)^{-2}$	1,50	15,9	33	[1, 4, 6]
	1s2s 3S	0,351	2,8	0,35	0,33	$(\chi + \epsilon)^{-1}$	0,25	1,4	3	
	1s2s 1S	0,292	10,5	1,3	1,0	$(\chi + \epsilon)^{-2}$	0,40	0,6	1	
	Сумма							43	88	
He II	1s	4,000	1,7	0,21	0,20	$(\chi + \epsilon)^{-3}$	0,42	70	140	
C I	2p ² 3P	0,828	11	1,3	1,3	$(\chi + \epsilon)^{-1}$	2	17	35	[1, 5]
C II	2p 2P ⁰	1,790	3,7	0,46	0,45	$(\chi + \epsilon)^{-1}$	1,1	96	200	[1]
N I	2p ³ 4S ⁰	1,069	10	1,2	1,3	Максимум для ε = 0,4	3	7	14	[1, 5]
N II	2p ² 3P	2,177	6,4	0,8	0,8	$(\chi + \epsilon)^{-1}$	3	60	120	[1]
O I	2p ⁴ 3P	1,001	2,6	0,32	0,36	Максимум для ε = 0,3	0,9	8	16	[1, 5]
	Сумма							22	45	
O II	2p ³ 4S	2,584	8,1	1,0	1,0	$(\chi + \epsilon)^{-1}$	4	32	65	[2]
F I	2p ⁵ 2P ⁰	1,282	5	0,6	0,6	Постоянная	2	7	13	[1]
Ne I	2p ⁶ 1S	1,586	5	0,6	0,6	Максимум для ε = 0,6	2,0	3	6	[1, 6]
Na I	3s 2S	0,376	0,12	0,14	0,005	Минимум для ε = 0,07	0,001	0,02	0,05	[1, 3]
Na II	3p ⁶ 1S	3,48	7,1	0,9	0,9	Постоянная	6	19	40	[1, 6]
Mg I	3s ² 1S	0,563	1,19	0,15	0,06		0,006			[1, 4]
Mg II	3s 2S	1,105	0,24	0,030	0,034	Максимум для ε = 0,2	0,12	1,0	2,0	[1]
Al I	3p 2P ⁰	0,437	25	3	(10)	Пик для ε = 0,005				[3, 8, 9]
Si I	3p ² 3P	0,590	25	3	4	Максимум для ε = 0,05				[3, 7, 8]
Si II	3p 2P ⁰	1,200	5	0,6	0,5	$(\chi + \epsilon)^{-3}$	0,28	50	100	[1]
Ar I	3p ⁶ 1S	1,18	30	3,7	3,9	Максимум для ε = 0,5	4			[1, 8]
K I	4s 2S	0,319	0,102	0,002	0,002	Минимум для ε = 0,02		0,05	0,1	[1, 6]
Ca I	4s ² 1S	0,449	0,46	0,058	0,021	Минимум для ε = 0,02	0,12	0,08	0,16	[1]
Ca II	4s 2S	0,873	0,14	0,018	0,020	Максимум для ε = 0,3	0,03	0,3	0,6	[1]
Rb	5s 2S	0,307	0,11	0,014	0,001					
Cs I	6s 2S	0,286	0,23	0,03	0,01	Минимум для ε = 0,5		0,03	0,06	[1]

Обозначения те же, что в § 38. В столбцах таблицы приведены: название атома, обозначение терма, ионизационный потенциал, коэффициент атомного поглощения на границе полосы поглощения, соответствующее значение $df/d\epsilon$ на границе полосы поглощения и для $\epsilon = 0,05$, замечания

об изменении коэффициента поглощения с частотой, интегральная сила осциллятора f_c , коэффициент и эффективное сечение рекомбинации для температуры 10 000 К, а также ссылки. Для других температур, близких к 10 000 К, можно использовать приближения:

$$\alpha \propto T^{-0,5} \text{ (рекомбинации на основной уровень)} \propto T^{-0,8} \text{ (все рекомбинации),}$$

$$Q \propto T^{-1,0} \text{ (рекомбинации на основной уровень)} \propto T^{-1,3} \text{ (все рекомбинации).}$$

Коэффициенты рекомбинации обычно определяются из соотношения для $\alpha_i T^{-1/2}$ (§ 38), которое для $T = 10\,000$ К принимает вид

$$\alpha (10\,000 \text{ К}) = 10,54 \cdot 10^{-14} (g_i/g_i) (\chi + 0,05)^2 (df/d\varepsilon)_{0,05}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 37; 2, § 38.
2. Ditchburn R. W., Öpik U., Atomic and Molecular Processes, ed. Bates Academic Press, 1962, p. 79. (Русский перевод: Атомные и молекулярные процессы, под ред. Д. Бейтса, изд-во «Мир», М., 1964.)
3. Bode G., Kontin. Absorbtion von Sternatmosphären, Kiel, 1965.
4. Gingerich O., Smithsonian Inst. Special Report, 167, 17 (1964).
5. Thomas G. M., Helliwell T. M., J. Q. S. R. T., 10, 423 (1970).
6. Stewart A. L., Adv. Atom. Mol. Phys., 3, 1 (1967).
7. Rich J. C., Ap. J., 148, 275 (1967).
8. Chapman R. D., Henry R. I. W., Ap. J., 173, 244 (1972).
9. Hudson R. D., Kieffer L. I., NASA SP-3064, 1971.

§ 40. Поглощение веществом звездных недр

Коэффициент непрозрачности звездных недр обычно выражается росселандовым средним коэффициентом поглощения, рассчитанного на единицу массы, $\bar{\kappa}$. Часто даются таблицы [2, 3] для широкого диапазона составов, выраженных через величины X, Y, Z ; однако значения, приведенные ниже, относятся только к составу Солнца: $X = 0,73, Y = 0,25, Z = 0,017$ (§ 14).

В таблице приведены значения величины $\lg \bar{\kappa}$, где коэффициент, $\bar{\kappa}$ выражен в $\text{см}^2/\text{г}$, как функция $\lg \rho$, где плотность ρ в $\text{г}/\text{см}^3$, и $\lg T$, где температура T в К.

$\lg \bar{\kappa}$ [2, 3]

$\lg T$	$\lg \rho$										
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
8,0				-0,51	-0,55	-0,55	-0,54	-0,52	-0,43	-0,22	+0,30
7,7				-0,47	-0,51	-0,50	-0,48	-0,47	-0,06	+0,33	+1,42
7,3			-0,48	-0,47	-0,46	-0,39	-0,19	+0,19	+0,69	+1,59	
7,0		-0,47	-0,46	-0,43	-0,27	+0,02	+0,36	+0,94	+1,58		
6,7	-0,46	-0,44	-0,39	-0,07	+0,40	+0,75	+1,20	+1,78			
$\lg T$	$\lg \rho$										
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
6,3				-0,48	-0,42	-0,19	+0,48	+1,34	+1,75	+1,94	+2,42
6,0			-0,46	-0,41	-0,17	+0,52	+1,48	+2,00	+2,32	+2,79	
5,7		-0,43	-0,39	-0,05	+0,62	+1,48	+2,23	+2,53	+2,93		
5,3	-0,35	-0,20	+0,48	+1,48	+2,52	+3,15	+3,48	+3,60			
5,0	-0,22	+0,34	+1,30	+2,42	+3,49	+4,26	+4,51	+4,28			

Поглощение вследствие одного только электронного рассеяния [1, 4]

$$\bar{\kappa}_e = 0,200 (1 + X).$$

Коэффициент атомного поглощения рентгеновских лучей для оболочек К ($n = 1$), L ($n = 2$), М ($n = 3$) и т. д. [1]

$$= 0,021 z^4 \lambda^3 n^{-3} [\lambda \text{ в см}],$$

где z – атомный номер. Вероятная ошибка составляет около 10% вблизи границы полосы поглощения λ_E , но для $\lambda < 0,1 \lambda_E$ поглощение больше, чем дает приведенная формула.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 38; 2, § 39.
2. *Watson W. D.*, *Ap. J. Supp.*, **19**, 235 (1970).
3. *Cox A. N.*, *Stewart J. N.*, *Ap. J. Supp.*, **19**, 243 (1970).
4. *Cox A. N.*, *Stellar Structure*, ed. *Aller, McLaughlin*, Chicago, 1965, p. 195. (Русский перевод: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Адлера и Д. Б. Мак-Лафлина, изд-во «Мир», 1970.)

§ 41. Поглощение веществом звездных атмосфер

В таблице приведены значения $\lg \kappa_m$, где κ_m – (экспоненциальный) коэффициент поглощения на единицу массы в $\text{см}^2/\text{г}$. Аргументами являются $\lg P_e$, где P_e – электронное давление в $\text{дин}/\text{см}^2$, $\Theta = 5040 \text{ K}/T$, где T – температура, и длина волны λ в Å .

$\lg \kappa_m$

$\lg P_e$	$\lambda, \text{Å}$										Росселлан- дово среднее	
	900	1200	2 000	3000	3500	4000	5 000	"8 000	17 000	33 000		
$\Theta = 0,05$												
1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,42
2	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	0,0	-0,42
3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,1	+0,3	+0,3	+0,8	-0,41
4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,1	0,0	0,0	+0,2	+0,6	+1,2	+1,8	+1,8	-0,36
5	+0,3	-0,1	+0,4	+0,7	+0,8	+0,9	+1,1	+1,5	+2,1	+2,8	+2,8	-0,16
6	+1,2	+0,7	+1,4	+1,7	+1,8	+1,8	+2,1	+2,0	+3,1	+3,8	+3,8	+0,36
$\Theta = 0,1$												
1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,42
2	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2	0,0	+0,5	+0,5	-0,42
3	-0,1	-0,4	-0,2	+0,1	-0,1	-0,1	0,0	+0,3	+0,9	+1,5	+1,5	-0,30
4	+0,7	+0,1	+0,3	+0,6	+0,7	+0,6	+0,8	+1,3	+1,8	+2,5	+2,5	+0,09
5	+1,6	+0,6	+1,2	+1,5	+1,6	+1,6	+1,8	+2,3	+2,8	+3,4	+3,4	+0,90
6	+2,6	+1,4	+2,1	+2,5	+2,6	+2,5	+2,7	+3,2	+3,7	+4,4	+4,4	+1,88
$\Theta = 0,2$												
1	-0,1	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,4	-0,2	+0,2	+0,2	-0,41
2	+0,7	-0,5	-0,4	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	+0,1	+0,5	+1,1	+1,1	-0,30
3	+1,6	-0,3	+0,1	+0,5	+0,6	+0,3	+0,5	+1,0	+1,4	+2,0	+2,0	+0,01
4	+2,6	+0,4	+1,0	+1,5	+1,5	+1,2	+1,4	+2,0	+2,4	+3,0	+3,0	+0,71
5	+3,6	+1,3	+2,0	+2,5	+2,5	+2,2	+2,4	+3,0	+3,4	+4,0	+4,0	+1,65
6	+4,6	+2,2	+3,0	+3,4	+3,5	+3,2	+3,4	+3,9	+4,4	+5,0	+5,0	+2,60
$\Theta = 0,3$												
1	+1,4	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,2	0,0	+0,5	+0,5	-0,38
2	+2,4	-0,4	0,0	+0,3	+0,4	-0,1	+0,1	+0,6	+0,9	+1,5	+1,5	-0,09
3	+3,4	+0,2	+0,8	+1,2	+1,3	+0,7	+1,0	+1,5	+1,8	+2,4	+2,4	+0,59
4	+4,4	+1,0	+1,7	+2,2	+2,3	+1,7	+1,9	+2,5	+2,8	+3,4	+3,4	+1,47
5	+5,4	+1,9	+2,6	+3,1	+3,2	+2,6	+2,9	+3,4	+3,8	+4,4	+4,4	+2,41
$\Theta = 0,4$												
1	+3,1	-0,4	-0,3	0,0	-0,1	-0,4	-0,3	+0,1	+0,2	+0,8	+0,8	-0,26
2	+4,1	0,0	+0,4	+0,8	+0,9	+0,2	+0,4	+0,9	+1,2	+1,7	+1,7	+0,34
3	+5,1	+0,9	+1,3	+1,8	+1,9	+1,1	+1,3	+1,9	+2,1	+2,7	+2,7	+1,24
4	+5,9	+1,8	+2,1	+2,6	+2,7	+1,9	+2,2	+2,7	+3,0	+3,6	+3,6	+2,10
5	+6,3	+2,5	+2,6	+3,1	+3,2	+2,5	+2,7	+3,2	+3,4	+4,0	+4,0	+2,60
$\Theta = 0,5$												
1	+4,7	+0,1	0,0	+0,4	+0,5	-0,3	-0,1	+0,3	+0,5	+1,0	+1,0	+0,02
2	+5,6	+1,0	+0,8	+1,3	+1,4	+0,4	+0,6	+1,2	+1,3	+1,9	+1,9	+0,78
3	+6,2	+1,9	+1,4	+1,9	+2,0	+1,0	+1,3	+1,8	+1,9	+2,6	+2,6	+1,40
4	+6,4	+2,6	+1,7	+2,1	+2,2	+1,5	+1,7	+2,1	+2,2	+2,8	+2,8	+1,77
$\Theta = 0,6$												
1	+6,0	+1,1	+0,2	+0,7	+0,8	-0,3	-0,1	+0,4	+0,4	+1,0	+1,0	+0,10
2	+6,4	+2,0	+0,5	+1,0	+1,1	0,0	+0,3	+0,8	+0,8	+1,4	+1,4	+0,43
3	+6,4	+2,6	+0,7	+1,2	+1,3	+0,7	+0,8	+1,1	+1,0	+1,6	+1,6	+0,88
4	+6,4	+2,8	+1,4	+1,5	+1,7	+1,6	+1,7	+1,8	+1,7	+2,3	+2,3	+1,60

Продолжение

lg P_e	$\lambda, \text{Å}$										Росселан- дово среднее
	900	1200	2 000	3000	3500	4000	5 000	"8 000	17 000	33 000	
$\Theta = 0,8$											
1	+6,4	+2,4	-0,8	-0,7	-0,6	-1,0	-0,9	-0,7	-1,1	-0,5	-0,83
2	+6,4	+2,5	0,0	-0,1	0,0	0,0	+0,1	+0,2	-0,2	+0,4	+0,08
3	+6,4	+2,6	+0,9	+0,8	+0,9	+1,0	+1,1	+1,2	+0,8	+1,3	+1,01
$\Theta = 1,0$											
-1	+6,4	+2,2	-1,4	-2,2	-2,3	-2,4	-2,4	-2,4	-3,0	-2,5	-2,47
0	+6,4	+2,3	-0,8	-1,7	-1,6	-1,6	-1,5	-1,4	-2,1	-1,5	-1,55
1	+6,4	+2,5	+0,1	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-1,1	-0,5	-0,57
2	+6,3	+2,5	+0,8	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	+0,5	-0,2	+0,4	+0,34
3	+5,9	+2,5	+1,2	+0,6	+0,7	+0,8	+0,9	+1,0	+0,5	+1,1	+0,87
$\Theta = 1,25$											
-1	+6,4	+2,4	-0,3	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-3,0	-2,4	-2,26
0	+6,4	+2,4	+0,5	-1,3	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0	-2,0	-1,4	-1,29
1	+6,2	+2,4	+1,0	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,2	-1,2	-0,6	-0,51

Нижний предел температуры в таблице при $T \approx 4000$ К обусловлен появлением заметного молекулярного поглощения. При высоких температурах предел поглощения определяется электронным рассеянием. Длины волн выбраны так, чтобы включить главные максимумы и минимумы κ_m . Приводятся также Росселандовы средние коэффициенты непрозрачности.

Табличные значения взяты полностью из [2] и переведены в κ_m с использованием средней массы-атома, равной $2,0 \cdot 10^{-24}$ г. Они почти на 0,1 dex больше, чем соответствующие значения из [3]. Для расчетов был использован стандартный состав без поправки на повышенное содержание железа. Для многих приложений требуются коэффициенты поглощения для отдельных элементов [4, 5] [§ 39].

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 39; 2, § 40.
2. Bode G., Kontinuierliche Absorbtion von Sternatmosphären, Kiel, 1965.
3. Vitense E., Z. Ap., 28, 81 (1951).
4. Peach G., Mem. R. A. S., 73, 1 (1970).
5. Gingerich O., Smithsonian Inst. Special Report 167, p. 17 (1964).

§ 42. Поглощение отрицательным ионом водорода

$$\lg a (\text{H}^-) [a (\text{H}^-) \text{ в } 10^{-30} \text{ см}^4/\text{дин}] [1-6]$$

$\lambda, \text{мкм}$	Θ						
	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0
*	3,45	3,60	3,70	3,80	3,86	3,98	4,10
10	5,52	5,63	5,77	5,86	5,91	5,98	6,09
5	4,93	5,01	5,13	5,23	5,27	5,42	5,51
3	4,47	4,55	4,68	4,80	4,86	4,99	5,05
2	4,12	4,20	4,33	4,46	4,50	4,59	4,73
1,8	4,03	4,12	4,27	4,42	4,47	4,60	4,70
1,6	3,96	4,06	4,26	4,43	4,57	4,96	5,30
1,4	3,91	4,04	4,32	4,56	4,82	5,40	6,00
1,2	3,92	4,10	4,48	4,80	5,12	5,75	6,33
1,0	3,95	4,17	4,63	5,03	5,33	5,94	6,52
0,8	3,91	4,15	4,60	4,97	5,31	5,93	6,46
0,6	3,83	4,08	4,53	4,90	5,26	5,86	6,40
0,5	3,77	4,02	4,46	4,83	5,20	5,80	6,32
0,4	3,63	3,90	4,34	4,73	5,08	5,66	6,23
0,3	3,50	3,76	4,22	4,59	4,93	5,54	6,09
**	4,21	4,47	4,92	5,31	5,64	6,25	6,79
Среднее	3,69	4,00	4,54	4,90	5,22	5,79	6,29

В таблице приведены значения $\lg a$ (H^-), где a (H^-) – коэффициент непрерывного поглощения отрицательным ионом водорода вследствие свободно-свободных и связанно-свободных переходов; вынужденное излучение учтено введением множителя $(1 - \exp(-hv/kT))$. Коэффициенты рассчитаны на один нейтральный атом водорода и на единицу электронного давления, $\Theta = 5040$ К/Т, Т – температура, λ – длина волны.

* Для больших длин волн надо прибавить $+\lg \lambda^2$ [λ в мкм] к первой строке.

** Для малых длин волн надо прибавить $-0,21/\lambda$ [λ в мкм] к последней строке.

В строке «Среднее» дается непосредственно среднее значение, взвешенное в соответствии с потоками F_λ теплового излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 40; 2, § 41.
2. Doughty N. A., Fraser P. A., M. N., 132, 267 (1966).
3. Geltman S., Ap. J., 136, 933 (1962); 141, 376 (1965).
4. John J. L., M. N., 128, 93 (1964).
5. Ohmura T., Ap. J., 140, 282 (1964).
6. Stilley J. L., Callaway J., Ap. J., 160, 245 (1970).

§ 43. Поглощение и излучение при свободно-свободных переходах

Линейный коэффициент поглощения при свободно-свободных переходах [1, 2]

$$\begin{aligned}\kappa_s &= \frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \frac{Z^2 e^6}{hcm^2 v} \cdot \frac{g}{v^3} N_e N_i \quad [\kappa \text{ в см}^{-1}] \\ &= 1,801 \cdot 10^{-14} (Z^2 g/v^3 v) N_e N_i \quad [v \text{ в см/с}] \\ &= 6,685 \cdot 10^{-18} Z^2 g \lambda^3 N_e N_i / v \quad [\lambda \text{ в см}],\end{aligned}$$

где v – скорость электрона, g – множитель Гаунта, учитывающий отклонение от теории Крамерса, Z – заряд иона, N_e и N_i – концентрации электронов и ионов в см^{-3} . Среднее значение $1/v$

$$= (2m/\pi kT)^{1/2},$$

откуда

$$\begin{aligned}\kappa_s &= 3,692 \cdot 10^8 Z^2 g T^{-1/2} v^{-3} N_e N_i \\ &= 1,370 \cdot 10^{-23} Z^2 \lambda^3 g N_e N_i / T^{-1/2} \quad [\lambda \text{ в см}].\end{aligned}$$

Эффективный линейный коэффициент поглощения κ' с учетом вынужденного излучения

$$\kappa'_s = 3,692 \cdot 10^8 \{1 - \exp(-hv/kT)\} Z^2 g T^{-1/2} v^{-3} N_e N_i$$

Для малых значений hv/kT ($= 1,438/\lambda T$), например для радиоволн

$$\begin{aligned}\kappa'_s &= \frac{8}{3} \left(\frac{\pi}{6}\right)^{1/2} \frac{e^6}{c(mkT)^{3/2}} \frac{Z^2 g}{v^2} N_e N_i \quad [\kappa' \text{ в см}^{-1}] \\ &= 0,0178 Z^2 g v^{-2} T^{-3/2} N_e N_i \\ &= 1,98 \cdot 10^{-23} Z^2 g \lambda^2 N_e N_i T^{-3/2} \quad [\lambda \text{ в см}]\end{aligned}$$

Множитель Гаунта для видимой и близкой ультрафиолетовой области спектра

$$g \approx 1,0$$

Об отклонениях от этого значения см. [3].

Множитель Гаунта для радиоволн [1, 4] и [§ 22]

$$\begin{aligned}g &= (\sqrt{3}/\pi) \ln(d_3/d_1) = (\sqrt{3}/\pi) \ln \Lambda \\ &= 10,6 + 1,90 \lg T - 1,26 \lg v - 1,26 \lg Z\end{aligned}$$

Другие выражения для Λ даны в § 22 и в [2, 4].

Для полностью ионизованной плазмы (содержащей 9% He по числу атомов) поглощение в радиодиапазоне принимает вид

$$\kappa' = \zeta N^2 / v^2 T^{3/2},$$

где $\zeta = 0,021g$. Приближенные значения ζ для $v \approx 100$ МГц:

Солнечная корона	$\zeta = 0,27$	Ионосфера	$\zeta = 0,14$
Солнечная хромосфера	$\zeta = 0,16$	Галактические облака	$\zeta = 0,17$

Свободно-свободное (тормозное) излучение, исходящее из единичного объема, внутри единичного телесного угла в единицу времени и в единичном интервале частот

$$\begin{aligned}
 j_v &= \kappa'_v B_v \text{ (для абсолютно черного тела)} \\
 &= \frac{16}{3} \left(\frac{\pi}{6}\right)^{1/2} \frac{e^6 Z^2}{c^3 m^2} \left(\frac{m}{kT}\right)^{1/2} g \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) N_e N_i \\
 &= 5,443 \cdot 10^{-39} Z^2 g \exp(-c_2/\lambda T) T^{-1/2} N_e N_i \text{ эрг}/(\text{см}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{Гц}) [T \text{ в К}, N \text{ в см}^{-3}]
 \end{aligned}$$

Свободно-свободное излучение космической плазмы

$$= 6,2 \cdot 10^{-39} g \exp(-c_2/\lambda T) T^{-1/2} \int N_e^2 dV \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{Гц}),$$

где интеграл $\int N_e^2 dV$ (интегрирование по объему) называется мерой эмиссии.

Полное свободно-свободное излучение

$$\begin{aligned}
 4\pi \int j_v d\nu &= \frac{64\pi}{3} \left(\frac{\pi}{6}\right)^{1/2} \frac{e^6 Z^2}{hc^3 m} \left(\frac{kT}{m}\right)^{1/2} g N_e N_i \\
 &= 1,435 \cdot 10^{-39} Z^2 T^{-1/2} g N_e N_i \text{ эрг}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}),
 \end{aligned}$$

для космической плазмы

$$= 1,64 \cdot 10^{-27} g T^{1/2} \int N_e^2 dV \text{ эрг}/\text{с}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 41; 2, § 42.
2. Spitzer L., Physics of Fully Ionized Gases, 2nd ed., Interscience, 1962, p. 148. (Русский перевод 2-го изд.: Спитцер Л., Физика полностью ионизованного газа, ИЛ, М., 1965.)
3. Karzas W. J., Latter R., Ap. J, Supp., 6, 167 (1961).
4. Chambe G., Lantos P., Sol. Phys., 17, 97 (1971).

§ 44. Излучение абсолютно черного тела

$$\begin{aligned}
 \text{Постоянная Стефана – Больцмана} &= \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = \frac{\pi^5 c_1}{15c_2^4} \\
 \sigma &= 5,6696 \cdot 10^{-5} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}^4)
 \end{aligned}$$

Светимость абсолютно черного тела \mathcal{F} , равная полному потоку излучения в сторону внешней нормали с единицы поверхности абсолютно черного тела при абсолютной температуре T

$$\mathcal{F} = \sigma T^4$$

Интенсивность излучения абсолютно черного тела

$$B = (\sigma/\pi) T^4 = 1,80468 \cdot 10^{-5} T^4 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{град}^4)$$

Плотность излучения u внутри полости при температуре T

$$u = aT^4 = (4\sigma/c) T^4 = 7,56464 \cdot 10^{-15} T^4 \text{ эрг}/(\text{см}^3 \cdot \text{град}^4)$$

В среде с показателем преломления n

$$\begin{aligned}
 B &= n^2 (\sigma/\pi) T^4 \\
 u &= n^3 (4\sigma/c) T^4
 \end{aligned}$$

Такие же множители вводятся в формулу Планка, при этом n заменяется на n_ν и n_λ .

Постоянная потока фотонов = $15,106 \cdot 10^{11} \text{ с}/c^3$

$$p = 1,520 \cdot 10^{11} \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}^3)$$

Поток фотонов с единицы поверхности абсолютно черного тела

$$N = pT^3$$

Поляризация. Излучение абсолютно черного тела не поляризовано, однако интенсивность линейно-поляризованного излучения в выбранном направлении составляет половину значения, вычисленного по приведенным здесь формулам.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу длин волн)

$$\begin{aligned}(c/4) u_\lambda &= \pi B_\lambda = \mathcal{F}_\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} / (e^{hc/k\lambda T} - 1) \\ &= c_1 \lambda^{-5} / (e^{c_2/k\lambda T} - 1), \\ c_1 &= 2\pi hc^2 = 3,741\,85 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^2/\text{с} [\lambda \text{ в см}], \\ a_1 &= (4c_1/c) = 4,9926 \cdot 10^{-15} \text{ эрг} \cdot \text{см}, \\ c_2 &= hc/k = 1,438\,83 \text{ см} \cdot \text{град}, \\ c'_2 &= c_2 \lg e = 0,624\,88 \text{ см} \cdot \text{град} \text{ (используется с десятичными логарифмами)};\end{aligned}$$

u_λ , B_λ и \mathcal{F}_λ – плотность излучения, интенсивность и светимость на единицу интервала длин волн.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу частот)

$$(c/4) u_\nu = n B_\nu = \mathcal{F}_\nu = 2\pi h \nu^3 c^{-2} / (e^{h\nu/kT} - 1)$$

Закон распределения фотонов

$$\begin{aligned}N_\lambda &= 2\pi c \lambda^{-4} (e^{c_2/\lambda T} - 1), \\ N_\nu &= 2\pi c^{-2} \nu^2 (e^{h\nu/kT} - 1),\end{aligned}$$

N_λ и N_ν – числа фотонов, испущенных с 1 см² за 1 с в единичном интервале длин волн и частот соответственно.

Распределение Рэля – Джинса (для красного конца спектра)

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_\lambda &= 2\pi c k T \lambda^{-4} = (c_1/c_2) T \lambda^{-4} \\ \mathcal{F}_\nu &= 2\pi c^{-2} k T \nu^2 = 2\pi k T \lambda^{-2}\end{aligned}$$

Распределение Вина (для фиолетового конца спектра)

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_\lambda &= 2\pi hc^2 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T} \\ \mathcal{F}_\nu &= 2\pi hc^{-2} \nu^3 e^{-h\nu/kT}\end{aligned}$$

Закон Вина. Длина волны, соответствующая максимуму \mathcal{F}_λ или B_λ , λ_{\max}

$$\begin{aligned}T \lambda_{\max} &= 0,201\,4052 c_2 = c_2/4,965\,114\,23 \\ &= 0,289\,79 \text{ ом} \cdot \text{град}\end{aligned}$$

Длина волны, соответствующая максимуму потока фотонов, λ_m

$$T \lambda_m = 0,255\,0571 c_2 = 0,366\,98 \text{ см} \cdot \text{град}$$

Частота, соответствующая максимуму \mathcal{F}_ν или B_ν , ν_m

$$T c/\nu_m = 0,354\,4290 c_2 = 0,509\,96 \text{ см} \cdot \text{град}$$

Три числовые постоянные, приведенные выше, можно определить как 1/у в уравнениях $y = 5(1 - e^{-y})$, $y = 4(1 - e^{-y})$ и $y = 3(1 - e^{-y})$ соответственно.

Таблица значений функций Планка

λT , см · град	$x = c_2/\lambda T$	$\frac{\mathcal{F}_{0-\lambda}}{\mathcal{F}_{0-\infty}}$	$\frac{\mathcal{F}_\lambda}{\mathcal{F}_{\lambda_{\max}}}$	$\frac{N_{0-\lambda}}{N_{0-\infty}}$	$\frac{N_\lambda}{N_{\lambda_m}}$	$\frac{\mathcal{F}_\nu}{\mathcal{F}_{\nu_m}}$
	Большие x	$\frac{x^3 e^{-x}}{6,4939}$	$\frac{x^5 e^{-x}}{21,201}$	$\frac{x^2 e^{-x}}{2,404}$	$\frac{x^4 e^{-x}}{4,780}$	$\frac{x^3 e^{-x}}{1,4214}$
0,00	↑	↑	↑	↑	↑	↑
0,01	143,883	0,0 ⁵⁶ 16	0,0 ⁵³ 95	0,0 ⁵⁸ 31	0,0 ⁵⁴ 29	0,0 ⁵⁶ 68
0,02	71,942	0,0 ²⁶ 37	0,0 ²³ 52	0,0 ²⁷ 14	0,0 ²⁴ 32	0,0 ²⁵ 15
0,03	47,961	0,0 ¹⁶ 27	0,0 ¹³ 18	0,0 ¹⁷ 15	0,0 ¹⁴ 16	0,0 ¹⁵ 12
0,04	35,971	0,0 ¹¹ 19	0,0 ⁹ 678	0,0 ¹² 14	0,0 ¹⁰ 84	0,0 ¹¹ 78
0,05	28,777	0,0 ⁸ 130	0,0 ⁶ 296	0,0 ⁹ 117	0,0 ⁷ 456	0,0 ⁸ 533
0,055	26,161	0,0 ⁷ 135	0,0 ⁵ 251	0,0 ⁸ 134	0,0 ⁶ 426	0,0 ⁷ 548
0,06	23,980	0,0 ⁷ 929	0,0 ⁴ 144	0,0 ⁷ 100	0,0 ⁵ 266	0,0 ⁶ 373
0,065	22,136	0,0 ⁶ 467	0,0 ⁴ 610	0,0 ⁷ 543	0,0 ⁴ 122	0,0 ⁵ 186
0,07	20,555	0,0 ⁵ 184	0,0 ³ 205	0,0 ⁶ 229	0,0 ⁴ 442	0,0 ⁵ 723

λT , см · град	$x = c_2/\lambda T$	$\frac{\mathcal{F}_{0-\lambda}}{\mathcal{F}_{0-\infty}}$	$\frac{\mathcal{F}_\lambda}{\mathcal{F}_{\lambda_{\max}}}$	$\frac{N_{0-\lambda}}{N_{0-\infty}}$	$\frac{N_\lambda}{N_{\lambda_m}}$	$\frac{\mathcal{F}_v}{\mathcal{F}_{v_m}}$
0,075	19,184	0,0 ⁵ 594	0,0 ³ 571	0,0 ⁶ 791	0,0 ³ 132	0,0 ⁴ 231
0,08	17,985	0,0 ⁴ 164	0,00137	0,0 ⁵ 232	0,0 ³ 338	0,0 ⁴ 633
0,085	16,927	0,0 ⁴ 399	0,00292	0,0 ⁵ 597	0,0 ³ 765	0,0 ³ 152
0,09	15,987	0,0 ⁴ 870	0,00562	0,0 ⁴ 137	0,00156	0,0 ³ 328
0,095	15,146	0,0 ³ 173	0,00994	0,0 ⁴ 288	0,00291	0,0 ³ 646
0,10	14,388	0,0 ³ 321	0,01640	0,0 ⁴ 558	0,00506	0,00118
0,11	13,080	0,0 ³ 911	0,03767	0,0 ³ 173	0,01278	0,00328
0,12	11,990	0,00213	0,07253	0,0 ³ 438	0,02684	0,00752
0,13	11,068	0,00432	0,12225	0,0 ³ 951	0,04898	0,01488
0,14	10,277	0,00779	0,18606	0,00183	0,08030	0,02628
0,15	9,592	0,01285	0,26147	0,00321	0,12091	0,04239
0,16	8,993	0,01971	0,34488	0,00522	0,17011	0,06361
0,17	8,464	0,02853	0,43231	0,00795	0,22656	0,09001
0,18	7,994	0,03933	0,51993	0,01150	0,28851	0,12137
0,19	7,573	0,05210	0,60440	0,01594	0,35402	0,15720
0,20	7,194	0,06672	0,68310	0,02129	0,42117	0,19686
0,22	6,540	0,10087	0,81632	0,03478	0,55363	0,28467
0,24	5,995	0,14024	0,91215	0,05179	0,67487	0,37854
0,26	5,534	0,18310	0,97090	0,07192	0,77819	0,47286
0,28	5,139	0,22787	0,99713	0,09461	0,86070	0,56323
0,30	4,796	0,27320	0,99717	0,11930	0,92220	0,64658
0,32	4,496	0,31807	0,97740	0,14541	0,96420	0,72110
0,34	4,232	0,36170	0,94358	0,17243	0,98901	0,78587
0,36	3,997	0,40327	0,90046	0,19994	0,99933	0,84078
0,38	3,786	0,44334	0,85177	0,22756	0,99781	0,88615
0,40	3,597	0,48084	0,80032	0,25500	0,98686	0,92258
0,45	3,197	0,56428	0,67164	0,32147	0,93174	0,97990
0,50	2,878	0,63370	0,55493	0,38328	0,85534	0,99951
0,55	2,616	0,69086	0,45572	0,43953	0,77269	0,99321
0,60	2,398	0,73777	0,37399	0,49009	0,69175	0,97001
0,65	2,214	0,77630	0,30764	0,53525	0,61645	0,93645
0,7	2,0555	0,80806	0,25411	0,57542	0,54835	0,89708
0,8	1,7985	0,85624	0,17610	0,64299	0,43428	0,81196
0,9	1,5987	0,88998	0,12481	0,69665	0,34629	0,72838
1,0	1,4388	0,91415	0,09045	0,73963	0,27883	0,65166
1,1	1,3080	0,93184	0,06692	0,77442	0,22692	0,58337
1,2	1,1990	0,94505	0,05045	0,80287	0,18664	0,52343
1,3	1,1068	0,95509	0,03869	0,82640	0,15506	0,47112
1,4	1,0277	0,96285	0,03013	0,84603	0,13005	0,42552
1,5	0,9592	0,96893	0,02380	0,86257	0,11004	0,38574
1,6	0,8993	0,97376	0,01903	0,87662	0,09386	0,35095
1,7	0,8464	0,97765	0,01539	0,88864	0,08065	0,32042
1,8	0,7994	0,98081	0,01258	0,89901	0,06978	0,29354
1,9	0,7573	0,98340	0,01037	0,90801	0,06076	0,26979
2,0	0,7194	0,98555	0,00863	0,91587	0,05321	0,24871
2,5	0,5755	0,99216	0,00383	0,94339	0,02950	0,17237
3,0	0,4796	0,99529	0,00194	0,95936	0,01799	0,12611
3,5	0,4111	0,99695	0,00109	0,96943	0,01175	0,09612
4,0	0,3597	0,99792	0,03656	0,97618	0,00809	0,07564
5	0,2878	0,99890	0,03279	0,98438	0,00430	0,05028
6	0,2398	0,99935	0,0438	0,98898	0,00255	0,03580
7	0,2055	0,99959	0,0 ⁴ 758	0,99181	0,00164	0,02677
8	0,1799	0,99972	0,0 ⁴ 450	0,99368	0,00111	0,02077
9	0,1599	0,99980	0,0 ⁴ 284	0,99496	0,0 ³ 788	0,01658
10	0,1439	0,99985	0,0 ⁴ 188	0,99590	0,0 ³ 579	0,01354
15	0,0959	0,9 ⁴ 55	0,0 ⁵ 380	0,99815	0,0 ³ 176	0,00617
20	0,0719	0,9 ⁴ 80	0,0 ⁵ 122	0,99895	0,0 ⁴ 751	0,00351
30	0,0480	0,9 ⁵ 43	0,0 ⁶ 244	0,99953	0,0 ⁴ 225	0,00158
40	0,0360	0,9 ⁵ 75	0,0 ⁷ 776	0,99974	0,0 ⁵ 956	0,0 ³ 894
50	0,0288	0,9 ⁵ 88	0,0 ⁷ 319	0,99983	0,0 ⁵ 491	0,0 ³ 574
100	0,0144	0,9 ⁶ 85	0,0 ⁸ 201	0,99996	0,0 ⁶ 619	0,0 ³ 144
	Малые x	$1-0,0513x^3$	$0,0472x^4$	$1-0,208x^2$	$0,2092x^3$	$0,7035x^2$

Таблицы функции Планка дают

$$\begin{array}{lll}
 \mathcal{F}_{0-\lambda} = \int_0^{\lambda} \mathcal{F}_{\lambda} d\lambda & \text{в долях} & \mathcal{F}_{0-\infty} (= \mathcal{F}) \\
 \mathcal{F}_{\lambda} & \text{" "} & \mathcal{F}_{\lambda_{\max}} \\
 N_{0-\lambda} = \int_0^{\lambda} N_{\lambda} d\lambda & \text{" "} & N_{0-\infty} (= N) \\
 N_{\lambda} & \text{" "} & N_{\lambda_{\text{m}}} \\
 \mathcal{F}_{\lambda} & \text{" "} & \mathcal{F}_{\nu_{\text{m}}}
 \end{array}$$

Асимптотические выражения для длинных и коротких волн даются как функции $x = c_2/\lambda T = hv/kT$.

Абсолютные значения можно получить, используя следующие данные:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}_{0-\infty} &= 6,493\,939c_1 (T/c_2)^4 = 5,6696 \cdot 10^{-5} T^4 \quad \text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}^4), \\
 \mathcal{F}_{\lambda_{\max}} &= 21,201\,44c_1 (T/c_2)^5 = 1,2865 \cdot 10^{-4} T^5 \quad \text{эрг}/(\text{см}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{град}^5).
 \end{aligned}$$

Для λ в микрометрах и $T = 10\,000$ К

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}_{\lambda_{\max}} &= 1,2865 \cdot 10^{12} \quad \text{эрг}/(\text{мкм} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}), \\
 N_{0-\infty} &= 15,106\,11c (T/c_2)^3 = 1,5204 \cdot 10^{-11} T^3 \quad \text{фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}^3), \\
 N_{\lambda_{\text{m}}} &= 30,032\,63c (T/c_2)^4 = 2,1008 \cdot 10^{-11} T^4 \quad \text{фотон}/(\text{см}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{град}^4), \\
 \mathcal{F}_{\nu_{\text{m}}} &= 1,421\,436 (c_1/c) (T/c_2)^3 = 5,9561 \cdot 10^{-16} T^3 \quad \text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}^3).
 \end{aligned}$$

В единицах волнового числа и для $T = 10\,000$ К

$$\mathcal{F}_{\nu_{\text{m}}} = 1,7856 \cdot 10^7 \quad \text{эрг}/(\text{см} \cdot \text{с}).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 42; 2, § 43.
2. Czerny M., Walther A., Tables of the Fractional Functions for the Planck Radiation Law, Springer, 1961.
3. Apanasevich P. A., Aizenshtadt V. S., Tables of Energy and Photon Emission, Pergamon, Oxford.
4. Cooke G. N., благодарность за программирование.

§ 45. Отражение от металлических зеркал

Коэффициент отражения (в %) от металлических поверхностей

λ , мкм	Серебро	Алюминий	Спекулюмометалл	Ртуть	Никель	Медь	Золото	Кремний	Платина	Сталь	Вольфрам
0,20	20	72			35	34	18	68	20	24	15
0,22	25	78			40	34	27	68	29	27	16
0,24	27	81	26		42	31	32	68	35	30	18
0,26	27	82	33	58	40	29	34	68	37	33	20
0,28	23	82	38	61	39	28	34	67	38	36	21
0,30	12	82	44	64	39	29	35	65	39	39	23
0,32	7	82	48	67	41	30	33	61	40	41	25
0,34	63	83	51	69	43	32	33	56	42	44	27
0,36	77	83	54	71	45	34	33	50	43	46	30
0,38	82	84	56	73	47	36	34	41	45	49	34
0,40	85	85	58	74	50	38	34	35	48	51	38
0,45	90	86	61	74	57	42	37	30	56	55	45
0,50	91	87	63	73	61	47	51	30	59	57	49
0,55	92	88	65	73	63	60	77	30	60	57	52
0,60	93	89	66	74	65	74	84	30	61	56	51
0,65	94	88	67	74	67	82	89	30	63	55	52
0,70	95	87	68	75	69	85	93	30	66	56	53
0,80	97	85	70	70	70	89	95	29	70	59	66
1,00	98	93	72	73	73	92	97	28	74	63	60
2,0	98	96	82	82	84	96	98	28	81	77	87
5,0	99	97	89	89	92	98	99	28	91	90	95
10,0	99	98	92	92	96	99	99	28	95	93	98

Разные способы покрытия не выделены [1].

В далекой ультрафиолетовой области отражающая способность сильно зависит от деталей покрытия, возраста поверхности и угла отражения. Невозможно привести здесь сводку всех этих зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 43; 2, § 44.
2. Hass G., Jousey R., J. Opt. Soc. Am., 49, 593 (1959).
3. Garton W. R. S., Adv. Atom. Mol. Phys., 2, 93 (1966).

§ 46. Визуальная фотометрия

Единицы визуальной фотометрии приведены в § 12.

Фактор относительной видности K_λ , для нормальной яркости (около $5 \cdot 10^{-4}$ стильб или больше) – *кривая видности дневного зрения* (международная) (колбочковое зрение в желтом пятне):

$$K_\lambda [1]$$

$\lambda, \text{Å}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
3000									0,0 ⁴ 4	0,0 ³ 12
4000	0,0004	0,0012	0,0040	0,0116	0,023	0,038	0,060	0,091	0,139	0,208
5000	0,323	0,503	0,710	0,862	0,954	0,995	0,995	0,952	0,870	0,757
6000	0,631	0,503	0,381	0,265	0,175	0,107	0,061	0,032	0,017	0,0082
7000	0,0041	0,0021	0,00105	0,0 ³ 52	0,0 ³ 25	0,0 ³ 12	0,0 ⁶	0,0 ⁴ 3		

Эквивалентная ширина кривой K_λ , равна $\int K_\lambda d\lambda = 1068 \text{Å}$

Механический эквивалент света (экспериментальное значение) [1]

$$K_\lambda \text{ лм} = 0,001 47 \text{ Вт}$$

Световая энергия (в люмен-эргах)

$$= 680 \int K_\lambda e_\lambda d\lambda,$$

где $e_\lambda d\lambda$ – элемент энергии в джоулях

$$1 \text{ лм (при } \lambda = 5550 \text{ Å)} = 4,11 \cdot 10^{15} \text{ фотонов}$$

Относительная видность для адаптированного к темноте глаза (яркость около 10^{-7} сб или меньше) – *кривая видности ночного зрения* (палочковое зрение):

$\lambda, \text{Å}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
4000	0,0185	0,040	0,076	0,132	0,213	0,302	0,406	0,520	0,650	0,770
5000	0,900	0,985	0,960	0,840	0,680	0,500	0,350	0,228	0,140	0,083
6000	0,0490	0,0300	0,0175	0,0100	0,0058	0,0032	0,0017	0,0 ³ 87	0,0 ³ 44	0,0 ³ 21
7000	0,0 ³ 10									

Глаз, адаптированный к темноте, 1 лм при $\lambda = 5100 \text{ Å}$ (ночное зрение)

$$\equiv 0,000 58 \text{ Вт}$$

Квантовый порог чувствительности глаза для отдельных вспышек при наилучших условиях

$$= 4 \text{ кванта в } 0,15 \text{ с (поглощенных)}$$

$$\equiv 60 \text{ квантов в } 0,15 \text{ с (упавших)}$$

Пороговая интенсивность для больших стационарных источников [2]

$$= 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ сб}$$

Размер изображения на сетчатке, соответствующий 1' дуги,

$$= 4,9 \text{ мкм}$$

Разрешающая способность глаза

$$\approx 1' \approx 5 \text{ мкм в желтом пятне}$$

Плотность палочек и колбочек на сетчатке [2]

$$\begin{aligned} \text{Палочки:} & \quad 30 \cdot 10^6 \text{ палочек/ср} = 2,7 \text{ палочек/(')}^2 \\ \text{Колбочки:} & \quad 1,2 \cdot 10^6 \text{ колбочек/ср} = 0,1 \text{ колбочек/(')}^2 \end{aligned}$$

Плотность колбочек в желтом пятне

$$\approx 50 \cdot 10^6 \text{ колбочек/ср}$$

Эквивалентный диаметр области желтого пятна, не содержащей палочек [3],

$$= 1^\circ 40'$$

Диаметры отдельных колбочек

$$= 2 \text{ мкм} \equiv 25'' \text{ (изменчивы)}$$

Диаметры отдельных палочек

$$= 1 \text{ мкм} \equiv 12''$$

Приблизительные яркости (в сб) общеупотребимых объектов [4]

Свеча	0,6
Ацетилен (горелка Кодака)	10,8
Сетка Вельсбаха (при высоком давлении)	25
Вольфрамовая нить лампы накаливания	800
Натриевая лампа	70
Ртутная лампа (при высоком давлении)	150
Кратер электрической дуги (чистый углерод)	16 000
Ясное голубое небо	0,2 \rightarrow 0,6
Небо, покрытое облаками	0,3 \rightarrow 0,7
Солнце в зените	165 000

Приближенные значения альбедо [4, 5]

Белая плотная бумага	0,80
Окись (или карбонат) магния	0,98
Черное сукно	0,012
Черный бархат	0,004

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 44; 2, § 45.
2. Pirenne M. H., Endeavour, **20**, 197 (1961).
3. Martin L. C., Technical Optics, **1**, 144, Pitman, 1948.
4. Walsh J. W. T., Photometry, 3rd ed., Dover, 1965, p. 529.
5. Houston R. A., Treatise on Light Longmans, 1924.

§ 47. Фотография

Фотографическая плотность $D = \lg(I_0/I)$, где I – интенсивность света, прошедшего через пластинку, а I_0 – интенсивность света, прошедшего через неэкспонированную часть пластинки.

Фотографическую чувствительность S можно выразить отношением D/F , где F – поток излучения, падающий на пластинку (в эрг/см²).

Чувствительность синих пластинок средней чувствительности к излучению с длиной волны 4300 Å при экспозиции около 1 с и при низких плотностях [1]

$$S = 5 \text{ см}^2/\text{эрг}$$

Чувствительность к рентгеновским лучам специальных эмульсий [2]

$$S = 10 \text{ см}^2/\text{эрг}$$

Плотность на единицу фотонного потока (для синечувствительных пластинок, низких плотностей и излучения с длиной волны 4300 Å)

$$= 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{фотон}$$

Масса осажденного серебра, соответствующая единице фотографической плотности

$$= 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^2$$

Зависимость чувствительности S ($\text{см}^2/\text{эрг}$) от длины волны

$\lambda, \text{Å}$	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
Синечувствительная пластинка	3	4	4	5	3	0	0	0	0
Панхроматическая пластинка	3	4	5	3,5	2,0	3,5	3,5	0,3	0,01

Диаметр фотографических зерен

$$\approx 0,7 \text{ мкм}$$

Число зерен, соответствующее единице фотографической плотности

$$\approx 2 \cdot 10^8 \text{ зерен/см}^2$$

Типичная толщина фотографической эмульсии

$$\approx 0,003 \text{ см}$$

Фотографическое разрешение – число разрешаемых штрихов на 1 мм

Высокочувствительные эмульсии	65
Среднечувствительные эмульсии	100
Специальные эмульсии, дающие максимальное разрешение	1000

Плотность звездного изображения при экспозиции 1 час на высокочувствительных синих пластинках

$$\lg D = 2 \lg d - 2 \lg w - 0,4m_{\text{pg}} - 0,7,$$

где d – диаметр объектива телескопа в дюймах, w – диаметр изображения на пластинке в см и m_{pg} – фотографическая звездная величина. Предполагается, что фотографическая плотность < 1 .

Световой поток L в люменах, проникающий в телескоп с объективом диаметра D в дюймах от звезды, имеющей величину m_v при наблюдении вблизи зенита и при наилучших условиях видимости,

$$\lg L = 2 \lg D - 0,4m_v - 9,05.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 45; 2, § 46.
2. Burton W. M., Culham Labs Report, CLM-M66, 1966.

ГЛАВА 6

Земля

§ 48. Размеры Земли

Сфероид [1–3, 7]

Экваториальный радиус	$a = 6378,164 \pm 0,003$ км
Полярный радиус	$c = 6356,779$ км
Средний радиус	$\mathcal{R}_{\oplus} = (a^2 c)^{1/3} = 6371,03$ км
Длина экваториального квадранта	$= 10\,018,81$ км
Длина меридионального квадранта	$= 10\,002,02$ км
Сжатие	$(a - c)/a = 1/298,25 = 0,003\,3529$
Эксцентриситет	$(a^2 - c^2)^{1/2}/a = 0,081\,82$
Площадь поверхности	$= 5,1007 \cdot 10^{18}$ см ²
Объем	$= 1,0832 \cdot 10^{27}$ см ³

Понижение поверхности относительно сфероида на широте 45° ($\chi = 7 \cdot 10^{-7}$)
 $= 4$ м

Сжатие экватора [6, 12]

$$\begin{aligned} (a_{\max} - a_{\min})/a_{\text{ср}} &= 1,6 \cdot 10^{-5} \\ a_{\max} - a_{\min} &\approx 100 \text{ м} \end{aligned}$$

Долготы максимумов $= 20^\circ$ з. д. и 160° в. д.

Масса Земли $\mathcal{M}_{\oplus} = (5,976 \pm 0,004) \cdot 10^{27}$ г

Масса Земли \times гравитационная постоянная

$$\begin{aligned} k_e^2 &= 3,98603 \cdot 10^{20} \text{ см}^3/\text{с}^2 \\ k_e &= 1,996\,51 \cdot 10^{10} \text{ см}^{3/2}/\text{с} \\ &= 0,001\,239\,45 a^{3/2} \text{ с}^{-1} \\ &= 0,074\,3671 a^{3/2} \text{ мин}^{-1} \end{aligned}$$

Средняя плотность Земли $\bar{\rho}_{\oplus} = 5,518 \pm 0,004$ г/см³

Моменты инерции [6, 7]

относительно оси вращения

$$\begin{aligned} C &= 0,3306 \mathcal{M}_{\oplus} a^2 \\ &= 8,04 \cdot 10^{44} \text{ г} \cdot \text{см}^2 \end{aligned}$$

относительно экваториальной оси

$$\begin{aligned} A &= 0,3295 \mathcal{M}_{\oplus} a^2 \\ (C - A)/C &= 0,003\,276 = 1/305,3 \\ J_2 &= (C - A) / \mathcal{M}_{\oplus} a^2 = 0,001\,082\,64 \\ \mathcal{M}_{\oplus} a^2 &= 2,431 \cdot 10^{45} \text{ г} \cdot \text{см}^2 \end{aligned}$$

Постоянные гравитационного потенциала Земли [4, 5]

$$U = \frac{G \mathcal{M}_{\oplus}}{a} \cdot \frac{a}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{a}{r} \right)^n P_n(\sin \varphi) \right\},$$

где r – расстояние по радиусу от центра Земли
 P_n – полином Лежандра степени n
 φ – широта

$$\begin{array}{ll}
 J_2 = 1082,64 \cdot 10^{-6} & J_3 = -2,54 \cdot 10^{-6} \\
 J_4 = -1,58 \cdot 10^{-6} & J_5 = -0,22 \cdot 10^{-6} \\
 J_6 = +0,59 \cdot 10^{-6} & J_7 = -0,40 \cdot 10^{-6} \\
 J_8 = -0,2 \cdot 10^{-6} & J_9 = +0,05 \cdot 10^{-6} \\
 J_{10} = -0,4 \cdot 10^{-6} & J_{11} = 0 \cdot 10^{-6} \\
 J_{12} = -0,2 \cdot 10^{-6} & J_{13} = 0 \cdot 10^{-6} \\
 J_{14} = +0,1 \cdot 10^{-6} & J_{15} = -0,4 \cdot 10^{-6} \\
 J_{16} = +0,2 \cdot 10^{-6} & J_{17} = 0 \cdot 10^{-6} \\
 J_{18} = -0,2 \cdot 10^{-6} & J_{19} = 0 \cdot 10^{-6} \\
 J_{20} = 0,0 \cdot 10^{-6} & J_{21} = +0,2 \cdot 10^{-6}
 \end{array}$$

Угловая скорость вращения Земли (1900)

$$= 7,292\ 115\ 15 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$$

Момент импульса

$$= 5,861 \cdot 10^{40} \text{ см}^2 \cdot \text{г/с}$$

Энергия вращения

$$= 2,137 \cdot 10^{36} \text{ эрг}$$

Работа против силы земного притяжения, которую надо произвести, чтобы рассеять вещество Земли в бесконечность

$$= 2,49 \cdot 10^{39} \text{ эрг}$$

Увеличение продолжительности суток

$$= 0,0015 \text{ с/столетие}$$

Увеличение звездных суток в результате действия приливных сил

$$= 0,0007 \text{ с/столетие}$$

Потеря энергии вследствие приливного трения [10, 13]:

$$\text{весенний прилив} = 2,6 \cdot 10^{19} \text{ эрг/с}$$

$$\text{средний прилив} = 1,4 \cdot 10^{19} \text{ эрг/с}$$

Скорость вращения Земли на экваторе

$$= 0,465\ 10 \text{ км/с}$$

Скорость освобождения на поверхности Земли

$$= 11,19 \text{ км/с}$$

Средняя скорость движения Земли по орбите

$$= 29,78 \text{ км/с}$$

Связь между периодом P и большой полуосью орбиты a_1 для спутников Земли

$$a_1 = 331,3P^{2/3} \text{ [} a_1 \text{ в км, } P \text{ в мин]}$$

Изменение широты. Перемещение полюса оси вращения складывается из двух движений:

а) собственное, с периодом 434 сут и полуамплитудой $0,18''$

б) связанное с сезонными явлениями, годовое с периодом 365 сут и полуамплитудой $0,09''$

Поверхность Земли

Площадь суши [8] $= 1,49 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$

Площадь поверхности океанов [8] $= 3,61 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$

Среднее возвышение суши [8, 9] $= 860 \text{ м}$

Средняя глубина океанов [8, 11] $= 3900 \text{ м}$

Масса океанов $= 1,45 \cdot 10^{24} \text{ г}$

Ускорение силы тяжести на поверхности g

$$\text{(стандартное)} \quad g_0 = 980,665 \text{ см/с}^2$$

$$\text{(на широте } 45^\circ) \quad = 980,612 \text{ см/с}^2$$

$$g = 980,612 - 2,5865 \cos 2\varphi + 0,0058 \cos^2 2\varphi - 0,000 308h \text{ см/с}^2$$

$$= 978,031 (1 + 0,005 302 \sin^2 \varphi - 0,0^5 6 \sin^2 2\varphi - 0,0^6 315h) \text{ см/с}^2,$$

где φ – астрономическая широта, h – высота в метрах

Центробежное ускорение на экваторе = $3,3915 \text{ см/с}^2$

Отношение (g/центробежное ускорение) на экваторе

$$= 288,38 = 1/0,003 468$$

Разность между астрономической, или географической, широтой и геоцентрической широтой

$$\varphi - \varphi' = 695'' \sin 2\varphi - 1,2'' \sin 4\varphi$$

Длина 1° широты [2] = $111,1334 - 0,5594 \cos 2\varphi + 0,0012 \cos 4\varphi$ км

Длина 1° долготы [2] = $111,4133 \cos \varphi - 0,0935 \cos 3\varphi + 0,0001 \cos 5\varphi$ км

Расстояние от уровня моря до центра Земли

$$\rho = a (0,998 327 + 0,001 677 \cos 2\varphi - 0,0^5 4 \cos 4\varphi)$$

Геоцентрические координаты [2]

$$\rho \sin \varphi' = (S + 0,156 78/h \cdot 10^{-6}) \sin \varphi,$$

$$\rho \cos \varphi' = (C + 0,156 78/h \cdot 10^{-6}) \cos \varphi,$$

$$\text{tg } \varphi = (0,993 305 + 0,0011h \cdot 10^{-6}) \text{tg } \varphi$$

φ	S	C	φ	S	C
0°	0,993 305	1,000 000	50°	0,995 262	1,001 970
10°	0,993 406	1,000 101	60°	0,995 809	1,002 520
20°	0,993 695	1,000 392	70°	0,996 254	1,002 969
30°	0,994 138	1,000 838	80°	0,996 456	1,003 262
40°	0,994 682	1,001 386	90°	0,996 641	1,003 364
45°	0,994 972	1,001 678			

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 46; 2, § 47.
2. Astronomical Ephemeris.
3. Рабочая группа. Trans. I. A. U. 1964, XII B, p. 593, 1966.
4. King-Hele D. G. et al., Planet Space Sci., 15, 741 (1967); 17, 629 (1969).
5. Kozai Y., Publ. A. S. Japan, 16, 263 (1964); Smithsonian Ap. Obs. S. R. No. 295 (1969).
6. Cook A. H., Earth's Mantle, ed. Gaskell, Academic Press, 1967, p. 63.
7. MacDonald G. J. F., Handbook of Physical Constants, ed. Clark, Geolog. Soc. Am. Mem. 97, 1966. p. 220. (Русский перевод: Справочник физических констант горных пород, под ред. С. Кларка, изд-во «Мир», М., 1969.)
8. Holmes A., Principles of Physical Geology, Nelson, 1965, p. 21.
9. Verniani F., J. Geoph. Res., 71, 385 (1966).
10. Munk W. H., MacDonald G. J. F., Rotation of the Earth, Cambridge U. P., 1960, p. 213. (Русский перевод: Манк У., Макдональд Г., Вращение Земли, изд-во «Мир», М., 1964.)
11. Berry F. A., Bolla, Beers, Handbook of Meteorology, McGraw-Hill, 1945, p. 112.
12. Baker R. M. L., Makemson M. W., Astrodynamics, 2nd ed., 1967, p. 180.
13. Miller G. R., J. Geoph. Res., 71, 2485 (1966).
- 14*. Вуллард Э., Теория вращения Земли вокруг центра масс, Физматгиз, М., 1963.

§ 49. Геологическая шкала времени

Возраст Земли [2–4] = $(4,55 \pm 0,05) \cdot 10^9$ лет

Конец последнего оледенения [1, 4] = 11 000 лет назад

Продолжительность каждого оледенения составляет около 50 000 лет

Период повторяемости оледенений и межледниковий [1, 4]

$$= 250 000 \text{ лет, нерегулярный}$$

Геологические эпохи

Эра, период	Возраст, 10 ⁶ лет [1, 2, 4]	Жизнь, континенты и т. д. [1, 6, 7]
<i>Кайнозойская</i>		
Четвертичный		
Современный плейстоцен	0 → 1,6	Человек
Третичный		
Плиоцен	2 → 10	Высшие млекопитающие
Миоцен	10 → 25	Образуются Аденский и Калифорнийский заливы, Красное море открывается
Олигоцен	25 → 39	
Эоцен	39 → 57	Образуется Северный Ледовитый океан
Палеоцен	57 → 67	Расширяется северная Атлантика
<i>Мезозойская</i>		
Меловой	67 → 135	Современная растительность. Образуется южная Атлантика
Юрский	135 → 183	Гигантские рептилии. Америка отделяется от Африки. Антарктида отделяется от Африки
Триасовый	183 → 225	Млекопитающие
<i>Палеозойская</i>		
Пермский	225 → 275	Хвойные растения, насекомые. Образуется большой материк Гондвана
Каменноугольный	275 → 348	Рептилии. Каменноугольные леса
Девонский	348 → 400	Сухопутные животные. Деревья
Силурийский	400 → 435	Растения суши
Ордовикский	435 → 500	Морские позвоночные
Кембрийский	500 → 590	Морские беспозвоночные. Начинается быстрая эволюция
<i>Докембрийская</i>		
Поздний докембрий	600 → 1000	Грибы. Половое размножение
Верхний докембрий	1000 → 2000	Волокнистые и зеленые водоросли
Средний докембрий	2000 → 3000	Одноклеточные сине-зеленые водоросли
Нижний докембрий	3000 → 4500	Химическая эволюция. Бактерии

Период повторяемости геологических ледниковых периодов [1,4]

$$= 250 \cdot 10^6 \text{ лет}$$

Продолжительность каждого ледникового периода составляет несколько миллионов лет.

Наибольший возраст, установленный геологически,

$$= 3,55 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

Скорость движения континентов

$$\approx 2 \text{ см в год}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 47; 2, § 48.
2. The Phanerozoic Time-scale, ed. Holmes A., Geol. Soc. London, 1964, p. 260.
3. Cummings G. L., Canadian J. Sci., 6, 719 (1969).
4. Holmes A., Principles of Physical Geology, Nelson, 1965, pp. 156, 380, 677, 698.
5. Goldich S. S. et al., Geol. Soc. Am. Bull., 1971.
6. Knopoff L., The Earth's Mantle, ed. Gaskell, Academic Press, 1967, p. 171.
7. Vine F. J., Understanding the Earth, ed. Gass, Smith, Wilson, Artemis, 1971, p. 233.
8. Garland G. D., Continental Drift, Symp., 32, 19, 1968.
9. Barghoorn E. S., Scientific American, 30 May 1971.
- 10*. Вуллард Э., Теория вращения Земли вокруг центра масс, Физматгиз, М., 1963.

§ 50. Земная кора

Земная кора распространяется от поверхности до раздела Мохоровичича, расположенного на глубине около 35 км относительно поверхности суши. Так как под океанами этот раздел выше, а твердая поверхность ниже, толщина коры в некоторых океанах очень мала и, возможно, доходит до 5 км. Типичный состав и толщина коры [1, 2]:

- 1) Поверхностные отложения: 2 км, и на континентах, и в океанах.
- 2) Силитовый (гранитный) слой (верхняя кора): 20 км, только на континентах.
- 3) Базальтовый слой (нижняя кора): 14 км, и на континентах, и в океанах.

Плотность поверхностного слоя Земли [3]	= 2,60 г/см ³
Плотность гранита	= 2,67 г/см ³
» базальта	= 2,85 г/см ³
» осадочных пород	= 2,45 г/см ³
Удельная теплоемкость	
гранита	= 0,20 кал/(г · град)
базальта	= 0,22 кал/(г · град)
Теплопроводность [2, 4]	
гранита	= 7 · 10 ⁻³ кал/(град · см · с)
базальта	= 5 · 10 ⁻³ кал/(град · см · с)
Градиент температуры в поверхностном слое	= 2,0 · 10 ⁻⁴ град/см
Поток тепла [2, 4]	
у поверхности	= 1,4 · 10 ⁻⁶ кал/(см ² · с)
у раздела Мохоровичича (от мантии)	= 0,25 · 10 ⁻⁶ кал/(см ² · с)

Выделение радиоактивного тепла типичными породами [1, 2]
10⁻⁶ кал/(см² · с)

Порода	U	Th	K	Всего
Сиалиты	2,6	2,2	0,7	5,5
Базальты	0,6	0,7	0,2	1,5
Сверхосновные	0,01	0,01	0,00	0,02
Хондриты	0,008	0,009	0,021	0,04

Выделение тепла радиоактивными элементами [1, 5]

Семейство урана	0,73 кал/(г урана · год)
Семейство тория	0,20 кал/(г тория · год)
Семейство калия	26 · 10 ⁻⁶ кал/(г калия · год)

Скорость сейсмических волн вблизи поверхности [1, 8]

$P = 8,11$ км/с	$P_g = 5,598$ км/с
$S = 4,33$ км/с	$S_g = 3,402$ км/с

Шкала интенсивности землетрясений (описательная) и магнитуда (определяется логарифмом кинетической энергии) [2]

Шкала интенсивности Меркалли	Характеристика	Магнитуда (Рихтера) M	Максимальное ускорение колебаний грунта, см/с ²
I	Регистрируется только сейсмическими приборами	3	10
IV	Умеренное. Ощущается при ходьбе	4,3	100
VI	Сильное. Некоторые повреждения	5,2	500
IX	Разрушение домов	6,8	4 000
XII	Катастрофическое. Полное разрушение (частота повторений ≈ 10 в столетие)	8,6	10 000
	Сильнейшее из известных	8,9	

где P – продольные, S – поперечные волны; индексом g обозначены непосредственно поверхностные волны.

Энергия, освобождающаяся при землетрясениях, E
Отдельное землетрясение [2]

$$\lg E \text{ (в эргах)} = 5,8 + 2,4 M$$

Полная энергия землетрясений для всей Земли = 10²⁶ эрг/год

Удельное электрическое сопротивление вещества поверхностного слоя (очень изменчиво) [1, 6, 7],
Ом · см

Морская вода	21
Влажная жирная глина, обычная глина, плотный аллювий	100 ↔ 3000
Верхний слой почвы (для электроники)	10 000

Осадочные породы (современные)	1 000 ↔ 30 000
»»» (древние)	30 000 ↔ 200 000
Изверженные породы	50 000 ↔ 300 000
Крупный гравий, песок, песчаник	$10^5 \leftrightarrow 10^6$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 48; 2, § 49.
2. Holmes A., Principles of Physical Geology, Nelson, 1965, pp. 900, 1002.
3. Handbook of Physical Constants, ed. Clark, Geol. Soc. Am., 1966, p. 20. (Русский перевод: Справочник физических констант горных пород, под ред. С. Кларка, изд-во «Мир», М., 1969.)
4. Cook A. H., also von Herzen R. P., The Earth's Mantle, ed. Gaskell, Academic Press, 1967, pp. 63 and 221.
5. MacDonald G. J. F., J. Geoph. Res., 64, 1967 (1959).
6. Terman F. E., Electronic and Radio Engineering, 4, McGraw-Hill, 1955, p. 808.
7. Chapman S., Bartels J., Geomagnetism, Oxford, 1940, p. 423.
8. Jeffreys H., The Earth, Cambridge U. P., 1952, p. 73. (Русский перевод: Джеффрис Г., Земля, ее происхождение, история и строение, ИЛ, М., 1960.)

§ 51. Внутреннее строение Земли

Основные слои внутри Земли [3]

Область	Название	Диапазон глубин, км	Градиенты скоростей P и S
A	Кора	0 ↔ 33 (переменный)	Сложный
B	Верхняя мантия	33 ↔ 410	Нормальный
C		410 ↔ 1000	Больше нормального
D'	Нижняя мантия	1000 ↔ 2700	Нормальный
D''		2700 ↔ 2900	Около нуля
E	Внешнее ядро	2900 ↔ 4980	Нормальный для P
F	Переход	4980 ↔ 5120	Отрицательный для P
G	Внутреннее ядро	5120 ↔ 6370	Почти нормальный для P

Физические характеристики внутренних областей Земли

Границы областей показаны горизонтальными линиями, r – расстояние от центра Земли, R_{\oplus} – радиус Земли, T – температура, ρ – плотность, g – ускорение силы тяжести, P – давление, M_r – масса внутри сферы радиуса r , M_{\oplus} – масса Земли, μ – модуль сдвига, k – модуль объемной деформации.

Глубина, км	Область	$\frac{r}{R_{\oplus}}$	T (?), К [1, 4]	ρ , г/см ³ , [1-3]	g , см/с ²	P , 10 ¹² дин/см ² [1, 3, 4]	$\frac{M_r}{M_{\oplus}}$	Сейсмические скорости, км/с		Постоянные упругости, 10 ¹² ед. СГС	
								P продольная	S поперечная	M	k
								[1-3]		[1-3]	
0	A	1,000	287	2,6	981	0,000	1,000	5,6	3,4	0,26	0,44
10		0,998	460	2,7	982	0,003	0,998	6,0	3,6	0,3	0,51
33		0,995	700	3,3	984	0,009	0,992	6,6	3,8	0,4	0,68
100	B	0,984	1200	3,4	986	0,031	0,972	7,9	4,4	0,63	1,17
200		0,969	1700	3,6	989	0,068	0,944	8,0	4,5	0,67	1,25
410		0,936	2200	3,9	994	0,142	0,886	8,2	4,55	0,76	1,46
600	C	0,906	2500	4,1	995	0,218	0,827	9,05	4,98	0,93	1,88
1000		0,843	3000	4,6	994	0,40	0,705	10,20	5,65	1,32	2,58
1500		0,765	3500	4,9	985	0,63	0,584	11,43	6,35	1,87	3,53
2000	D'	0,686	3800	5,1	986	0,87	0,474	12,17	6,67	2,17	4,30
2500		0,608	4100	5,3	1000	1,12	0,380	12,80	6,92	2,48	5,11
2700		0,576	4300	5,6				13,35	7,16	2,78	5,92
2900	D''	0,545	4300	5,6				13,62			
3000		0,529	4500	5,7				13,62	7,31	3,00	6,50
3500		0,451	5000	9,7	1030	1,36	0,315	8,1	0,00	0,00	6,3
4000	E	0,372	5500	9,8	1010	1,45	0,296	8,2			6,6
4500		0,294	5800	10,4	880	1,93	0,193	8,9			8,2
4980		0,218	5800	11,1	760	2,38	0,115	9,5			9,8
5120	F	0,215	6000	11,4	620	2,83	0,055	10,0		0,00	11,4
5500		0,137	6200	12,0					0,00	0,00	12,2
6000		0,058	6300	12,5	500	3,20	0,025	10,4	2,07	0,51	12,2
6371	G	0,000	6400	12,7				10,1	1,24	0,20	13,2
		0,196	6200	12,9	330	3,5	0,007	9,7	4,05	2,08	13,2
		0,137	6200	12,9	330	3,5	0,007	11,2		1,7	14,0
	0,058	6300	13,0	140	3,7	0,001	11,3		1,4	14,4	
	0,000	6400	13,0	0	3,7	0,000	11,3	3,16	1,3	14,7	

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 49; 2, § 50.
2. Bullen K. E., Geophys. J., 9, 233 (1965).
3. Bullen K. E., Earth's Mantle, ed. Gaskell, Academic Press, 1967, pp. 11, 28.
4. Clark S. P., Ringwood A. E., Earth's Mantle, ed. Gaskell, Academic Press, 1967, p. 111.

§ 52. Атмосфера

Сухой воздух при стандартных температуре и давлении (STP)

Стандартная температура	$T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C} = 273,15\text{ K} = 32\text{ }^\circ\text{F}$
Стандартное давление	$P_0 = 760\text{ мм рт. ст.}$ $= 29,921\text{ дюймов рт. ст.}$ $= 1013,250\text{ мбар} = 1033,23\text{ гс/см}^2$
Стандартное значение ускорения силы тяжести	$g_0 = 980,665\text{ см/с}^2 = 32,174\text{ фут/с}^2$
Плотность воздуха	$\rho_0 = 0,001\ 2928\text{ г/см}^3$
Молекулярный вес	$M_0 = 28,970$
Средняя масса молекулы	$= 4,810 \cdot 10^{-23}\text{ г}$
Среднеквадратичная скорость молекул	$(3RT_0/M_0)^{1/2} = 4,85 \cdot 10^4\text{ см/с}$
Скорость звука	$= (\gamma P_0/\rho_0)^{1/2} = (\gamma RT_0/M_0)^{1/2}$ $= 3,31 \cdot 10^4\text{ см/с}$
Удельные теплоемкости	$c_p = 0,2403\text{ кал/(г} \cdot \text{град)}$ $c_v = 0,1715\text{ кал/(г} \cdot \text{град)}$
Отношение	$c_p/c_v = \gamma = 1,401$
Число молекул в 1 см^3	$N = 2,687 \cdot 10^{19}$
Диаметр молекулы	$\sigma = 3,46 \cdot 10^{-8}\text{ см}$
Средняя длина свободного пробега	$= 1/(\sqrt{2}\pi N\sigma^2)$ $= 6,98 \cdot 10^{-6}\text{ см}$ $= 1,72 \cdot 10^{-4}\text{ П}$
Коэффициент вязкости	$= 5,6 \cdot 10^{-5}\text{ кал/(см} \cdot \text{с} \cdot \text{град)}$
Теплопроводность	$n = 1 + 2,876 \cdot 10^{-4} + 1,629 \cdot 10^{-6}/\lambda^2 +$ $+ 1,36 \cdot 10^{-8}/\lambda^4\text{ [}\lambda\text{ в мкм]}$
Показатель преломления	$\sigma_m = 1,060 \cdot 32\pi^3 (n-1)^2/3N\lambda^4$ $= 350 (n-1)^2/N\lambda^4\text{ см}^{-1}\text{ [}\lambda\text{ в см]}$ $\approx 1,09 \cdot 10^{-8}\lambda^{-4,05}\text{ см}^{-1}\text{ [}\lambda\text{ в мкм]}$
Рэлеевское рассеяние (молекулярное)	

Состав атмосферы [1, 2]

1 атмо-см – толщина в см слоя газа, приведенного к стандартным условиям = $2,687 \cdot 10^{19}$ молекула/см²

Газ	Молекулярный вес	Доля в сухом воздухе		Количество, атмо-см	Примечания
		по объему	по весу		
N ₂	28,013	$780\ 840 \cdot 10^{-6}$	$755\ 230 \cdot 10^{-6}$	624 000	
O ₂	31,999	209 470	231 420	167 400	
H ₂ O	18,015	1 000 ↔ 28 000	600 ↔ 17 000	800 ↔ 22 000	b d
Ar	39,948	9 340	12 900	7 450	
CO ₂	44,010	320	500	260	A
Ne	20,179	18,2	12,7	14,6	
He	4,003	5,24	0,72	4,2	
CH ₄	16,043	1,8	1,0	1,4	
Kr	83,80	1,14	3,3	0,91	
CO	28,010	0,06 ↔ 1	0,06 ↔ 1	0,05 ↔ 0,8	A
SO ₂	64,06	1	2	1	A
H ₂	2,016	0,5	0,04	0,4	
N ₂ O [3]	44,012	0,27	0,5	0,2	
O ₃	47,998	0,01 ↔ 0,1	0,02 ↔ 0,2	0,25	b c
Xe	131,30	0,087	0,39	0,07	
NO ₂	46,006	0,0005 ↔ 0,02	0,0008 ↔ 0,03	0,0004 ↔ 0,02	A
Rn	222	0,0 ¹³ 6	0,0 ¹² 5	$5 \cdot 10^{-14}$	
NO	30,006	Следы	Следы	Следы	A

Примечания: а – больше в промышленных районах, б – наблюдаются метеорологические и географические вариации, с – возрастает в слое озона, d – уменьшается с высотой.

Еще некоторые атомы и молекулы обнаруживаются спектроскопически, из наблюдений ночного неба и полярных сияний, § 61.

Водяной пар

Давление e насыщенного водяного пара в воздухе над чистой водой или льдом [4]

$T, ^\circ\text{C}$	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
$e, \text{мм рт. ст.}$	0,29	0,77	1,95	4,58	9,21	17,5	318	55,3
$e, \text{мбар}$	0,38	1,03	2,60	6,11	12,27	23,37	42,45	73,78

$$\text{Плотность водяного пара} = 2,886 \cdot 10^{-4} e/T \text{ г/см}^3 [T \text{ в К, } e \text{ в мм рт. ст.}]$$

$$1 \text{ см осажденной воды} = 1245 \text{ см водяного пара при стандартных условиях}$$

$$\text{Плотность влажного воздуха} = 4,645 \cdot 10^4 (B - 0,378e)/T \text{ г/см}^3,$$

где B – полное давление, B и e в мм рт. ст.

Среднее изменение давления водяного пара с высотой h [1].

$$\lg(e_h/e_0) = -h/6 [h \text{ в км}]$$

Полное количество водяного пара выше уровня h

$$= 0,21 e_h \cdot 10^{-h/22} \text{ см осажденной воды}$$

$$\approx 0,21 e_h \text{ см осажденной воды на единицу воздушной массы,}$$

где h в км, e_h – давление водяного пара в мм рт. ст. на высоте h .

Однородная атмосфера, шкала высот и градиенты.

Шкала высот (высота, на которой давление уменьшается в e раз)

$$RT/M_0g = 2,93 \cdot 10^3 T \text{ см} [T \text{ в К}]$$

$$\text{Высота однородной атмосферы} = H = RT/M_0g$$

Температура у основания,	-30	-15	0	15	30	$^\circ\text{C}$
$H, \text{км}$	7,113	7,552	7,991	8,430	8,869	

$$\text{Масса столба атмосферы с основанием } 1 \text{ см}^2 = 1035 \text{ г}$$

$$\text{Полная масса атмосферы Земли (и над сушей, и над морем) [2]} = 5,136 \cdot 10^{21} \text{ г}$$

$$\text{Момент инерции земной атмосферы [5]} = 1,413 \cdot 10^{39} \text{ г} \cdot \text{см}^2$$

$$\text{Адиабатический градиент температуры} = g/c_p J = 9,76 \text{ град/км}$$

$$\text{Средний температурный градиент в тропосфере} = 6,5 \text{ град/км}$$

$$\text{Масса столба единичного сечения в } 1 \text{ атмо-см газа с молекулярным весом } M = 4,461 \cdot 10^{-5} M \text{ г/см}^2$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 50; 2, § 51.
2. Veriam F., J. Geoph. Res., **71**, 385 (1966).
3. Bates D. R., Hays P. B., Planet Space Sci, **15**, 189 (1867).
4. Goody R. M., Atmospheric Radiation, **1**, Oxford, 1964, p. 400. (Русский перевод: Гуди Р., Атмосферная радиация, I, Основы теории, изд-во «Мир», М., 1966.)
- 5*. Сидоренков Н. С., Стехновский Д. И., А. Ж., **48**, 1096 (1971).

§ 53. Изменение метеорологических величин с высотой

В таблице усреднены данные для северного и южного полушарий, которые различаются в деталях из-за неодинакового распределения суши. T – температура, P – давление.

Широта	Средняя температура воздуха на уровне моря, °С	Амплитуда сезонных изменений температуры на суше, °С	Температура океана, °С	Полное давление на уровне моря, мм рт. ст.	Давление водяного пара на уровне моря, мм рт. ст.	Тропопауза		
						T , °С	высота, км	p , мм рт. ст.
0°	27	1	27	758	21	-86	17,0	60
10	26	3	26	759	20	-81	16,6	74
20	24	6	24	761	18	-74	15,5	97
30	20	9	20	763	14	-66	13,7	127
40	13	13	14	761	9	-61	11,8	160
50	6	17	7	756	5	-58	9,8	198
60	-2	21	2	751	2	-55	9,0	233
70	-10	26	0		1	-54	8,1	258
80	-18	29	-2			-53	7,8	285
90	-25							

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 51; 2, § 52.
2. *Napier Shaw*, Manual of Meteorology, 2, Cambridge, 1936.
3. *Berry F. A., Bolly, Beers*, Handbook of Meteorology, McGraw-Hill, 1945, p. 675.

§ 54. Протяженность земной атмосферы и распределение по высоте

h – высота над уровнем моря

T – температура

$r = R_{\oplus} + h$ – расстояние от центра Земли

R_{\oplus} – радиус Земли

Атмосферные слои и переходные уровни [1, 4]

Слой	h , км	Характеристики и замечания
Тропосфера	0 ↔ 12	Изменения погоды
Тропопауза	12	См. § 53
Стратосфера	12 ↔ 50	Инверсия. T растет с h
Стратопауза	50	
Мезосфера	50 ↔ 80	T уменьшается с h
Мезопауза	85	Серебристые облака
Термосфера	> 85	T увеличивается с h
Озонасфера	12 ↔ 50	Слой озона
Ионосфера	> 70	Ионизованные слои
Экзосфера	> 1000	Нет молекулярных столкновений
Гомосфера	< 100	Основные составляющие перемешаны
Гетеросфера	> 100	Состав определяется диффузией
Слой, в котором атомы ионизованы более чем наполовину	> 1000	
Радиационные пояса [4, 11]	r/R_{\oplus}	
Внутренний пояс	1,6	
Внешний пояс	3,7	
Магнитосфера [9, 10]		
В направлении Солнца	10,6	
Фронт ударной волны в направлении Солнца	13,5	
Радиус хвоста, отсчитываемый от оси Земля – Солнце	18	

Физические характеристики

P – давление, T – температура, ρ – плотность

H – шкала высот, l – средняя длина свободного пробега

N – число частиц в 1 см^3 : молекулы + атомы + ионы (без электронов)

$\approx N_e$ (электронная плотность) на высотах более 1000 км

Молекулярный вес μ , состав и частота столкновений молекул ν_μ [3, 7, 8]

h , км	μ	Состав по числу атомов, %					$\lg \nu_\mu$, ν_μ в с^{-1}
		N_2	O_2	O	He	Ar или H	
100	28,30	76	18	5	0	1 (Ar)	4,45
150	25,12	60	9	31	0		1,25
200	22,37	44	5	51	0		0,70
300	18,36	17	1	81	1		-0,15
400	16,36	6	0	91	3		-0,85
500	14,8	2	0	86	12		-1,45
700	9,1	0	0	44	55	1 (H)	-2,40

Сверхвращение атмосферы [13], выраженное через отношение угловых скоростей вращения атмосфера/Земля

h , км	200	250	300	350	400
Сверхвращение	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 52; 2, § 53.
2. Willmore A. P., Space Sci. Rev., **11**, 607 (1970).
3. CIRA 1965 Reference Atmosphere, North-Holland, 1965.
4. Handbook of Geophysics, USAF, Macmillan, NY, 1960, pp. 1, 18.
5. Альперт Я. Л., Space Sci. Rev., **6**, 419 (1967).
6. Fea K., Planet Space Sci., **14**, 291 (1966).
7. Jacchia J. G., 10th Rep. S. T. P., Planet Space Sci., **12**, 355 (1964).
8. King-Hele D. G., Quinn G., Planet Space Sci., **13**, 693 (1965).
9. Wolfe J. H., Intriligator D. S., Space Sci. Rev., **10**, 511 (1970).
10. Mead G. D., The Solar Wind, ed. Machih and Neugebauer, Jet Prop. Lab., 1966, p. 337. (Русский перевод: Солнечный ветер, под ред. Р. Маккина, М. Нейгебауэра, изд-во «Мир», М., 1968.)
11. van Allen J. A., J. Geoph. Res., **64**, 1683 (1959).
12. King-Hele D. G., Scott D. W., Planet Space Sci., **15**, 1913 (1967), **18**, 1433 (1970).
13. King-Hele D. G., Roy. Air Estab., TR 71171, 1971.

§ 55. Атмосферная рефракция и путь луча в воздухе

Показатель преломления n сухого воздуха при давлении $p = 760$ мм рт. ст. и температуре $t = 15^\circ\text{C}$ [1, 2, 5]

$$(n - 1) \cdot 10^6 = 64,328 + \frac{29\,498,1}{146 - (1/\lambda_0)^2} + \frac{255,4}{41 - (1/\lambda_0)^2},$$

где λ_0 – длина волны в вакууме в мкм.

Показатель преломления для любых температур и давлений [1, 2]

$$(n_{t,p} - 1) = (n_{15,760} - 1) \frac{p[1 + (1,049 - 0,0157t) \cdot 10^{-6}p]}{720,883(1 + 0,003\,661\,t)},$$

где t в $^\circ\text{C}$ и p в мм рт. ст.

Если давление водяного пара равно f (в мм рт. ст.), множитель $(n - 1) \cdot 10^6$ уменьшается в

$$\frac{0,0624 - 0,000\,680/\lambda^2}{1 + 0,003661\,t} \text{ раз, } \lambda \text{ в мкм} \quad [1,2].$$

Показатель преломления воздуха для радиоволн [1, 3, 4]

$$(n_{t,p,f} - 1) \cdot 10^6 = 287,8 \frac{p}{760} \cdot \frac{1}{1 + 0,00366t} + \frac{0,33f}{1 + 0,00366t} + \frac{6,70f}{(1 + 0,00366t)^2},$$

где p и f в мм рт. ст., t в $^\circ\text{C}$

$$\approx 78P/T + 3,9 \cdot 10^5 e/T^2,$$

Показатель преломления n и постоянная рефракции $R_0 = (n^2 - 1)/2n^2$ для воздуха при $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 760$ мм рт. ст. и давлении водяного пара $f = 4$ мм рт. ст. Для других температур и давлений приведенные значения надо умножить на $p/(760 + 2,9\,t)$, где член $2,9\,t$ приближенно учитывает изменение с температурой содержания водяного пара [1, 5].

λ , МКМ	$n-1, 10^{-6}$	R_0	λ , МКМ	$n-1, 10^{-6}$	R_0
0,20	340,0	70,10	0,70	290,7	59,93
0,22	329,1	67,85	0,80	290,0	59,79
0,24	321,2	66,25	0,90	289,4	59,66
0,26	315,4	65,03	1,00	289,0	59,58
0,28	310,9	64,10	1,2	288,6	59,50
0,30	307,6	63,42	1,4	288,3	59,44
0,32	304,9	62,86	1,6	288,1	59,40
0,34	302,7	62,42	1,8	288,0	59,37
0,36	300,9	62,03	2,0	287,9	59,35
0,38	299,5	61,75	3,0	287,7	59,31
0,40	298,2	61,48	4,0	287,6	59,29
0,45	295,6	60,94	Радиоволны		
0,50	294,1	60,63	$f=10$ мм рт. ст.		
0,55	292,9	60,38	355		73,2
0,60	292,0	60,20			
0,65	291,4	60,07			

где P в мбар, T в К, e – давление водяного пара в мбар.
 Атмосферная рефракция

$$R = z_t - z_a,$$

где z_t – истинное зенитное расстояние,

z_a – видимое (т. е. искаженное рефракцией) зенитное расстояние.

Средняя постоянная рефракции (при 760 мм рт. ст. и 0 °С)

$$R_0 = 60,3''$$

Рефракция и воздушная масса. Рефракция дана для $p = 760$ мм рт. ст. и $t = 10$ °С, для других значений p и t рефракцию $R = z_t - z_a$ надо умножить на $p/\{760 \cdot (0,962 + 0,0038 t)\}$. Воздушная масса на пути луча изменяется с давлением и температурой так же, как и рефракция [1–3, 6–9]. Заметим, что воздушная масса сравнима с функцией $\text{Ch}(\chi)$ из § 60 для $Q = 1000$.

z_a	z_t	R [1, 3, 8]	sec z_a	Воздушная масса [1, 6, 7, 9]
0°	0°0'	0''	1,000	1,000
10	10 0	10	1,015	1,015
20	20 0	21	1,064	1,064
30	30 1	34	1,155	1,154
40	40 1	49	1,305	1,304
45	45 1	59	1,414	1,413
50	50 1	70	1,556	1,553
55	55 1	84	1,743	1,740
60	60 2	101	2,000	1,995
65	65 2	125	2,366	2,357
70	70 3	159	2,924	2,904
75	75 4	215	3,864	3,816
80	80° 5'	319''	5,76	5,60
81	81 6	353	6,39	6,18
82	82 7	394	7,19	6,88
83	83 7	444	8,21	7,77
84	84 8	509	9,57	8,90
85	85 10	593	11,47	10,40
86	86 12	706	14,34	12,44
87	87 14	865	19,11	15,36
88	88 18	1103	28,65	19,8
89,0	89 25	1481	57,3	27,0
89,51	90 00	1760	116	32
90,0	90 35	2123	∞	38

При нормальных температурных условиях, выражение для рефракции имеет вид

$$R = 58,3'' \text{tg } z_a - 0,067'' \text{tg}^3 z_a.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 53; 2, § 54.
2. Coleman C. D., Bozman, Meggers, Tables of Wavenumbers, N. B. S. Monograph 3, Washington, 1960.
3. Landolt-Börnstein Tables, VI, 1, 1965, pp. 49, 52.
4. Bean B. R., Proc. I. R. E., 50, 260 (1962).
5. Barrell H., J. Opt. Soc. Am., 41, 295 (1951).
6. Bemporad A., Mitt. Heidelberg, No. 4, 1904.
7. Schoenberg E., Handb. Astrophys., II/1, 171, 264, 1929.
8. Нефедьева А. И., Изв. Астр. Энгельгардовской Обс. 36, 1, 1968.
9. Snell C. M., Heiser A. M., Publ. A. S. P., 80, 336 (1968).

§ 56. Непрерывное поглощение атмосферы

В таблице приводится экспоненциальный коэффициент поглощения (оптическая толщина) для определенного количества поглощающего вещества, которое приблизительно равно его количеству в единице воздушной массы нормальной атмосферы. К молекулярному рассеянию (рэлеевское рассеяние) следует добавить 6% для учета фактора деполяризации [§ 37].

Рэлеевское рассеяние на 1 атмосферу

$$= 1,04 \cdot 10^5 (n - 1)^2 / \lambda^4 \quad [\lambda, \text{ в мкм}],$$

где n – показатель преломления.

Для озона оптическая плотность, приведенная в [3], умножена на 0,691, чтобы получить экспоненциальное поглощение (оптическую толщину для 0,3 атмо-см). В представляющей интерес области 2800–3200 Å справедлива следующая эмпирическая формула для оптической плотности 1 атмо-см, γ :

$$\lg \gamma = 17,58 - 56,4 \lambda \quad [\lambda \text{ в мкм}].$$

Для пыли и аэрозольного тумана поглощение пропорционально $\lambda^{-\alpha}$, где $\alpha = 1, 3$ [4]. Приводимое поглощение пылью соответствует хорошим условиям при наблюдении протяженных объектов (например, Солнца), когда свет, рассеянный под малыми углами, доходит до широкоугольного приемника излучения. Для приемника с малой диафрагмой, обычно употребляемой при наблюдении звезд, этот столбец соответствует очень хорошим условиям. При сильном тумане значения оптической толщины для пыли следует увеличить посредством коэффициента, который может достигать величины 10.

Непрерывное поглощение атмосферы

λ , мкм	Молекулярное рассеяние (вся атмосфера)	Озон (3 мм при стандартных условиях)	Пыль, хорошая прозрачность (вся атмосфера)	Всего	Пропускание
0,20	7,36	2,4	0,24	20	0,00
0,22	4,76	17	0,21	27	0,00
0,24	3,21	65	0,19	68	0,00
0,26	2,25	88	0,17	89	0,00
0,28	1,63	34	0,157	36	0,00
0,30	1,21	3,2	0,143	4,5	0,011
0,32	0,92	0,24	0,132	1,30	0,273
0,34	0,71	0,02	0,122	0,84	0,43
0,36	0,56	0,00	0,113	0,68	0,51
0,38	0,448	0,000	0,106	0,55	0,58
0,40	0,361	0,000	0,099	0,46	0,63
0,45	0,223	0,001	0,084	0,31	0,73
0,50	0,144	0,012	0,074	0,23	0,79
0,55	0,098	0,031	0,065	0,195	0,82
0,60	0,068	0,044	0,058	0,170	0,84
0,65	0,0495	0,023	0,053	0,126	0,88
0,70	0,0366	0,008	0,048	0,092	0,911
0,80	0,0215	0,001	0,040	0,062	0,939
0,90	0,0133	0,000	0,035	0,048	0,953
1,0	0,0087		0,030	0,039	0,962
1,2	0,0042		0,024	0,028	0,972
1,4	0,0022		0,019	0,021	0,979
1,6	0,0013		0,016	0,017	0,983
1,8	0,0008		0,014	0,015	0,985
2,0	0,0005		0,012	0,013	0,987
3,0	0,0001		0,008	0,008	0,992
5,0	0,0		0,006	0,006	0,994
10,0	0,0		0,005	0,005	0,995

Поглощение в звездных величинах = 1,086 × (оптическая толщина)

Приближенные значения поглощения света звезд для чистой атмосферы [1]:

в визуальной области V $\approx 0,20$ зв. вел./воздушная масса,
 в синей области (B) $\approx 0,34 - 0,03 (B - V)$ зв. вел./воздушная масса,
 в ультрафиолетовой области (U)
 $\approx 0,65 - 0,01 (B - V)$ зв. вел./воздушная масса.

Яркость чистого голубого неба B в эрг/(см² · с · Å · ср) [5]. Значения B вычислены для зенитного расстояния 45°, λ в мкм.

λ	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
B	2,2	3,6	3,8	4,1	5,0	5,6	4,5	3,8	3,4	2,5	1,6

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 54; 2, § 55.
2. *van de Hulst H. C.*, Atmosphere of Earth and Planets ed. Kuiper, 1948, p. 49. (Русский перевод: Атмосферы Земли и планет, под ред. Дж. Койпера, ИЛ, М., 1951.)
3. *Vigroux E.*, Contr. Inst. d'Ap., Paris, A, No. 152 (1953).
4. Landolt-Börnstein Tables, VI/1, Springer, 1965, p. 51.
5. *Allen C W.*, Gerlands Beitr. z. Geoph., **46**, 32 (1935).

§ 57. Поглощение атмосферных газов в ультрафиолетовой области спектра

В таблице приведены значения $\lg \sigma_\lambda$, где σ_λ – эффективное сечение поглощения атмосферных молекул. Экспоненциальный коэффициент поглощения k_λ (на 1 атмо-см, т. е. на 1 см при стандартных условиях) получается из выражения

$$\lg k_\lambda = \lg \sigma_\lambda + 19,43.$$

Чтобы определить по имеющимся данным атмосферное поглощение, надо знать атомный и молекулярный состав атмосферы, который недостаточно хорошо изучен (§ 54). Однако следует заметить, что для $\lambda < 800 \text{ \AA}$ поглощение на один атом азота или кислорода почти одинаково.

В столбце h_1 приведена высота, соответствующая единице оптической толщины в атмосфере.

i – неравномерно меняется с длиной волны из-за линий и полос. Значения для отдельных λ могут различаться на ± 1 dex

e – граница поглощения, λ дано в примечаниях

M – максимум поглощения, λ дано в примечаниях

m – минимум поглощения, λ дано в примечаниях

Поглощение в ультрафиолетовой области спектра

$\lambda, \text{ \AA}$	$\lg \sigma_\lambda (\sigma_\lambda \text{ в см}^{-1}) [1-4]$				$h_1 \text{ км}$ [1, 2, 5, 6]	λ для e, M, m Å
	O ₂	O, O ₃	N ₂	H ₂ O		
		O [7]				
0,01		-23,81	-23,60			
0,02		-23,68	-23,44			
0,05		-23,56	-23,27			
0,1	-23,12	-23,43	-23,17		34	
0,2	-23,00	-23,28	-23,07		36	
0,5	-22,51	-22,80	-22,70		43	
1	-21,75	-22,05	-22,00		56	
2	-20,89	-21,19	-21,13		73	
5	-19,72	-20,01	-19,95		88	
10	-18,87	-19,25	-19,09		101	
20	-18,63	-18,42	-18,13		115	O 23; N ₂ 31
50	-18,23	-18,71	-18,7		107	
100	-17,72	-18,04	-17,9		124	
150	-17,35	-17,45	-17,5		133	
200	-17,08	-17,25	-17,25	-17,32	142	
300	-16,77	-17,07	-17,05	-16,70	156	O 310

Продолжение

$\lambda, \text{Å}$	$\lg \sigma_\lambda (\sigma_\lambda \text{ в см}^{-1}) [1-4]$				$h_1 \text{ км}$ [1, 2, 5, 6]	$\lambda \text{ для } e, \text{ М, м,}$ Å
	O ₂			H ₂ O		
400	-16,64	-16,91	-16,87	-16,60	163	O 435
500	-16,60	-16,87	-16,72	-16,83	171	
600	-16,58	-16,90	-16,68	-16,77	175	O 664
700	-16,6 i	-17,12	-16,69	-16,83	175	O 732; N ₂ 799
800	-16,8 i	-17,51	-17,22	-16,89	152	
900	-17,2 i	-17,53	-17,4	-16,83	124	O 910; H ₂ O 984
1000	-17,7 i		-18,3	-17,0 i	107	O 1023
1100	-18,5 i		-19,4	-17,2 i	95	
1200	-18,4 i			-17,2 i	80	H ₂ O 1280
1300	-18,3 i			-17,1	100	
1400	-16,84			-18,05	110	O 1430; H ₂ O 1440
	M			m		
1500	-16,88	O ₃ -18,32		-17,97	110	
1600	-17,28	-17,96		-17,45	110	H ₂ O 1650
				M		
1700	-17,96	-18,09		-17,40	100	
1800	-19,8 i	-18,12		-18,11	80	
1900	-21,6	-18,29		-18,3	40	O ₃ 1980
		m				
2000	-22,7	-18,53			35	
2200	-23,2	-17,72			38	
2400	-23,8	-17,08			40	O ₃ 2550
		M				
2600		-16,96			42	
2800		-17,36			35	
3000		-18,38			20	

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 55; 2, § 56.
2. Allen C. W., Space Sci. Rev., 4, 91 (1965).
3. Norton R. B., Van Zandt, Denison, Conf. Ionosphere, Inst. Phys. London, 1963, p. 26.
4. Hinteregger H. E., Hall, Schmidtke, Space Research, 5, 1175 (1965).
5. Landolt-Börnstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965, p. 51.
6. Wilson R., Boksenberg, Ann. Rev. Astron. Ap., 7, 421 (1969).
7. Knight D. E., Uribe, Woodgate, Planet Space Sci., 20, 161 (1972).

§ 58. Поглощение атмосферных газов в длинноволновой области спектра

Полосы, состоящие из отдельных линий, не подчиняются закону поглощения Ламберта и коэффициент поглощения надо заменить его аналогом δ_λ , таким, чтобы пропускание слоя было $f(b_\lambda l)$, где l – толщина слоя. Для функции f мы подобрали следующую зависимость [1, 2]:

$\lg(b_\lambda l)$	$f(b_\lambda l)$	$\lg(b_\lambda l)$	$f(b_\lambda l)$	$\lg(b_\lambda l)$	$f(b_\lambda l)$	$\lg(b_\lambda l)$	$f(b_\lambda l)$
-3,0	1,000	-1,2	0,878	0,0	0,500	+1,2	0,064
-2,5	0,991	-1,0	0,836	+0,2	0,414	+1,4	0,030
-2,0	0,972	-0,8	0,785	+0,4	0,329	+1,6	0,011
-1,8	0,957	-0,6	0,723	+0,6	0,252	+1,8	0,002
-1,6	0,936	-0,4	0,653	+0,8	0,176	+2,0	0,000
-1,4	0,911	-0,2	0,579	+1,0	0,111		

Величина b_λ обратна толщине (в выбранных единицах), которая дает 50% поглощения или пропускания. Значения $\lg b_\lambda$ для отдельных атмосферных газов представлены графически. Едини-

ца, выбранная для l , есть количество данного газа, содержащееся при нормальных условиях в одной воздушной массе.

Единица l для $\text{H}_2\text{O} = 1245$ атмо-см
 = 1 см осажденной воды
 » » » $\text{O}_2 = 167\,600$ атмо-см
 » » » $\text{O}_3 = 0,3$
 » » » $\text{CO}_2 = 220$
 » » » $\text{N}_2\text{O} = 0,4$
 » » » $\text{CH}_4 = 1,2$

Значения b_λ сильно зависят от полного давления, на графиках эта зависимость не отражена.

Поглощение в коротковолновом конце радиоокна.
 В таблице приведены оптические толщины k_λ для
 167 600 атмо-см O_2
 и 1 245 атмо-см $\text{H}_2\text{O} = 1$ см осажденной воды

λ , см	ν , ГГц	k_λ [2-4, 6]	
		O_2	H_2O
0,3	100	0,1	0,03
0,4	75	0,4	0,02
0,5	60	25	0,01
0,6	50	0,4	0,01
0,8	37,5	0,05	0,01
1,0	30	0,03	0,02
1,2	25	0,02	0,06
1,5	20	0,02	0,02
2,0	15	0,015	0,003
3,0	10	0,013	0,0009

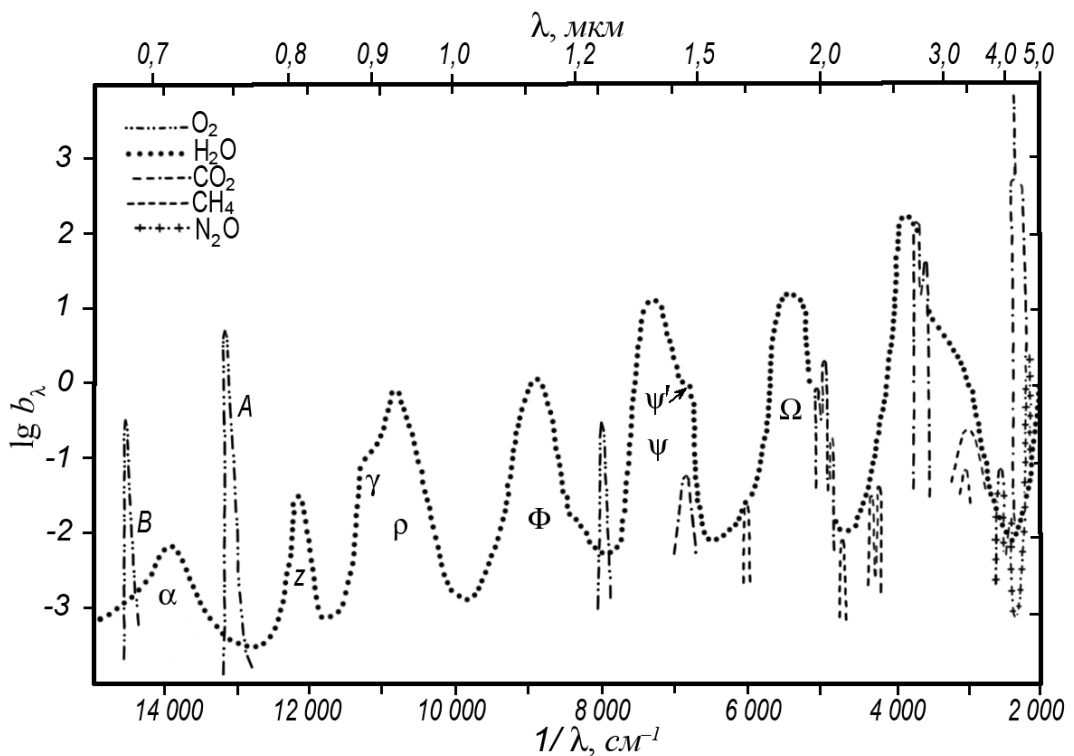


РИС. 1. Полосы поглощения атмосферных газов в инфракрасной области спектра.

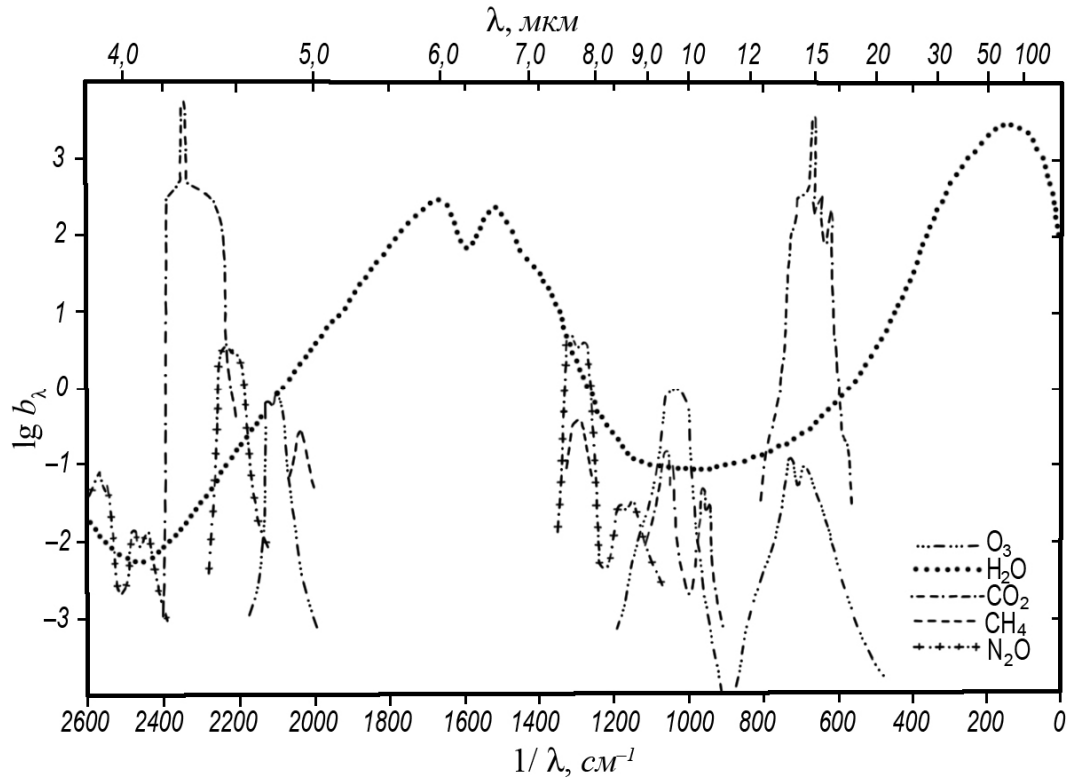


РИС. 2. Полосы поглощения атмосферных газов в инфракрасной области спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 56; 2, § 57.
2. Goody R. M., Atmospheric Radiation, 1, Oxford C. P., 1964. (Русский перевод: Гуди Р., Атмосферная радиация, I, Основы теории, изд-во «Мир», М., 1966.)
3. Pawsey J. L., Bracewell R. N., Radio Astronomy, Oxford C. P., 1955, p. 341. (Русский перевод 1-го изд.: Поззи Дж., Брейсуэлл Р., Радиоастрономия, ИЛ, М., 1953.)
4. Meeks M. L., J. Geoph. Res., 66, 3749 (1961).
5. Gray L. D., J. Q. S. R. T., 7, 143 (1967).
6. Turon-Lacarrieu P., Verdet J.-P., Ann. d'Ap., 31, 237 (1968).
7. Ferriso C. C. et al., J. Q. S. R. T., 6, 241 (1966).
- 8*. Краус Д., Радиоастрономия, «Сов. радио», М., 1973.

§ 59. Пропускание атмосферой солнечного излучения

Таблица дает относительное пропускание атмосферой всей лучистой энергии Солнца для прозрачного (свободного от пыли) воздуха.

Воздушная масса	Количество водяного пара в см осажденной воды на единицу воздушной массы					
	0,0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
0,5	0,902	0,852	0,837	0,821	0,812	0,805
1,0	0,859	0,794	0,778	0,762	0,752	0,745
2,0	0,796	0,715	0,699	0,682	0,671	0,644
3,0	0,743	0,652	0,636	0,618	0,609	0,604
4,0	0,704	0,607	0,590	0,572	0,565	0,560

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 57; 2, § 58.
2. Rimmer W. B., Allen C. W., Mem. Comm. Obs., Canberra, 3, No. 11 (1950).

§ 60. Ионосфера

f_0, f_x – критические частоты обыкновенной и необыкновенной волн соответственно
 f_H – гирочастота для магнитного поля H

- v_{ei}, v_{en} – частоты столкновений среднего электрона с ионами и с нейтральными частицами
 $v_{in} (\approx v_{nn})$ – частота столкновений иона с нейтральными частицами
 N_e – электронная концентрация (число электронов в единице объема)
 N_{max} – максимальная электронная концентрация ионосферного слоя
 $= (\pi m/e^2) f_0^2$
 $= 1,2404 \cdot 10^4 f_0^2 \text{ см}^{-3}$ [m – масса электрона, f в МГц]
 $= (\pi m/e^2) (f_x^2 - f_x f_H)$
 $= 1,2404 \cdot 10^4 (f_x^2 - f_x f_H)$ [f_x, f_H в МГц]
 f_H – $= (e^2/\pi m c) H = 2,7994 H$ МГц [H в Гс]
 В этом равенстве H есть, строго говоря, плотность магнитного потока (обычно обозначаемая через β) в гауссах, но в космическом пространстве она численно равна напряженности магнитного поля в эрстедах.
 α – коэффициент рекомбинации, такой, что скорость рекомбинации равна $\alpha N_i N_e$, где индекс i означает ион, а e – электрон, обычно $N_i = N_e$
 β – коэффициент релаксации, такой, что скорость электронной релаксации равна βN_e
 q – скорость ионизации (полученная, например, из солнечного спектра и ионосферных коэффициентов поглощения), тогда

$$dN_e/dt = q - \alpha N_e^2 - \beta N_e$$
 [обычно или α , или β]
 R – число солнечных пятен (число Вольфа)
 h – высота
 χ – зенитное расстояние
 Φ – фарадеевское вращение $= \frac{e^3}{2\pi m^3 c^2} \cdot \frac{1}{f^2} \int_0^\infty NH \cos \theta dz =$
 $= (2,36 \cdot 10^4/f^2) \int_0^\infty NH \cos \theta dz,$

где Φ в радианах, e в ед. СГСЭ, f в Гц, H в Гс, θ – угол между направлением поля и лучом, а интегрирование проводится вдоль пути луча. Вращение подчиняется правилу буравчика, если магнитное поле имеет *то же* направление, что и излучение.

Ионосферные слои

Величина	Единица измерения	D	E	F ₁	F ₂
Высота N_{max}	км	80	115	170	300
Молекулярная и атомная концентрации	см ⁻³	$4 \cdot 10^{14}$	10^{12}	$2 \cdot 10^{10}$	10^9
Поведение		Регулярное	Теория Чепмена	Теория Чепмена	Аномальное
f_0 , $R=0, \chi=0$ [6]	МГц	0,2	3,29	4,40	6,9
$R=100, \chi=0$			3,90	5,38	11,9
N_{max} , $R=0, \chi=0$ [6]	см ⁻³	600	$1,34 \cdot 10^5$	$2,40 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^5$
$R=100, \chi=0$			$1,88 \cdot 10^5$	$3,59 \cdot 10^5$	$17,7 \cdot 10^5$
q , $R=0$ [1, 8]	см ⁻³ · с ⁻¹	0,2	500	700	100
$R=100$			1000	1500	300
Толщина слоя	км	15	25	60	300
$\int q dh$, $R=0$	см ⁻² · с ⁻¹		$1,2 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$
$R=100$			$2,5 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$
Ионизирующее излучение с поверхности Солнца, $R=0$	фотон × см ⁻³ · с ⁻¹		$5 \cdot 10^{13}$	$18 \cdot 10^{13}$	$14 \cdot 10^{13}$
$R=100$			$12 \cdot 10^{13}$	$40 \cdot 10^{13}$	$40 \cdot 10^{13}$
Коэффициент рекомбинации α [9, 10]	см ⁻³ · с ⁻¹	10^{-6}	$16 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	10^{-9}
Коэффициент релаксации дневной β [1, 8]	с ⁻¹		10^{-3}	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-4}$
ночной β'	с ⁻¹				$5 \cdot 10^{-5}$
v_{ei}	с ⁻¹	3	400	200	400
v_{en} [2, 7]	с ⁻¹	$7 \cdot 10^5$	3000	250	10
T	К	180	320	1000	1500

Частота столкновений v_{en} [7]

$$v_{en} = [1,11 \cdot 10^{-7} N(N_2) + 7 \cdot 10^{-8} N(O_2)]u \text{ с}^{-1},$$

где u – энергия электрона в эВ, а N – число частиц в 1 см^3

Коэффициент ионизации фотонами [9]

$$\eta = 360/\lambda \quad 20 < \lambda < 1000 \quad [\lambda \text{ в } \text{Å}]$$

$$\approx 20 \quad \lambda < 20$$

Изменения с высотой параметров ионосферы

h , км	$\lg N_e$ (в см^{-3}) (дневное значение)	$\lg \alpha$ (α в $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) [9, 10]	$\lg \beta$ (β в с^{-1}) [1, 8]	$\lg v_{en}$ (v_{en} в с^{-1}) [2, 7]	$\lg v_i$ $\approx \lg v_{nn}$ (v_i, v_{nn} в с^{-1})
60	1,7	-5,2	-5,3	7,3	
70	2,2	-5,5	-5,1	6,6	
80	2,7	-6,3	-4,5	5,9	
90	3,5	-6,5	-4,0	5,2	
100	4,8	-6,7	-3,3	4,6	4,5
110	5,1	-6,9		4,1	3,9
120	5,1	-6,8	-3	3,7	3,3
150	5,3	-7,1	-3	3,0	2,2
200	5,4	-7,4	-3,2	2,1	1,0
250	5,7	-8,3	-3,5	1,5	0,4
300	5,9	-9,2	-3,9	1,0	-0,1
400	5,6	-10,3	-5	0	-0,9
500	5,3	-10,8	-6	-1	-1,6
600	4,9	-11,0	-6	-2	
1 000	4,5	-11	-7		
3 000	3,7	-11	-8		
10 000	2,9	-11	-9		

Ионосфера как целое

Эквивалентная толщина ниже максимума [5]

$$B = 60 \text{ км}$$

Эквивалентная толщина выше максимума [5]

$$A = 220 \text{ км}$$

Полное содержание электронов

$$\int_0^{\infty} N_e dh = N_{\max}(A + B) \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$$

Учет кривизны Земли в формулах для ионизации и поглощения. Множитель $\sec \chi$ в этих формулах надо заменить на $\text{Ch}(x, \chi)$ [3], где χ – зенитное расстояние Солнца, $\chi = Q + (h - h_0)/H$, $Q = (a + h_0)/H$, H – шкала высот, a – радиус Земли, h – высота, h_0 – высота, на которой скорость ионизации достигает максимума.

$\text{Ch}(x, \chi)$ [1, 3, 4]

Q	χ sec χ	30° 1,155	45° 1,414	60° 2,000	75° 3,864	80° 5,76	85° 11,47	90° ∞	95°
50	1,148	1,389	1,901	3,228	4,19	5,82	8,93	16	
100	1,151	1,401	1,946	3,473	4,70	7,07	12,58	30	
200	1,153	1,407	1,972	3,646	5,10	8,28	17,76	68	
400	1,154	1,411	1,985	3,742	5,38	9,33	25,09	220	
800	1,154	1,412	1,993	3,800	5,55	10,15	35,46	1476	
1000	1,155	1,413	1,994	3,812	5,59	10,35	39,65		

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 60; 2, § 61.
2. Thrane E.V., Pliggott W. R., J. A. T. P., 28, 721 (1966).
3. Chapman S., Proc. Phys. Soc. 43, 26, 483 (1931); B66, 710 (1953).
4. Swider W., Planet Space Sci., 12, 761 (1964).
5. Roger R. S., J. A. T. P., 26, 475 (1964).
6. Allen C W., Terr. Mag., 53, 433 (1948).
7. Phelps A. V., Pack J. L., Phys. Rev., 121, 798 (1961).
8. Rishbeth H., J. A. T. P., 26, 657 (1964); 28, 911 (1966).
9. Allen C W., Space Sci. Rev., 4, 91 (1965).
10. Thomas L., J. A. T. P., 33, 157 (1971).
- 11*. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М., Солнце и ионосфера, «Наука», М., 1969.

§ 61. Ночное небо и полярные сияния

Единицы яркости ночного неба:

1 фотон = $1,986 \cdot 10^{-8} / \lambda_A$ эрг [λ_A в Å]

1 рэлей [4] – яркость, при которой вертикальный столб с основанием 1 см^2 излучает во всех направлениях 10^6 фотонов за 1 с
 = $1,58 \cdot 10^{-3} / \lambda_A$ эрг/($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$) при наблюдении в зените
 = $1,96 \cdot 10^{-11}$ сб для $\lambda \approx 5500 \text{ Å}$

1 звезда ($m_v = 10$) на кв. градус при наблюдении вблизи 5500 Å и при хорошей прозрачности атмосферы

= 0,0036 рэлей/Å

= $0,072 \cdot 10^{-9}$ сб

Яркость ночного неба [1, 2, 8]

Источник	Фотографическая	Визуальная	Фотометрическая
	число звезд на 10-й величины на кв. град		10^{-9} сб
Свечение воздуха (вблизи зенита)			
атомные линии	0	40	3
полосы и континуум	30	50	4
Зодиакальный свет (вдали от эклиптики)	60	100	6
Слабые звезды, $m > 6$			
(галактический полюс)	16	30	2
(среднее небо)	48	95	7
(галактический экватор)	140	320	23
Рассеянный свет Галактики	10	20	1
Полная яркость			
(зенит, среднее небо)	145	290	21
(на высоте 15° , среднее небо)	190	380	28

Спектр излучения ночного неба [1, 2, 6]

Источник	$\lambda, \text{Å}$ и дополнительные данные	Интенсивность		
		ночное небо	сумеречное небо	полярные сияния
		рэлей		Килорэлей
O I	5 577	300	180	100
»	6 300–6 364	200	1000	50
N I	10 400			100
»	3 466			7
»	5 199		10	1
O I	Фотографическая, инфракрасная и далекая ультрафиолетовая области			50
N II	Видимая и далекая ультрафиолетовая области			45
Na I	5 890–5 896	лето зима	30 180	1000 5 000
				1 1
H I	H α , 6 563	12		10
»	L α , 1 216	2 500		100
Ca II	3 933–3 967		150	
Li I	6 708		200	
N ₂	Инфракрасная область. 1-я положительная система			2 000
»	Ультрафиолетовая область. 2-я положительная система			100
»	Синяя область, система полос Вегарда – Каплана	100		150
N ⁺	Ультрафиолетовая и визуальная области. 1-я отрицательная система		1000	
»	6 300 ↔ 8 900			2 500
O ₂	3 000 ↔ 4 000, система полос Герцберга	1 000		
»	8 645, атмосфера (0,1)	1 000		400
»	15 800, атмосфера, инфракрасная область		20 000	1 000
OH	15 800 (4,2)	150 000		
»	Видимая область (5,0) (7, 1) (8, 2) (9,3)	130		
»	Полное излучение OH [3]	10^6		

Показатель цвета ночного неба $\approx +0,7$
 Интенсивность свечения воздуха увеличивается с широтой, отношение (интенсивность на широте 70°)/(интенсивность на широте 20°) ≈ 2

Изменение свечения неба в зависимости от солнечной активности (R – число солнечных пятен (число Вольфа)):

Для линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ отношение (интенсивность при $R = 100$)/(интенсивность при $R = 0$) $\approx 1,6$.

Для других длин волн это отношение меньше.

Яркость неба при полной Луне

Фотографическая	Визуальная
число звезд 10-й величины на кв. градус	число звезд 10-й величины на кв. градус
11 000	1 000

Для других фаз Луны приведенные значения надо умножить на $\phi(\alpha)$ [§ 66].

Изменение яркости неба в течение сумерек [9]

Положение Солнца ниже горизонта	0°	6°	12°	18°
Логарифм яркости неба	+2,7	0,0	-2,0	-3,1

Зона максимальной активности полярных сияний

Геомагнитная широта = 68°

Высоты полярных сияний

Резкая нижняя граница = 98 км

Максимум эмиссии = 110 км

Обычный верхний край = 300 км

Верхний край, освещенный Солнцем

= 700 км (1000 км в экстремальных случаях)

Поток протронов одинаковой энергии, необходимый для создания яркости 10 килорэлей в линии $\text{H}\alpha$ при наблюдении в зените [5]

Энергия протона, кэВ	Минимальная высота проникновения, км	Фотоны $\text{H}\alpha$ Протоны	Поток протонов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Полная энергия падающего потока, эВ/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$)
130	100	60	$1,6 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^{13}$
27	110	27	$5 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{13}$
8,5	120	7	$14 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{13}$

Международные коэффициенты яркости полярных сияний [4]

I. C. V. I	яркость для 5577 \AA	=	1 килорэлей $\approx 10^{-8}$ сб.
II	» » »	=	10 килорэлей $\approx 10^{-7}$ сб.
III	» » »	=	100 килорэлей $\approx 10^{-6}$ сб.
IV	» » »	=	1000 килорэлей $\approx 10^{-5}$ сб.

Соотношения между энергией, жесткостью, скоростью и геомагнитной широтой частиц, влетающих в атмосферу, см. в § 130.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 61; 2, § 62.
2. Roach F. E., Smith L. L., N. B. S., Tech. Note No. 214, 1964.
3. Meinel, ref. Nicotet M., 7th Rep. Sol.-Terr. Relations, 165, 1951.
4. Hunten D. M., Roach, Chamberlain, J. A. T. P., 8, 345 (1951).
5. Chamberlain J. W., Ann. Geoph., 17, 90 (1961).
6. Красовский В. И., Шефов И. Н., Ярин, Planet Space Sci., 9, 883 (1962).
7. Millman P. M., Physics and Dynamics of Meteors, I. A. U. Symp., 33, 84 (1968).
8. Landolt-Börnstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965, p. 61.
9. Розенберг Г. В., Сумерки, Физматгиз, М., 1963.

§ 62. Геомагнетизм

Магнитный дипольный момент Земли (1970) [1,2,7]

$$= 7,98 \cdot 10^{25} \text{ ед. СГСМ}$$

$$- 0,04 \cdot 10^{25} \text{ ед. СГСМ в десятилетие}$$

Направление на северный полюс диполя (1970) [1, 2]

широта = $78,6^\circ$ с. ш. $+0,04^\circ$ в десятилетие

долгота = $70,1^\circ$ $+0,07^\circ$ в десятилетие

Эксцентричный диполь (1970) [3, 7]

Смещение относительно центра Земли = $462 \text{ км} = 0,0725 R_\oplus$

в направлении $18,3^\circ$ с. ш. $147,8^\circ$ в. д.

Полюса эксцентричного диполя (для 1970 г. и смещение за десятилетие)

$81,5^\circ$ с. ш. $+0,2^\circ$ в десятилетие

$86,8^\circ$ з. д. $+1,4^\circ$ в десятилетие

$75,1^\circ$ ю. ш. $-0,2^\circ$ в десятилетие

$119,3^\circ$ в. д. $-0,7^\circ$ в десятилетие

Положение наклона 90° для эксцентричного диполя (1970)

$82,8^\circ$ с. ш. $+0,14^\circ$ в десятилетие

$145,9^\circ$ з. д. $+5,5^\circ$ в десятилетие

$67,4^\circ$ ю. ш. $-0,6^\circ$ в десятилетие

$129,2^\circ$ в. д. $-0,9^\circ$ в десятилетие

Геомагнитные полюса (полюса наклона) [1, 4, 7]

Северный полюс (наклонение 90°) 76° с. ш. 101° з. д.

Южный полюс (наклонение 90°) 66° ю. ш. 140° в. д.

Горизонтальная составляющая магнитного поля H на геомагнитном экваторе

$$= 0,31 \text{ Гс} (0,29 \leftrightarrow 0,40)$$

Вертикальная составляющая магнитного поля Z на северном геомагнитном полюсе

$$= 0,58 \text{ Гс}$$

Вертикальная составляющая магнитного поля Z на южном геомагнитном полюсе

$$= 0,68 \text{ Гс}$$

Магнитное поле диполя

$$H = 0,309 \cos \varphi \text{ Гс,}$$

$$Z = 0,618 \sin \varphi \text{ Гс,}$$

где φ – геомагнитная широта

Карты мира в геомагнитных координатах см. в [4]

Зона максимальной геомагнитной активности

геомагнитная широта = 68°

Система токов, охватывающая Землю

Узел восточно-западных токов

Широта = 38°

Ток между узлом и одним из полюсов или экватором в равноденствие, при нулевом числе солнечных пятен.

$$= 59\,000 \text{ А}$$

Связь между индексами K_p и a_p и γ – изменением магнитного поля.
с трехчасовым периодом для среднеширотных пунктов
(широта $\approx 45^\circ$) [1,4,5]

Индекс K_p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Индекс a_p	0	4	7	15	27	48	80	145	220	380	
$\gamma (= 10^{-5} \text{ Гс})$	0	5	10	20	40	70	120	200	330	500	∞

Множители, на которые надо умножить приведенные значения γ , меняются от 0,6 для низких широт (хотя для самого геомагнитного экватора множитель выше) до 5,0 в зоне полярных сияний.

Связь между различными суточными индексами

C_9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_p \approx C_i$	0,05	0,25	0,45	0,65	0,85	1,05	1,30	1,60	1,90	2,20
$A_p \approx a_p$ (средний)	3	5	8	11	15	20	31	52	109	240
K_p (суммарный) = $\sum K_p$	6	10	15	18	22	26	33	39	49	64
Max K_p	1½	2½	3½	4	4½	5	6	7	8	9

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 62; 2, § 63.
2. Price A. T., The Earth's Mantle, ed. Gaskell, Academic Press, 1967, p. 125.
3. Parkinson W. D., Cleary J., Geoph. J., 1, 346 (1958).
4. Handbook of Geophysics, USAF, Macmillan, NY, 1960, p. 10.
5. Bartels J., Cp and Kp tabulations and diagrams, Göttingen Ak. Wiss., 1884↔1950, 1951; 1937↔1958, 1958.
6. Tabulations of Solar-Geophysical Data, A. S. D. C., Boulder, ежемесячно.
7. I. A. G. A. Commission, 2, J. Geoph. Res., 74, 4407 (1969).

§ 63. Метеориты и кратеры

Распространенность каменных и железных метеоритов [1, 2]

	Метеориты, наблюдаемые при падении	Находимые метеориты
Железные	6%	66%
Железо-каменные	2%	8%
Каменные	92%	26%

Эти цифры показывают относительную трудность *обнаружения* каменных метеоритов; столбец «Метеориты, наблюдаемые при падении» дает относительную распространенность. Высокий процент каменных метеоритов среди метеоров связан, по-видимому, с их большими размерами.

Плотность метеоритов [1]

Железные	7,5 ↔ 8,0 г/см ³
Железо-каменные	5,5 ↔ 6,0 г/см ³
Каменные	3,0 ↔ 3,5 г/см ³

Падение метеоритов, достаточно больших для того, чтобы быть замеченными и найденными [1, 2]
= 2 метеорита в сутки на всей Земле

О полной массе падающих метеоров см. § 72.

Наиболее вероятный размер находимых метеоритов [2]

Железные	15 кг
Каменные	3 кг

Масса метеора до попадания его в земную атмосферу
≈ 100 кг

Масса наибольшего из известных метеоритов (первоначальная)
= 8 · 10⁴ кг

Тунгусский метеорит 1908 г. был, вероятно, еще больше.

Некоторые метеоритные кратеры [1, 3]

Название и местонахождение кратера	Год открытия	Широта	Долгота	Число кратеров	Диаметр наибольшего кратера, м	Высота наружного вала, м	
						над окружающей местностью	от дна воронки
Баррингер, Аризона, США	1891	35° 02' с. ш.	111° 01' з. д.	1	1240	39	190
Тунгусский, Сибирь, СССР	1908	60 55 с. ш.	101 57 в. д.	10+	52		
Одесса, США	1921	31 48 с. ш.	102 30 з. д.	2	170	3	4
Далгаранга, Австралия	1923	27 45 ю. ш.	117 05 в. д.	1	70		5
о. Эзель, Каалиярв, Эстонская ССР	1927	58 24 с. ш.	22 40 в. д.	7	100		15
Кампо-дель-Сьело, Аргентина		28 40 ю. ш.	61 40 з. д.	Много	75	1	
Хенбери, Австралия	1931	24 34 ю. ш.	133 10 в. д.	13	150		15
Вабар, Саудовская Аравия	1932	21 30 с. ш.	50 28 в. д.	2	100		12
Хэвиланд, Канзас, США	1933	37 35 с. ш.	99 10 з. д.	1	14		3
Боксхоул, Австралия	1937	22 37 ю. ш.	135 12 в. д.	1	175		15
Вольф Крик, Австралия	1947	19 18 ю. ш.	127 46 в. д.	1	820	30	60
Эро, Франция	1950	43 32 с. ш.	3 08 в. д.	6	230	0	50
Чабб, Нью Квебек, Канада	1950	61 17 с. ш.	73 40 з. д.	1	3 400	100	380
Аулу, Мавритания (Ауэллул)	1950	20 17 с. ш.	12 42 з. д.	1	300		20
Брент, Онтарио, Канада	1951	46 04 с. ш.	78 29 з. д.	1	3 200		70
Мургаб, Таджикская ССР	1952	38 05 с. ш.	76 16 в. д.	2	80		15
Дип Бэй, Саск, Канада	1956	56 24 с. ш.	103 00 з. д.	1	13 000		340
Рисс Кессель, Бавария	1904	48 53 с. ш.	10 37 в. д.	1	24 000		
оз. Клируотер, Квебек, Канада	1954	56 10 с. ш.	74 20 з. д.	2	26 000		30

Отношение кратер/метеорит

$$\begin{aligned} & \text{(вещество, выброшенное из метеоритного кратера)/(метеорит)} \\ & = 60\,000 \end{aligned}$$

Энергия метеора, необходимая для образования земного или лунного кратера диаметром d

$$= 4 \cdot 10^{13} d^3 \text{ эрг [} d \text{ в метрах]}$$

Энергия взрыва 1 кт тротила

$$= 4,2 \cdot 10^{19} \text{ эрг}$$

Диаметр и глубина метеоритного кратера. Следующая связь приближенно применима к *новым* метеоритным кратерам, воронкам от бомб и лунным кратерам.

Диаметр, м	1	10	100	1000	10 000	100 000
Глубина относительно наружного вала, м	0,12	2,7	27	180	1000	4 700
Высота наружного вала над окружающей поверхностью, м		0,5	7	70	370	1200

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **2**, § 64.
2. Brown H., J. Geoph. Res., **65**, 1679 (1960); **66**, 1316 (1961).
3. Freeberg J. H., U. S. Geol. Survey Bull., **1220** (1966).

Планеты и спутники

§ 64. Планетная система

Общая масса планет $= 447,8 M_{\oplus} [M_{\oplus} = 5,976 \cdot 10^{27} \text{ г}]$

» » спутников $= 0,12 M_{\oplus}$

» » малых планет $= 0,0003 M_{\oplus}$

» » метеоритного и кометного вещества
 $= 10^{-9} M_{\oplus}$

» » планетной системы $= 448,0 M_{\oplus} = M_{\odot} / 743,2$

Полный момент количества движения планетной системы [1, 2]
 $= 3,148 \cdot 10^{50} \text{ г/(см}^2 \cdot \text{с)}$

Полная кинетическая энергия планетной системы (поступательного движения)
 $= 1,99 \cdot 10^{42} \text{ эрг}$

Полная энергия вращения планет $= 0,7 \cdot 10^{42} \text{ эрг}$

Неизменяемая плоскость солнечной системы [1–3]

долгота восходящего узла $\varOmega = 106^{\circ}44' + 59' T$,

наклонение $I = 1^{\circ}39' - 0,3' T$,

где T – эпоха в столетиях от 1900,0.

Период обращения комет и астероидов

$= 1,000\ 040\ 27 a^{3/2}$ тропических лет,

где a – большая полуось орбиты в а. е.

Названия планет и закон Бодде. Закон Бодде заключается в том, что расстояния планет от Солнца в единицах расстояния Земли от Солнца можно выразить формулой $0,4 + 0,3 \cdot 2^n$, где $n = -\infty$ для Меркурия, 0 для Венеры, 1 для Земли, 2 для Марса, 3 для астероидов и т. д.

Планета	(приставка)	(прилагательное)	Закон Бодде		Истинное расстояние от Солнца, а. е.
			n	расстояние от Солнца, а, е.	
Меркурий			$-\infty$	0,4	0,39
Венера		Венерианский	0	0,7	0,72
Земля	Гео-	Земной (Теллурический)	1	1,0	1,00
Марс	Арео-	Марсианский	2	1,6	1,52
Астероиды		Астероидный	3	2,8	2,9
Юпитер	Иови-		4	5,2	5,20
Сатурн	Сатурно-		5	10,0	9,54
Уран			6	19,6	19,2
Нептун			7	38,8	30,1
Плутон			8	77,2	39,5

ЛИТЕРАТУРА

1. А, Q. 1, § 82; 2, § 65.
2. Clemence G. M., Brouwer D., A. J., 60, 118 (1955).
3. Handbook B. A. A. (ежегодно).

§ 65. Орбиты и физические характеристики планет

Элементы орбит даются не с полной точностью, необходимой для вычисления эфемерид, так как это повлекло бы за собой сложные выражения для некоторых элементов. Эпоха (за исключением эпохи для L) есть $1900 + T$ столетий. Долгота перигелия $\tilde{\omega}$ измеряется от точки весеннего

Планетные орбиты

Планета	Большая полуось орбиты		Сидерический период		Синодический период, сутки [1, 3]	Среднее суточное движение [1-3]	Средняя орбитальная скорость, км/с [1, 3]	Эксцентриситет e (1970) [1-3]	Наклонение к эклиптике i (1970) [1-3]	Средняя долгота			Перигелий		
	а. е. [1-4]	10^6 км	в тропических годах [1-4]	в сутках						восходящего узла ϱ [1-4]	перигелия $\tilde{\omega}$ [1-3]	планеты L 1970 январь 0,5 [1-3]	последняя дата прохождения до 1970 г. [5]	расстояние q , а. е. [2]	
Меркурий	♿	0,387 099	57,9	0,240 85	87,969	115,88	4,092 339°	47,89	0,205 628	7° 0' 15"	47° 8' 45" +4267" T	75° 53' 54" +5596" T	47° 58' 57"	1970 декабрь 25	0,3075
Венера	♀	0,723 332	108,2	0,615 21	224,701	583,92	1,602 131	35,03	0,006 787	3 23 40	75 46 47 +3239 T	130 09 10 +5010 T	265 24 52	1970 май 21	0,7184
Земля	♁	1,000 000	149,6	1,000 04	365,256		0,985 609	29,79	0,016 722	—	—	101 13 11 +6180 T	99 44 32	1970 январь 1	0,9833
Марс	♂	1,523 691	227,9	1,880 89	686,980	779,94	0,524 033	24,13	0,093 377	1 51 0	48 47 11 +2776 T	334 13 05 +6626 T	12 40 31	1969 октябрь 21	1,3814
Юпитер	♃	5,202 803	778,3	11,862 23	4 332,589	398,88	0,083 091	13,06	0,048 45	1 18 17	99 26 30 +3639 T	12 43 15 +5798 T	203 25 11	1963 сентябрь 26	4,951
Сатурн	♄	9,538 84	1427,0	29,4577	10 759,22	378,09	0,033 460	9,64	0,055 65	2 29 22	112 47 20 +3142 T	91 05 50 +7050 T	43 00 20	1944 сентябрь 8	9,008
Уран	♅	19,1819	2869,6	84,0139	30 685,4	369,66	0,011 732	6,81	0,047 24	0 46 23	73 28 42 +1796 T	171 32 +5400 T	184 17 25	1966 май 20	18,28
Нептун	♆	30,0578	4496,6	164,793	60189	367,49	0,005 981	5,43	0,008 58	1 46 22	130 40 52 +3954 T	46 40 +5000 T	238 55 24	1876 сентябрь 2	29,80
Плутон	♇	39,44	5900	247,7	90 465	366,73	0,003 979	4,74	0,250	17 10	109 44	223		1741 октябрь 24	29,58

Физические характеристики планет

Планета	Угловой радиус (экваториальный)		Радиус (экваториальный)		Сжатие $\frac{R_e - R_p}{R_p}$ [1, 7, 8]	Объем $\oplus = 1$ [1, 7]	Обратная масса (включая спутники) $1/\odot = 1$ [1, 7, 8, 18, 19]	Масса \mathcal{M} (без спутников) $\oplus = 1$ [1, 7]	Плотность ρ , г/см ³ [1, 7]	Ускорение силы тяжести на поверхности, см/с ²		Скорость освобождения, км/с [1, 3, 7]	Сидерический период вращения (экваториальный) [1, 3, 4, 10, 14]	Наклонение экватора к орбите [1, 3, 4]	Момент инерции $C, \mathcal{M} R_e^2$ [1, 15]
	на расстоянии 1 а. е. [1, 7]	в среднем С или О [1, 7]	км [1, 7, 8, 17]	$\oplus = 1$ [1, 7, 8, 17]						гравитационное [1, 3, 7]	экваториальное центробежное [1, 3, 7]				
Меркурий	3,37"	5,45"	2 425	0,380	0,0	0,54	6 010 000	1,0123	5,4	363	-0,0	4,2	59 ^d	< 28°	0,4
Венера	8,46	30,5	6 070	0,950	0,0	0,88	408 400	0,815	5,2	860	-0,0	10,3	244,3	3	0,34
Земля	8,80		6 378	1,000	0,0034	1,000	328 910	1,000	5,518	982	-3,39	11,2	23 ^h 56 ^m 04,1 ^s	23 27'	0,3335
Марс [17]	4,68	8,94	3 395	0,532	0,009	0,149	3 098 500	0,1075	3,95	374	-1,71	5,0	24 37 22,6	23 59	0,377
Юпитер [9]	98,37	23,43	71 300	11,18	0,063	1316	1 047,39	317,83	1,34	2590	-225	61	1 9 50 30 *	3 05	0,25
Сатурн	82,8	9,76	60 100	9,42	0,098	755	3 498,5	95,147	0,70	1130	-176	37	10 14 **	26 44	0,22
Уран	32,9	1,80	24 500	3,84	0,06	52	22 900	14,54	1,58	1040	-60	22	10 49	97 55	0,23
Нептун [11,12]	31,1	1,06	25 100	3,93	0,021	44	19 300	17,23	2,30	1400	-28	25	15 48	28 48	0,29
Плутон [13, 16, 21]	4,1	0,11	3 200	0,50	—	0,1	2 200 000	0,17	—	—	—	—	6 9		

* [1, 4] Юпитер II 9^h 55^m 40,63^s на широте > 10° с. ш. или ю. ш.
Юпитер III 9^h 55^m 29,37^s из радионаблюдений
** [1] Сатурн 10^h 38^m для умеренных зон.

равноденствия γ , следовательно, $\tilde{\omega} = \delta\varrho + \omega$, где ω – долгота перигелия, отсчитываемая вдоль орбиты от восходящего узла. $\delta\varrho$ и L (долгота) также отсчитываются от точки γ .

О вековом изменении планетных орбит см. в [20].

В столбце «Угловой радиус» таблицы физических характеристик С означает нижнее соединение (только для Меркурия и Венеры), О – противостояние. В столбце «Наклонение экватора к орбите» значения, большие 90° , указывают на то, что вращение обратно по отношению к орбитальному движению.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. **1**, § 83; **2**, § 66.
2. Explanatory Supplement of the Ephemeris, 1961.
3. Handbook В. А. А. (ежегодно).
4. Connaissance des temps, 1970.
5. Astronomical Ephemeris.
6. Baker R. M. L., Makemson M. W., *Astrodynamic*s, 2nd ed., Academic Press, 1967.
7. Козловская С. В., Бюллетень института теоретической астрономии, **9**, 330 (1963).
8. Вес А., Dolfus А., in ESRO SP-53, 1970.
9. O'Handley D. A., *Astronomical Papers American Ephemeris*, **22**, III, 315 (1969).
10. Dyce R. B., Pettengill, Shapiro, A. J., **72**, 351 (1967).
11. Taylor G. B., M. N., **147**, 27 (1970).
12. Kovalevsky J., Link F., *Astron. Ap.*, **2**, 398 (1969).
13. Duncombe R. L., Klepczynski, Seidelmann, A. J., **73**, 830 (1968).
14. Donivan F. F., Carr T. D., *Ap. J.*, **157**, L65 (1969).
15. Fish F. F., *Icarus*, **7**, 251 (1967).
16. Halliday I. et al., *Publ. A. S. P.*, **78**, 113 (1966).
17. Öpik E., *Irish A. J.*, **6**, 69 (1963).
18. Mulholland J. D., *Ap. J.*, **165**, 105 (1971).
19. Ash M. B., Shapiro, Smith, A. J., **72**, 338 (1967).
20. Brouwer D., Clemence G. M., *Planets and Satellites*, ed. Kuiper and Middlehurst, Chicago, 1961, p. 31. (Русский перевод: Планеты и спутники, под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхерст, изд-во «Мир», М., 1963.)
21. Duncombe R. L. et al., *Sky and Telescope*, **42**, 84 (1971).
- 22*. Теуфель В. Г. (ред.), *Физические характеристики планет-гигантов*, «Наука» Казах. ССР, Алма-Ата, 1971.
- 23*. Планеты и спутники, под ред. А. Дольфюса, изд-во «Мир», М., 1974.
- 24*. БСЭ, 3-е изд., ст. «Юпитер».

§ 66. Фотометрия планет и спутников

$A = pq$ – альbedo Бонда – отношение всего света, отраженного от сферы, ко всему свету, падающему на нее

r, Δ – расстояние планеты от Солнца и расстояние планеты от Земли в а. е.

\mathcal{R} – радиус планеты, также в а. е. = (угловой радиус, видимый с расстояния 1 а. е., в секундах дуги)/206 265

α – угол фазы – угловое расстояние между Солнцем и Землей, видимое с планеты

$\varphi(\alpha)$ – закон фазы – зависимость яркости планеты от α , принято считать $\varphi(0) = 1,0$

– $2,5 \lg \varphi(\alpha)$ – закон фазы в звездных величинах

p – отношение яркости планеты при $\alpha = 0$ к яркости идеально матового диска, имеющего те же положение и видимый размер, что и планета

Тогда

$$\lg p + \lg \varphi(\alpha) = 0,4 (m_{\odot} - m_{\text{планета}}) + 2 \lg (r\Delta / \mathcal{R}),$$

$$\lg p = 0,4 (V_{\odot} - V(1, 0)) - 2 \lg \mathcal{R},$$

где $V(1, 0)$ – звездная величина V при $r\Delta = 1, \alpha = 0$. Если q неизвестно вследствие малого диапазона α , p иногда называют альbedo или геометрическим альbedo.

Иногда вместо $p\varphi(\alpha)$ пишут $p(\alpha)$. $q = 2 \int_0^{\pi} \varphi(\alpha) \sin \alpha d\alpha$ – фактор, учитывающий закон фаз. Ниже приводятся значения q для некоторых случаев:

Идеально матовый диск $q = 1,00$

Идеально матовая сфера (закон Ламберта) $q = 1,50$

Сфера, отражающая по закону Ломмеля–Зеелигера $q = 1,64$

$\varphi(\alpha) = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha)$ (т. е. отражение пропорционально освещенной площади) $q = 2,00$

Сфера с металлическим отражением $q = 4,00$

Е – в максимуме элонгации ($\alpha = 90^\circ$), для Меркурия $18^\circ \leftrightarrow 28^\circ$, для Венеры $47^\circ \leftrightarrow 48^\circ$

S – видимо с Солнца

Op – в среднем противостоянии ($\alpha = 0^\circ$)

L – сатурноцентрическая разность долгот Солнца и Земли относительно плоскости кольца Сатурна, т. е. положительное значение величины ($V + \omega - U$) из Nautical Almanac до 1960 г., $0^\circ < L < 6^\circ$

B – сатурноцентрическая широта Земли относительно плоскости кольца Сатурна, $0^\circ < |B| < 27^\circ$ (заметим двойное значение B)

OM – в противостоянии с L и $\beta = 0$

B, V – звездные величины, отсюда V_E, V_{Op} и т. д.

B – V, U – B – показатели цвета

$V(1, 0) = V$ при $r\Delta = 1, \alpha = 0$

$V = 5 \lg r\Delta + V(1, 0) - 2,5 \lg \varphi(\alpha)$

Изменение звездной величины с углом фазы в первом приближении пропорционально α^1 , а также зависит и от более высоких степеней α ; в таблице мы старались выразить закон фаз только двумя членами. Существует следующая приближенная связь между величиной q и коэффициентом при α^1 :

q	2,0	1,5	1,0	0,5	0,2
коэффициент при α^1	0,006	0,010	0,018	0,034	0,057

Закон фаз для Луны [1]

α	$m_\alpha - m_0$	$\varphi(\alpha)$
0°	0,00	1,000
5	0,08	0,929
10	0,23	0,809
20	0,51	0,625
30	0,79	0,483
40	1,06	0,377

α	$m_\alpha - m_0$	$\varphi(\alpha)$
50°	1,35	0,288
60	1,62	0,225
70	1,91	0,172
80	2,24	0,127
90	2,63	0,089
100	3,04	0,061

α	$m_\alpha - m_0$	$\varphi(\alpha)$
110°	3,48	0,041
120	3,93	0,027
130	4,44	0,017
140	5,07	0,009
150	5,9	0,004
160	7,5	0,001

Фотометрические характеристики планет и спутников

Планета, спутник	p	q [1, 2, 4]	A	V	Поло- жение	rΔ (а. е.) ²	B-V [4, 5]	U-B	V(1, 0)	Зависимость V от фазы и др., α, L в °	
Меркурий	0,096	0,58	0,056	-0,2	Е	0,36	+0,91	+0,4	-0,36 ^m	$+0,027\alpha + 2,2 \cdot 10^{-13} \alpha^6$	
Венера	0,6	1,2	0,72	-4,22	Е	0,50	0,79	0,5	-4,34	$+0,013\alpha + 4,2 \cdot 10^{-7} \alpha^3$	
Земля	0,37	1,05	0,39	-3,84	S	1,00	0,2		-3,9		
Марс	[3]	0,154	1,02	0,16	-2,02	Op	0,80	1,37	0,6	-1,51	$+0,016\alpha$
Юпитер	[7]	0,44	1,6	0,70	-2,6	Op	21,9	0,8	0,4	-9,25	$+0,014\alpha$
Сатурн		0,47	1,6	0,75	+0,7	OM	81,6	1,0	0,6	-9,0	$+0,044L - 2,6 \sin B + 1,2 \sin^2 B$
Уран		0,57	1,6	0,90	+5,5	Op	349	0,55	0,3	-7,15	$+0,001\alpha$
Нептун		0,51	1,6	0,82	+7,85	Op	876	0,45	0,2	-6,90	$+0,001\alpha$
Плутон		0,12	1,2	0,145	+14,9	Op	1521	0,79	0,3	-1,0	
Церера	[8, 10]	0,12	0,3	0,035	+6,85	Op	4,89	0,71	0,42	+3,40	$+0,05\alpha$
Паллада	[8, 10]	0,12	0,4	0,05	+7,99	Op	4,90	0,65	0,26	+4,53	$+0,04\alpha$
Юнона	[8, 10]	0,28	0,5	0,14	+8,86	Op	4,46	0,81	0,39	+5,62	$+0,03\alpha$
Веста	[8, 9]	0,44	0,6	0,27	+6,08	Op	3,21	0,77	0,46	+3,54	$+0,03\alpha$
Эрос	[8]	0,30	0,8	0,23	+10,66	Op	0,67	0,86	0,45	+11,44	$+0,02\alpha$
Луна	[6, 12]	0,112	0,60	0,067	-12,73	Op	0,0026	0,91	0,45	+0,23	$+0,026\alpha + 4,0 \cdot 10^{-9} \alpha^4$
Ио	[5]	0,9	0,6	0,55	+4,8	Op	21,9	1,15	1,3	-1,9	$+0,04\alpha$
Европа		0,8	0,6	0,5	+5,2	Op	21,9	0,85	0,5	-1,5	$+0,03\alpha$
Ганимед		0,5	0,6	0,3	+4,5	Op	21,9	0,8	0,5	-2,2	$+0,03\alpha$
Каллисто		0,26	0,6	0,15	+5,5	Op	21,9	0,85	0,55	-1,2	$+0,07\alpha$
Титан	[11]	0,21			+8,36	Op	81,6	1,30	0,75	-1,1	$+0,009\alpha$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 84; 2, § 67.
2. Sagan C., Space Sci. Rev., 11, 827 (1971).
3. Коваль И. К., А. Ж., 45, 841 (1968).
4. Irvine W. M. et al., A. J., 73, 251, 807 (1968).
5. Harris D. L., Planets and Satellites, ed. Kuiper and Middlehurst, Chicago, 1961, p. 272. (Русский перевод: Планеты и спутники, под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхерст, ИЛ, М., 1963.)

6. *Minnaert M.*, Planets and Satellites, ed. Kuiper and Middlehurst, Chicago, 1961, p. 213. (Русский перевод: Планеты и спутники, под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхерст, ИЛ, М., 1963.)
7. *Taylor D. J.*, Icarus, **4**, 362 (1965).
8. *Haupt H.*, Mitt. U.-S., Wien, **5**, 31 (1951).
9. *Gehrels T.*, A. J., **72**, 929 (1967).
10. *Watson F. G.*, Between the Planets, rev. ed., Harvard U. P., 1956. (Русский перевод 1-го изд.: *Ватсон Ф.*, Между планетами, Гостехиздат, М., 1947.)
11. *Blanco C., Catalano S.*, Astron. Ap., **14**, 43 (1971).
12. *Gallouet L.*, Ann. d'Ap., **27**, 423 (1964).
- 13*. *Теуфель В. Г.* (ред.), Физические характеристики планет-гигантов, «Наука» Казах. ССР, Алма-Ата, 1971.
- 14*. Планеты и спутники, под ред. А. Дольфюса, изд-во «Мир», М., 1974.
- 15*. БСЭ, 3-е изд., ст. «Юпитер».

§ 67. Спутники планет

Основные элементы орбит и физические характеристики даны в таблице. Для возможности сравнения с наблюдениями некоторые величины отнесены к противостоянию с Землей, обозначенному Ор.

Вычисление наклонений орбит спутников осложнено прецессией около «собственной плоскости», которая обычно близка к плоскости экватора планеты. Наклонения измерены относительно экватора планеты, и значения, большие 90° , указывают на то, что движение обратное. Наклонение орбиты Луны к эклиптике составляет всего $5,1^\circ$. Величина, обратная массе спутников как целого:

Юпитер	$5130 (\text{масса Юпитера})^{-1}$
Сатурн	$3990 (\text{масса Сатурна})^{-1}$
Уран	$9900 (\text{масса Урана})^{-1}$

Общая масса всех спутников $= 7,34 \cdot 10^{26}$ г

Существуют следующие соотношения между средними движениями n_i спутников планет [2, 9]:

Юпитер	$n_1 - 3n_2 + 2n_3 = 0$
Сатурн	$5n_1 - 10n_2 + n_3 + 4n_4 = 0$
Уран	$n_5 - 3n_1 + 2n_2 = 0$
	$n_1 - n_2 - 2n_3 + n_4 = 0$

Система колец Сатурна

Радиус (предельное значение)	$137 \cdot 10^3$ км
Внешнее кольцо А, умеренная яркость	$120 \cdot 10^3$ км
Щель Кассини, темная	$117 \cdot 10^3$ км
Основное кольцо В, очень яркое	$90 \cdot 10^3$ км
Щель, темная	$89 \cdot 10^3$ км
Креповое кольцо С, слабое	$73 \cdot 10^3$ км
Радиус планеты (экваториальный)	$60 \cdot 10^3$ км
Толщина колец [7]	≈ 10 км
Масса колец [8]	$\approx 5 \cdot 10^{-5}$ массы Сатурна или, возможно, намного меньше [7]

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Q. **1**, § 85; **2**, § 68.
2. Handbook В. А. А. (ежегодно).
3. Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 158.
4. *Moore P., Delano K.*, J. В. А. А., **79**, 121, 124 (1969).
5. *Sagan C.*, Space Sci. Rev., **11**, 827 (1971).
6. *Harris D. L.*, Planet and Satellites, ed. Kuiper and Middlehurst, Chicago, 1961, p. 272. (Русский перевод: Планеты и спутники, под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхерст, ИЛ, М., 1963.)
7. *Бобров М. С.*, А. Ж., **33**, 161, 904 (1956).
8. *Kozai Y.*, Publ. A. S. Japan, **9**, 1 (1957).
9. *Roy A. E., Ovenden M. W.*, M. N., **114**, 232 (1954); **115**, 296 (1955).
10. *Taylor G. E., O'Leary B.*, Nature, **234**, 405 (1971).
- 11*. *Бобров М. С.*, Кольцо Сатурна, «Наука», М., 1970.

Спутники планет [1–6]

Планета	Спутник	Расстояние от планеты			Сидерический период, сутки	Синодический период	Орбита		Радиус, км	Отношение массы планеты к массе спутника	Масса, 10^{24} г	$V_{\text{ор}}$
		среднее		Ор			наклоне-ние	эксцен-триситет				
		10^3 км	10^{-3} а. е.									
Земля	Луна	384	2,5695		27,321 661	29 ^d 12 ^h 44 ^m	23°	0,055	1 738	81,3	73,5	-12,7
Марс	1 Фобос	9	0,0626	25''	0,318 910	7 39	1	0,021	7			+11,5
	2 Деймос	23	0,1570	1' 02	1,262 441	1 06 21	2	0,003	4			+12,6
Юпитер	1 Ио [10]	422	2,8194	2 18	1,769 138	1 18 29	0	0,000	1 810	26 000	73	+4,9
	2 Европа	671	4,4859	3 40	3,551 181	3 13 18	1	0,000	1 480	40 000	48	+5,3
	3 Ганимед	1 070	7,1554	5 51	7,154 553	4 04 00	0	0,001	2 600	12 300	154	+4,6
	4 Каллисто	1 883	12,585	10 18	16,689 018	16 18 05	0	0,007	2 360	20 000	95	+5,6
	5	181	1,209	59	0,418 178	11 57	0	0,003	80			+13
	6	11 476	76,71	62 44	250,566	265 23	28	0,158	50			+14,2
	7	11 737	78,46	64 10	259,65	276 05	26	0,207	12			+17
	8	23 500	157,2	129	739	634	147	0,40	10			+18
	9	23 600	158	130	758	645	156	0,275	9			+18,6
	10	11 700	78,3	64 10	259,22	275 17	29	0,12	8			+18,8
	11	22 600	151	123	692	597	163	0,207	9			+18,6
	12	21 200	142	116	630	551	147	0,169	8			+18,7
Сатурн	1 Мимас	186	1,2405	30	0,942 422	22 37	2	0,020	270	15 000 000	0,04	+12,2
	2 Энцелад	238	1,5915	38	1,370 218	1 08 53	0	0,004	300	7 500 000	0,08	+11,8
	3 Тефия	295	1,9702	48	1,887 802	1 21 19	1	0,000	500	890 000	0,64	+10,5
	4 Диона	377	2,5234	1 01	2, 736 916	2 17 42	0	0,002	480	520 000	1,1	+10,6
	5 Рея	527	3,524	1 25	4, 417 503	4 12 28	0	0,001	650	250 000	2,3	+9,9
	6 Титан	1 222	8,1661	3 17	15,945 449	15 23 15	0	0,029	2 440	4 150	137	+8,3
	7 Гиперион	1 483	9,911	3 59	21,276 657	21 7 39	1	0,104	220	5 000 000	0,1	+14
	8 Япет	3 560	23,798	9 35	79,330 84	79 22 05	15	0,028	550	500 000	1,1	+10,7
	9 Феба	12 950	86,58	34 51	550,33	523 13	150	0,163	120			+15
	10 Янус	159	1,06	26	0,7490	17 59	0	0,0	150			+14
Уран	1 Ариэль	192	1,2820	14	2,520 38	2 12 30	0	0,003	350	68 000	1,3	+14,3
	2 Умбриэль	267	1,7860	20	4,144 18	4 03 28	0	0,004	250	170 000	0,5	+15,1
	3 Титания	438	2,9303	33	8,705 88	8 17 00	0	0,002	500	20 000	4,3	+13,9
	4 Оберон	586	3,9187	44	13,463 26	13 11 16	0	0,001	450	34 000	2,6	+14,1
	5 Миранда	130	0,872	10	1,414	1 09 56	0	0,00	120	1 000 000	0,1	+16,8
Нептун	1 Тритон	355	2,3747	17	5,876 54	5 21 3	160	0,00	1 900	750	140	+13,6
	2 Нереида	5 562	37,1797	4 24	359,88	362 01	28	0,75	120	?		+19,1

§ 68. Луна

Среднее расстояние от Земли [1, 3, 6]	$= 384\,401 \pm 1$ км	
Крайние пределы расстояний	$= 356\,400 \leftrightarrow 406\,700$ км	
Средний экваториальный горизонтальный параллакс	$\pi_{\odot} = 3422,60''$	
синусоидальный параллакс	$= 3422,44''$	
Эксцентриситет орбиты	$= 0,0549$	
Наклонение орбиты к эклиптике	$= 5^{\circ} 8' 43''$,	
наблюдаются колебания $\pm 9'$ с периодом 173 сут.		
Сидерический период (относительно неподвижных звезд)	$= 27,321\,661\,40 + 0,0^6 16T$ эфемеридных суток,	
где T – эпоха в столетиях от 1900,0		
Синодический месяц (от новолуния до новолуния)	$= 29,530\,5882 + 0,0^6 16T$ эфемеридных суток	
Тропический месяц (от равноденствия до равноденствия)	$= 27,321\,582\,14 + 0,0^6 13T$ эфемеридных суток	
Аномалистический месяц (промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Луны через перигей)	$= 27,554\,5505 - 0,0^6 4T$ сут	
Драконический месяц (между двумя последовательными прохождениями через узел орбиты)	$= 27,212\,220$ сут	
Период движения узла лунной орбиты (период нутации, обратное движение)	$= 18,61$ тропических лет	
Период вращения лунного перигея (прямое движение) [12]	$= 8,85$ лет	
Среднее сидерическое суточное движение Луны	$= 47\,434,889\,871'' - 0,000\,284''T$	
	$= 13,176\,358^{\circ}$	
Средний интервал между прохождениями через меридиан	$= 24^{\text{h}} 50,47^{\text{m}}$	
Основные периодические члены в движении Луны [12]:		
Главный эллиптический член в долготе	$= 22\,639'' \sin g$	
Главный эллиптический член в широте	$= 18\,461'' \sin u$	
Эвекция	$= 4\,586'' \sin (2D - g)$	
Вариация	$= 2\,370'' \sin 2D$	
Годичное неравенство	$= -669'' \sin g'$	
Параллактическое неравенство	$= -125'' \sin D$,	
где g – средняя лунная аномалия		
g' – средняя солнечная аномалия		
D – возраст Луны		
u – расстояние средней Луны от восходящего узла орбиты		
Физическая либрация [13]	по долготе	по широте
Смещение (селеноцентрическое)	$\pm 0,02^{\circ}$	$\pm 0,04^{\circ}$
Период	1 год	6 лет
Оптическая либрация [13]		
Смещение (селеноцентрическое)	$\pm 7,6^{\circ}$	$\pm 6,7^{\circ}$
Период	приблизительно сидерический месяц	
Доля поверхности, доступная для наблюдения с Земли	$= 59\%$	

Наклонение лунного экватора [2, 3]

$$\begin{aligned} \text{к эклиптике} &= 1^\circ 32,5' \\ \text{к орбите} &= 6^\circ 41' \end{aligned}$$

Радиусы Луны: a – направленный к Земле, b – вдоль орбиты, c – в направлении полюсов

Средний радиус Луны [1, 3]

$$\begin{aligned} (b + c)/2 &= 1738,2 \text{ км} \\ &= 0,272 52 \text{ экваториального радиуса Земли} \\ a - c &= 1,09 \text{ км} \\ a - b &= 0,31 \text{ км} \\ b - c &= 0,78 \text{ км} \end{aligned}$$

$$\text{Масса Луны } \mathcal{M}_\zeta = \mathcal{M}_\oplus / 81,301 = 7,350 \cdot 10^{25} \text{ г}$$

Угловой радиус Луны на среднем расстоянии

$$\begin{aligned} \text{(геоцентрический)} &= 15' 32,6'' \\ \text{(топоцентрический, в зените)} &= 15' 48,3'' \end{aligned}$$

$$\text{Объем Луны} = 2,200 \cdot 10^{25} \text{ см}^3$$

$$\text{Средняя плотность Луны} = 3,341 \text{ г/см}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Ускорение силы тяжести на поверхности} \\ &= 162,2 \text{ см/с}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Скорость освобождения на поверхности} \\ &= 2,38 \text{ км/с} \end{aligned}$$

Момент инерции (относительно оси вращения) [2]

$$C = 0,396 \mathcal{M}_\zeta b^2$$

Разности моментов инерции [2–5], $\alpha + \gamma = \beta$

$$\begin{aligned} \alpha &= (C - B)/A = 0,000 400 \\ \beta &= (C - A)/B = 0,000 628 \\ \gamma &= (B - A)/C = 0,000 228, \end{aligned}$$

где A – момент инерции относительно оси, направленной к Земле, B – вдоль орбиты, C – в направлении полюсов.

Член гравитационного потенциала [2]

$$J_2 = 2,05 \cdot 10^{-4}$$

Масконы [8]

$$\begin{aligned} \text{Число сильных масконов на видимой поверхности Луны, превышающих 80 мгал} \\ &= 4 \end{aligned}$$

Поток тепла через поверхность Луны

$$= 2 \cdot 10^{-7} \text{ кал/(см}^2 \cdot \text{с)}$$

Плотность атмосферы Луны $< 10^{-12}$ плотности земной атмосферы на уровне моря

$$\begin{aligned} \text{Число морей и кратеров на лунной поверхности с диаметром, большим } d \text{ [1, 7, 9, 10]} \\ &= 5 \cdot 10^{10} d^{-2,0} \text{ на } 10^6 \text{ км}^2 [d \text{ в м}] \end{aligned}$$

Это правило распространяется и на самые большие моря ($d \approx 1000$ км), и на самые маленькие ямки ($d \approx 1$ см).

Данные о лунной фотометрии и о поверхности Луны можно найти в § 67 и 69.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 86; **2**, § 69.
2. Cook A. H., M. N., **150**, 187 (197Q).
3. Baker R. M., Makemson M. W., *Astrodynamics*, 2nd ed., Academic Press, 1967, p. 196.
4. Goundas C. L., A. J., **72**, 955 (1967).
5. Koziel K., Proc. Roy. Soc, **296**, 248 (1967).
6. Yapple B. S. et al., NRL Rep., 6134, 1964.
7. Jaffe L. D., Space Sci. Rev., **9**, 508 (1969).
8. Mutch T. A., *Geology of the Moon*, Princeton U. P., 1970, pp. 80, 217, 265.
9. Cross C. A., M. N., **134**, 245 (1966).
10. Marcus A., M. N., **134**, 269 (1966).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 87; **2**, § 70.
2. Barber D., *Gent*, Planet Space Sci., **15**, 907 (1967).
3. Johnson F. S., Space Sci. Rev., **9**, 303 (1969).
4. Mayer C. H., Planets and Satellites, ed. Kuiper and Middlehurst, 3, Chicago, 1961, p. 442. (Русский перевод: Планеты и спутники, под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхерст, ИЛ, М., 1963.)
5. Trafton L. M., Ap. J., **147**, 765 (1967).
6. Минин И. Н., А. Ж., **44**, 1284 (1967).
7. Goody R., Ann. Rev. Astron. Ap., **7**, 303 (1969).
8. Hobbs R. W., Knapp S. L., Icarus, **14**, 204 (1971).
9. Kellermann K. I., Icarus, **5**, 478 (1966); Radio Science, **5**, 487 (1970).
10. Epstein E. E., Ap. J., **143**, 597 (1966).
11. Morrison D., Klein M. J., Ap. J., **160**, 325 (1970).
12. Lewis J. S., Icarus, **8**, 434 (1968).
13. Belton M. J. S., Broadfoot, Hunter, J. Geoph. Res., **73**, 4795 (1968); Ap. J., **145**, 454 (1966).
14. Belton M. J. S., McElroy, Price, Ap. J., **164**, 191 (1971).
15. Saari J. M., Icarus, **3**, 161 (1964).
16. Young L. D. G., J. Q. S. R. T., **11**, 385 (1971).
17. Young A. T., Gray L. D., Icarus, **9**, 74 (1968).

§ 70. Астероиды, или малые планеты

Число малых планет с определенными орбитами (пронумерованные планеты) [4, 6]

$$= 1779 \text{ (в 1972 г.)}$$

Медианные элементы орбит [1, 3, 6, 8]

Большая полуось $\bar{a} = 2,7 \text{ а. е.}$

99,8% находятся между $a = 1,524 \text{ а. е. (Марс)}$ и $a = 5,203 \text{ а. е. (Юпитер)}$.

Период $\bar{p} = 4,5 \text{ года}$

94% имеют периоды между $\bar{p} = 3,3 \text{ года}$ и $6,0 \text{ лет}$ с заметными пробелами около 4,0, 4,8 и 5,9 года, т. е. $1/3 > 2/5 > 1/2$ периода Юпитера.

Эксцентриситет $\bar{e} = 0,14$

Наклонение к эклиптике $\bar{i} = 9,5^\circ$

Медианный показатель цвета [1,2]

$$\overline{B - V} = 0,86$$

Некоторые фотометрические данные сравниваются с данными для планет и спутников в § 66.

Звездные величины астероидов часто выражают в виде $B \approx m_{pg} + 0,10$ [2]. $B(1,0)$ соответствует единичному расстоянию от Солнца и от Земли ($r = \Delta = 1$) и направлению на противостояние.

Связь между радиусом, абсолютной звездной величиной $B(1,0)$ и фактором альбедо p (§ 66)

$$\lg p = 5,94 - 21 \lg \mathcal{R} - 0,45(1,0) \quad [\mathcal{R} \text{ в км}]$$

Общая масса астероидов [1,8] $= 2,3 \cdot 10^{24} \text{ г}$

Плотность (вероятная) $= 3,5 \text{ г/см}^3$

О семействах астероидов и их орбитальных средних см. в [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 88; **2**, § 71.
2. Gehrels T., Surfaces and Interiors of Planets and Satellites, ed. Dolfus, Academic Press, 1970, p. 317. (Русский перевод: Планеты и спутники, под ред. А. Дольфюса, изд-во «Мир», М, 1974, стр. 367.)
3. Watson F. G., Between the Planets, Harvard U. P., 1956. (Русский перевод 1-го изд.: Ватсон Ф., Между планетами, Гос-техиздат, М, 1947.)
4. Эфемериды малых планет, Изд-во АН СССР, М. – Л., ежегодно.
5. Kiang T., M. N., **123**, 509 (1962).
6. van Houlen C. J. et al., Astron. Ap. Supp., **2**, 339 (1970).
7. Veverka J., Icarus, **15**, 11 (1971).
8. Kiang T., неопубликованные данные.

*Связь между звездной величиной, числом, радиусом и
массой астероидов [1, 4–6, 8]*

Интервал $B(1, 0)$													
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
% от числа планет с номерами 1→1700													
0,1	0,1	0,4	1,5	5,3	13	20	23	19	12	4,7	0,7	0,3	0,1
lg (действительное число)											lg (оценка числа)		
0,3	0,0	0,8	1,4	1,9	2,2	2,5	2,9	3,3	3,6	4,0	4,5	4,8	5,1
Радиус R , км													
265	220	140	70	44	28	18	11	7	4,4	2,8	1,8	1,1	0,7
Полная масса, 10^{22} г													
120	25	28	16	13	5,2	3,1	1,9	1,1	0,7	0,4	0,3	0,2	0,1

Некоторые малые планеты

Номер и название [4]	Радиус R , км [1–3, 8]	Масса M , г [1–3, 8]	$B(1,0)$ [2]	Период вращения [8]	Элементы орбит [4]			
					P , сут	a , а. е.	e	i
1 Церера	380	$100 \cdot 10^{22}$	4,11	9 ^h 05 ^m	1681	2,766	0,079	10,6°
2 Паллада	240	$25 \cdot 10^{22}$	5,18	10	1684	2,768	0,235	34,8
3 Юнона	100	$2 \cdot 10^{22}$	6,43	7 13	1594	2,668	0,256	13,0
4 Веста [7]	240	$20 \cdot 10^{22}$	4,31	5 20	1325	2,362	0,088	7,1
6 Геба	110	$20 \cdot 10^{21}$	6,70	7 17	1380	2,426	0,203	14,8
7 Ирис	100	$15 \cdot 10^{21}$	6,84	7 07	1344	2,386	0,230	5,5
10 Гигия	160	$60 \cdot 10^{21}$	6,57	18?	2042	3,151	0,099	3,8
15 Эвномия	140	$40 \cdot 10^{21}$	6,29	6 05	1569	2,643	0,185	11,7
16 Психея	140	$40 \cdot 10^{21}$	6,89	4 18	1826	2,923	0,135	3,1
51 Немауза	40	$9 \cdot 10^{20}$	8,66	7 47	1330	2,366	0,065	9,9
433 Эрос	7	$5 \cdot 10^{18}$	12,40	5 16	642	1,458	0,223	10,8
511 Давида	130	$3 \cdot 10^{22}$	7,13	5 10	2072	3,190	0,177	15,7
1566 Икар	0,7	$5 \cdot 10^{15}$	17,62	2 16	408	1,078	0,827	23,0
1620 Географос	1,5	$5 \cdot 10^{16}$	15,97	5 14	507	1,244	0,335	13,3
Аполлон [3]	0,5	$2 \cdot 10^{15}$	18		662	1,486	0,566	6,4
Адонис	0,15	$5 \cdot 10^{13}$	21		1008	1,969	0,779	1,5
Гермес	0,3	$4 \cdot 10^{14}$	19		535	1,290	0,475	4,7
1976 AA	0,5±		18,4		358	0,987	0,183	19,1
1976 UA	0,3±				283	0,844	0,447	6

Межпланетная материя

§ 71. Кометы

Частота обнаружения комет [1, 2, 9]

Новые, с почти параболическими орбитами	3 в год
Новые, периодические	1,0 в год
Периодические, предсказываемые и возвращающиеся	2,5 в год
Кометы, видимые ежегодно	2

Полное число комет в Солнечной системе [7]
 $\approx 6,4 \text{ dex}$

Короткопериодические кометы

$P < 150$ лет [6,9]. В каждую эпоху бывает около 50 комет, достаточно ярких, чтобы их можно было заметить при прохождении через перигелий.

Медианный период	$\bar{P} = 7$ лет
Медианная большая полуось	$\bar{a} = 3,6$ а. е.
Медианное перигелийное расстояние (зависит от условий видимости)	$\bar{q} = 1,3$ а. е.
Медианный эксцентриситет	$\bar{e} = 0,56$ (наименьший = 0,13)
Медианное наклонение	$\bar{i} = 15^\circ$ (11° для $P < 10$ лет)

Медианная абсолютная звездная величина m_0 наблюдавшихся периодических комет (т. е. m при расстояниях кометы от Солнца и от Земли, равных 1 а. е.) [8]:

первое появление	$m_0 = 9$
последнее появление	$m_0 = 13$

Среднее число появлений = 7

Некоторые хорошо изученные и регулярные периодические кометы исчезли совсем [4].

Избранные короткопериодические кометы [1–3, 8]

В таблице приведены периодические кометы, которые наблюдались несколько раз и возвращение которых ожидается. P – период, ω – угловое расстояние перигелия от восходящего узла, Ω – долгота восходящего узла, i – наклонение орбиты, e – эксцентриситет, q – перигелийное расстояние, a – большая полуось. m_0 – абсолютная звездная величина.

Комета	Прохождение перигелия		P , годы	ω	Ω	i	e	q , а. е.	a , а. е.	m_0 [5]
	последняя дата	число возвращений								
Энке	1967,8	48	3,30	186°	334°	12°	0,85	0,34	2,21	12
Темпеля (2)	1967,6	14	5,26	191	119	12	0,55	1,37	3,0	13
Швассмана – Вахмана (2)	1968,2	7	6,52	358	126	4	0,38	2,15	3,50	10
Виртанена	1967,9	4	6,65	344	86	13	0,54	1,62	3,55	15
Рейнмута (2)	1967,6	4	6,72	46	296	7	0,46	1,94	3,6	14
Финлея	1967,6	8	6,88	322	42	4	0,70	1,08	3,6	14
Борелли	1967,5	8	7,00	351	76	31	0,60	1,45	3,67	12
Уиппла	1963,3	5	7,44	190	189	10	0,35	2,46	3,80	11
Отерма	1966,3	ежегодно	7,89	355	155	4	0,14	3,39	3,96	10
Шомасса	1960,3	6	8,18	52	86	12	0,70	1,20	4,05	12
Вольфа (1)	1967,6	11	8,42	161	204	27	0,40	2,50	4,15	14
Комас-Сола	1961,3	5	8,58	40	63	13	0,58	1,78	4,19	10
Вейсала	1960,4	3	10,5	44	135	11	0,64	1,74	4,79	14
Швассмана – Вахмана (1)	1957,4	ежегодно	16,1	356	322	10	0,13	5,5	6,4	3
Неуймина (1)	1966,9	4	17,9	347	347	15	0,77	1,54	6,8	11
Кроммелина	1956,8	6	27,9	196	250	29	0,92	0,74	9,2	10
Ольберса	1956,4	3	69	65	85	45	0,93	1,20	16,8	5
Понса-Брукса	1954,4	3	71	199	255	74	0,96	0,78	17,2	5
Галлея	1910,3	29	76,1	112	58	162	0,97	0,59	17,8	4

Направление движения по орбите. Почти все периодические кометы имеют прямое движение, т. е. $i < 90^\circ$ (комета Галлея является исключением).

Кометы с почти параболическими орбитами

Период $P > 150$ лет

Медианное перигелийное расстояние (зависит от условий видимости) [9]
 $\bar{q} = 0,9$ а. е.

Медианная абсолютная звездная величина для наблюдавшихся комет с почти параболическими орбитами $\bar{m}_0 = 7$

Ориентация орбит случайна.

Разность величин $1/a$ для удаленной кометы (орбита относительно центра тяжести всей Солнечной системы) и кометы вблизи перигелия (орбита относительно Солнца) [5,7]
 $\Delta (1/a) = 0,000\ 55$ (а. е.)⁻¹

Орбиты вблизи перигелия, отнесенные к Солнцу, иногда оказываются гиперболическими, т. е. $1/a < 0$.

Физические характеристики

Диаметр головы, или комы (нерегулярно меняется с радиальным расстоянием r от Солнца)

r , а. е.	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0
Диаметр, 10^3 км	20	100	200	100	30

Диаметр центральной конденсации ≈ 2000 км

Диаметр ядра ≈ 10 км

Длина хвоста, видимого невооруженным глазом
 $= 10 \cdot 10^6$ км,

иногда наблюдаются хвосты длиннее $150 \cdot 10^6$ км.

Расстояние от Солнца, на котором появляется хвост
 $\approx 1,7$ а. е.

Масса \mathcal{M} кометы, имеющей абсолютную звездную величину m [1,9]
 $\lg(\mathcal{M}, \text{г}) \approx 21 - 0,4m_0$

Зависимость звездной величины от расстояния до Солнца r и Земли Δ
 $m = m_0 + 5 \lg \Delta + 2,5n \lg r$,
 $n = 4,2 \pm 1,5$,

где n разное для разных комет.

Атомы, молекулы и ионы, наблюдаемые в кометах [9]

Голова кометы	Хвост кометы
Na, O	N_2^+ , OH^+
C_2 , C_3 , QN, CH	CO^+ , CO_2^+ , CH^+
NH, OH, NH_2	
HCN, CH_3CN	

Ускорение вещества кометного хвоста в единицах ускорения силы тяжести на Солнце [9]
обычно $50 \leftrightarrow 50$ в направлении от Солнца,
но иногда намного больше.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 89; **2**, § 72.
2. Porter J. G., Catalogue of Cometary Orbits, Mem. B. A. A., **39**, No. 3, 1961.
3. Marsden B. G., Reports on Progress: Comets, Q. J. R. A. S., ежегодно.
4. Meisel D. D., Publ. A. S. P., **81**, 65 (1969).
5. Sekanina Z., Acta Univ. Carolinae, Prague, Pub., **48**, 3 (1966).
6. Antrack D., Biermann, Lüst, Ann. Rev. Astron. Ap., **2**, 327 (1964).
7. Lyttleton R. A., Hammersley J. M., M. N., **127**, 257 (1964).
8. Всехсвятский С. К., А. Ж., **39**, 1094 (1962); А. Ж., **33**, 516 (1956).
9. Porter J. G., Wurm K., Biermann, Lüst, The Moon, Meteorites and Comets, ed. Middlehurst and Kuiper, Chicago, 1963, pp. 550, 573, 618, 639.

§ 72. Метеоры и пылевые частицы

Абсолютная визуальная звездная величина метеора M_v равна наблюдаемой звездной величине, приведенной к зениту и высоте 100 км. Эта звездная величина часто используется как указатель массы и размера частиц, которые слишком малы, чтобы образовать видимые метеоры, или слишком велики для обычного исследования.

Связь между M_v и α – числом электронов в 1 см метеорного хвоста (слабые метеоры) [1, 2]:

$$M_v = 35,5 - 2,5 \lg \alpha_z - \delta M,$$

где $\alpha_z = \alpha$ для вертикального падения, а δM – поправка, зависящая от скорости метеора v следующим образом:

v , км/с	20	40	60
δM	1,9	0,7	0,0

M , a – масса и радиус частиц

N – концентрация частиц в космическом пространстве на расстоянии 1 а. е. от Солнца; употребляются следующие индексы:

b – больше или ярче, чем данное значение

m – в единичном интервале звездных величин

s – для дополнительной составляющей малых частиц вблизи Земли

$n \approx (1/4) vN$ – скорость выпадения частиц на горизонтальную поверхность

$$n = 1,10 \cdot 10^{28} vN,$$

где N в см^{-3} , n в числах частиц, выпадающих на всю поверхность Земли за сутки, v в км/с.

Средняя геоцентрическая скорость наблюдаемых метеоров

$$\bar{v} = 40 \text{ км/с}$$

Однако для преобразования данных, относящихся к малым частицам, используют меньшее значение: $\bar{v} \approx 20$ км/с [7, 9].

Среднее число метеоров, регистрируемых за час одним наблюдателем (средняя ночь без метеорных потоков)

$$HR = 10$$

Эффективная площадь поверхности, обозримой одним наблюдателем [11]

$$= 3000 \text{ км}^2$$

$$= 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ поверхности Земли}$$

Масса метеоритного вещества (с высокой скоростью), выпадающего на Землю за сутки

$$= 10 \cdot 10^6 \text{ г} = 10 \text{ т}$$

Масса микрометеоритного вещества с низкой скоростью (вероятно, околоземная составляющая пылевого облака), выпадающего на Землю за сутки

$$= 400 \cdot 10^6 \text{ г} = 400 \text{ т}$$

Концентрация малых частиц в межпланетном пространстве на некотором расстоянии от Земли (т. е. исключая околоземную составляющую)

$$= 3 \cdot 10^{-23} \text{ г/см}^3$$

Отношение (сила притяжения Солнца)/(сила солнечного лучевого давления) для малой черной сферы

$$= 1,7 \cdot 10^4 a \rho \quad [a \text{ в см, } \rho \text{ в г/см}^3],$$

где a – радиус, ρ – плотность сферы.

Эффект Пойтинга – Робертсона [7]. Время падения частицы на Солнце

$$t = 7,0 \cdot 10^6 a \rho A q \text{ лет} \quad [a \text{ в см, } \rho \text{ в г/см}^3, A \text{ и } q \text{ в а.е.}],$$

A и q – большая полуось и перигелийное расстояние орбиты отдельной частицы.

Показатель цвета метеоров [6]

$$B - V = -1,4$$

Высоты метеоров [11]

	Звездная величина	Спорадические метеоры	Метеоры потоков
Появление	+ 4 ↔ - 4	98 км	114 км
Исчезновение	- 4	62 «	
	0	76 «	90 «
	+ 4	86 «	92 «

Связь между M_v , \mathcal{M} , a , N , n

Приведенные данные получены посредством согласования между собой результатов исследований кратеров, метеоритов, метеоров, зодиакального света, космических проб и сбора частиц на Земле [5, 7, 8, 10]. То, что M_v , $\lg \mathcal{M}$ и $\lg a$ одновременно принимают значение 0, является случайным совпадением.

M_v	-40	-30	-0	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
$\lg \mathcal{M}$ (в г)	+16	+12	+8	+4	+2	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
$\lg a$ (в см)	+5,3	+4,0	+2,7	+1,3	+0,7	0	-0,7	-1,3	-2,0	-2,7	-3,3	-4,0	-4,7
$\lg \alpha$ (в см ⁻¹)							+12	+10	+8	+6	+4	+2	0
$\lg N_b$ (в см ⁻³)	-38,5	-35,6	-32,4	-28,6	-26,7	-24,6	-22,2	-19,8	-17,8	-16,0	-14,3	-13,2	-12,2
$\lg n$ (в см ⁻² · с ⁻¹)	-32,8	-29,9	-26,6	-22,9	-21,0	-18,9	-16,5	-14,1	-12,1	-10,3	-8,6	-7,5	-6,5
$\lg n_{bs}$ (в см ⁻² · с ⁻¹)									-11,3	-8,6	-6,4	-5,0	-4,2
$\lg n_m$ (в см ⁻² · с ⁻¹ · м ⁻¹)	-32,8	-29,9	-26,6	-22,9	-21,0	-18,9	-16,5	-14,1	-12,1	-10,4	-8,8	-7,8	-7,0
$\lg n_{ms}$ (в см ⁻² · с ⁻¹ · м ⁻¹)									-11,3	-8,6	-6,5	-5,2	-4,5
$\lg n_m \cdot \mathcal{M}$ [в г/(см ² · с · м)]	-16,8	-17,9	-18,6	-18,9	-19,0	-18,9	-18,5	-18,1	-18,1	-18,4	-18,8	-19,8	-21,0
$\lg n_{ms} \cdot \mathcal{M}$ [в г/(см ² · с · м)]									-17,3	-16,6	-16,5	-17,2	-18,5

Основные метеорные потоки [4, 12, 13]

Н. R. – среднее число метеоров в час, видимых одним наблюдателем, с радиантом в зените в обычные годы. Элементы орбит: ϱ – долгота восходящего узла, ω – угловое расстояние между восходящим узлом и перигелием, i – наклонение орбиты к эклиптике, e – эксцентриситет, q – расстояние от Солнца в перигелии = $(1 - e) \times$ (большая полуось).

Поток	Дата максимума	Обычный период видимости	Радиант		Кульминация, час UT	Н. R.	v_c , км/с	ϱ	ω	i	e	q , а. е.	Комета, связанная с потоком
			α	δ									
Квадрантиды	3 января	2–4 января	231°	+49°	8,5	30	43	283°	168°	75°	0,71	0,97	
Лириды	23 апреля	20–22 апреля	271	+33	4,1	8	47	31	214	80	0,95	0,92	1861 I
η – Аквариды	4 мая	2–7 мая	336	0	7,6	10	64	44	84	161	0,91	0,49	Галлея ?
δ – Аквариды	30 июля	20 июля–14 августа	339	-10	2,2	15	41	307	152	30	0,98	0,06	
Персеиды	12 августа	29 июля–18 августа	46	+58	5,7	40	60	138	152	115	0,96	0,94	1962 III
Дракониды	10 октября	10 октября	265	+54	16,3		24	196	175	35	0,70	1,00	1933 III Джиакоб. – Циннера
Ориониды	21 октября	17–24 октября	95	+15	4,3	15	66	29	87	162	0,91	0,54	Галлея ?
Тауриды	4 ноября	20 октября–25 ноября	55	+17	0,6	8	30	48	114	4	0,83	0,35	Энке
Леониды	16 ноября	14–19 ноября	153	+22	6,4	6	72	234	175	163	0,92	0,97	1866 I Темпеля
Андромедиды	20 ноября	15 ноября–6 декабря	13	+55	22		20	235	230	20	0,7	0,8	Биелы
Геминиды	13 декабря	8–15 декабря	112	+32	2,0	50	36	260	325	26	0,90	0,14	
Урсиды	22 декабря	19–23 декабря	213	+76	8,2	12	36	270	210	54	0,83	0,93	Тутля
Постоянные дневные потоки [1]													
Ариэтиды	8 июня	29 мая–17 июня	44	+23	9,9	40	39	77		20	0,94	0,09	
ξ -Персеиды	9 июня	1–15 июня	61	+23	11,0	30	29	78		1	0,75	0,34	
ι – Тауриды	30 июня	23 июня–7 июля	86	+19	11,2	20	31	277		6	0,85	0,34	Энке

Состав спорадических метеоров: 50% железных, 50% каменных

Состав метеоров потоков: 100% каменных

Плотность вещества метеоров [3] $\rho = 0,25 \text{ г/см}^3$

У некоторых спорадических метеоров

$$\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$$

О метеоритах см. § 63

Гелиоцентрическая скорость параболического метеора на расстоянии 1а. е.

$$= 42,12 \text{ км/с}$$

Скорость освобождения на поверхности Земли

$$= 11,19 \text{ км/с}$$

Скорость метеора у Земли $v_E^2 = v_G^2 + 125 (\text{км/с})^2$,

где v_E – геоцентрическая скорость вне земного поля тяготения.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 90; 2, § 73.
2. Kaiser T. R., Ann. Geoph., 17, 50, (1961); Space Sci. Rev., 1, 554 (1963).
3. Verniani P., Smithson. Contr. Ap. Obs., 8, 141 (1965); 10, 181 (1967).
4. Sekanina Z., Icarus, 13, 475 (1970).
5. Fechtig H., A. Gesell. Mitt., No. 25, 65 (1968).
6. Davis J., Smithson. Contr. Ap. Obs., 7, 233 (1963).
7. Whipple F. L., Southworth, Nilsson, Smithson. Ap. Obs., S. R. 239, 1967.
8. Nilsson C. S., Southworth R. B., Smithson. Ap. Obs., S. R. 263, 1967; I. A. U. Symp., 33, 280 (1968).
9. Erickson J. E., J. Geoph. Res., 73, 3721 (1968).
10. Дивару Н. Б., А. Ж., 43, 1273 (1966).
11. Watson F. G., Between the Planets, rev. ed., Harvard U. P., 1956, pp. 79, 91. (Русский перевод 1-го изд.: Ватсон Ф., Между планетами, Гостехиздат, М., 1947.)
12. Handbook B. A. A. (ежегодно).
13. Whipple F. L., Hawkins O. L., Handb. d. Phys., 52, 519 (1959).

§ 73. Зодиакальный свет

Поверхностная яркость выражена через S_{10} – число звезд с $m_v = 10$ на квадратный градус [3]. Яркость, соответствующая $S_{10} = 1$ вблизи 5400 \AA ,

$$= 1,26 \cdot 10^{-9} \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{\AA} \cdot \text{с} \cdot \text{ср)}$$

$$= 4,3 \cdot 10^{-16} \bar{B}_{\odot},$$

где \bar{B}_{\odot} – средняя яркость Солнца.

Цвет зодиакального света [2, 5, 13]

$$(B - V)_{ZL} = 0,64$$

Поверхностная яркость и поляризация зодиакального света вдоль эклиптики и на широте $\beta = 30^\circ$

Элонгация ϵ	Поверхностная яркость, S_{10} [1–4] ($m_v = 10$) deg^{-2}		Поляризация, % [1–3] $\beta = 0^\circ$
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 30^\circ$	
1°	5 000 000		
2	1 200 000		
5	150 000		
10	30 000		4
20	6 000	350	10
30	2100	280	16
40	950	230	18
50	540	200	20
60	380	190	21
70	280	170	21
90	190	150	17
110	160	140	13
130	160	130	10
150	160	130	5
170	180	125	± 1
180 (Противосияние)	200	130	$\pm ?$

Дополнительная яркость противостояния сверх яркости моста зодиакального света [1, 3, 4, 6, 7,]

$$S_{10} (\text{противостояния}) = 35$$

Минимум яркости зодиакального света вблизи полюса эклиптики [1, 3, 7, 8]

$$S_{10} (\text{min}) = 105$$

Зависимость концентрации частиц зодиакального света от расстояния до Солнца

$$\rho = \rho_E r^{-1,7},$$

где r – расстояние до Солнца в а. е., ρ_E – концентрация частиц у Земли. Эта зависимость получается из соотношения $S_{10} \propto (\sin \epsilon)^{-2,7}$. Другие разложения, по-видимому, не подходят [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 91; **2**, § 74.
2. Giese R. H., ESRO SP-54, 25, 1970.
3. Blackwell D. E., Dewhirst, Ingham, Adv. Astron. Ap., **5**, 1 (1967).
4. Dumont R., Ann. d'Ap., **28**, 265 (1965).
5. Van de Noord E. L., Ap. J., **161**, 309 (1970).
6. Elsässer H., Siedentopf H., Z. Ap., **43**, 132 (1957).
7. Smith L. L., Roach, Owen, Planet Space Sci., **13**, 207 (1965).
8. Tanabe T., Publ. A. S. Japan, **17**, 339 (1965).
9. Дувари Н. Б., А. Ж., **44**, 1309 (1967).
10. Ingham M. F., M. N., **122**, 157 (1961).
11. Powell R. S. et al., Zodiacal Light and Interplanetary Medium, NASA Symp. SP-150, 1967, p. 225.
12. Southworth R., там же, стр. 179.
13. Peterson A. W., там же, стр. 23.

§ 74. Солнечный ветер

Скорость солнечного ветра около Земли [1–3]

$$v \approx 450 \text{ км/с}$$

Зависимость скорости солнечного ветра от расстояния до центра Солнца [7, 8]

r/\mathcal{R}_\odot	1,0	2	5	10	20	50	100	215
v , км/с	0	10	30	130	200	290	370	450
T , 10^6K		1,8	1,4	1,1	0,8	0,5	0,3	0,2

Время движения частиц от Солнца к Земле

$$= 5,8 \text{ сут}$$

Связь между скоростью солнечного ветра и геомагнитной активностью [5, 6]

A_p	[§ 62]	4	12	27	51
$\sum K_p$	[§ 62]	9	20	30	39
Скорость, км/с		400	500	600	700

Средняя плотность потока частиц около Земли [1, 2]

$$\approx 5 \text{ протон/см}^3$$

Плотность солнечного ветра изменяется обратно пропорционально скорости, достигая максимума 80 протон/см^3 на западном краю потока. Плотность также обратно пропорциональна квадрату расстояния от Солнца.

Средняя температура солнечного ветра (зависит от скорости)

$$\approx 200 \text{ 000 К [1,2]}$$

Промежуток времени между явлениями на центральном меридиане Солнца и последующими явлениями в окрестностях Земли [4]

$$\approx 4,5 \text{ сут}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Neugebauer M., Snyder C. W., J. Geoph. Res., **71**, 4469 (1966).
2. Brandt J. C., Introduction to the Solar Wind, Freeman and Co., 1970, p. 150. (Русский перевод: Брандт Дж., Солнечный ветер, изд-во «Мир», М., 1973.)
3. Kovalevsky J. V., Space Sci. Rev., **12**, 187 (1971).
4. Wilcox J. M., Severny, Colburn, Nature, **224**, 353 (1969).
5. Snyder C. W., Neugebauer, Rao, J. Geoph. Res., **68**, 6361 (1963).
6. Maer K., Dessler A. J., J. Geoph. Res., **69**, 2846 (1964).
7. Unsöld A., Astron. Ap., **4**, 220 (1970).
8. Newkirk G., Ann. Rev. Astron. Ap., **5**, 213 (1967).

ГЛАВА 9

Солнце

§ 75. Размеры Солнца

Радиус Солнца	$R_{\odot} = 6,959\ 9\ (7) \cdot 10^{10}\ \text{см}$
Объем	$V_{\odot} = 1,4122 \cdot 10^{33}\ \text{см}^3$
Площадь поверхности	$= 6,087 \cdot 10^{22}\ \text{см}^2$
Масса Солнца	$M_{\odot} = 1,989\ (2) \cdot 10^{33}\ \text{г}$
Средняя плотность	$\bar{\rho}_{\odot} = 1,409\ \text{г/см}^3$
Ускорение силы тяжести на поверхности	$= 2,739\ 8\ (4) \cdot 10^4\ \text{см/с}^2$
Центробежное ускорение на экваторе	$= -0,587\ \text{см/с}^2$
Светимость	$\mathcal{L}_{\odot} = 3,826\ (8) \cdot 10^{33}\ \text{эрг/с}$
Поток излучения с единицы поверхности	$\mathcal{F}_{\odot} = 6,27 \cdot 10^{10}\ \text{эрг/Дсм}^2 \cdot \text{с}$
Момент инерции [§ 76]	$= 5,7 \cdot 10^{53}\ \text{г} \cdot \text{см}^2$
Угловая скорость вращения (на широте 16°)	$= 2,865 \cdot 10^{-6}\ \text{рад/с}$
Момент количества движения (определяемый вращением поверхности)	$= 1,63 \cdot 10^{48}\ \text{г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$
Энергия вращения (определена по вращению поверхности)	$= 2,4 \cdot 10^{42}\ \text{эрг}$
Работа, необходимая для рассеяния солнечного вещества в бесконечность [§ 76]	$= 6,6 \cdot 10^{48}\ \text{эрг}$
Полная внутренняя лучистая энергия Солнца [1]	$= 2,8 \cdot 10^{47}\ \text{эрг}$
Энергия переноса (атомов и электронов) [1]	$= 2,7 \cdot 10^{48}\ \text{эрг}$
Скорость освобождения на поверхности Солнца	$= 617,7\ \text{км/с}$
Общее магнитное поле вблизи полюсов Солнца при минимуме пятен	$\approx 1\ \text{или}\ 2\ \text{Гс}$
Магнитный поток в полярных областях при минимуме пятен	$\approx 8 \cdot 10^{21}\ \text{Мкс}$

Солнце, видимое с Земли

Средний экваториальный горизонтальный параллакс [§ 10]	$= 8,794\ 18''$ $= 4,263\ 54 \cdot 10^{-5}\ \text{рад}$
Среднее расстояние от Земли (астрономическая единица, § 10)	$\text{а. е.} = A = 1,495\ 979\ (1) \cdot 10^{13}\ \text{см}$ $= 92,9558 \cdot 10^6\ \text{миль}$
Расстояние	
в перигелии	$= 1,4710 \cdot 10^{13}\ \text{см}$
в афелии	$= 1,5210 \cdot 10^{13}\ \text{см}$
Угловой радиус Солнца на среднем расстоянии от Земли	$= 959,63''$ $= 0,004\ 6524\ \text{рад}$
Угловой радиус плюс иррадиация (для наблюдений края диска)	$= 961,2''$

Сплюсненность. Разность угловых радиусов, измеренных вдоль экватора и в направлении на полюс [2] = 0,05"

Телесный угол солнечного диска на среднем расстоянии = 6,8000 · 10⁻⁵ ср

$$A/R_{\odot} = 214,94$$

$$(A/R_{\odot})^2 = 46\,200$$

$$(A/R_{\odot})^{1/2} = 14,661$$

Площадь поверхности сферы с радиусом 1 а. е.

$$4\pi A^2 = 2,8123 \cdot 10^{27} \text{ см}^2$$

На солнечной полусфере

$$1^{\circ} = 12\,147 \text{ км}$$

На среднем расстоянии 1 а. е.

$$1' \text{ дуги} = 4,352 \cdot 10^4 \text{ км}$$

$$1'' \text{ дуги} = 725,3 \text{ км}$$

Солнце как звезда

Звездная величина [1, 4, 7–9]

	Видимая	Модуль	Абсолютная
В системе <i>V</i>	$m_v = V = -26,74$	31,57	$M_V = +4,83$
В системе <i>B</i>	$B = -26,09$		$M_B = +5,48$
В системе <i>U</i>	$U = -25,96$		$M_U = +5,61$
Болометрическая	$m_{\text{bol}} = -26,82$		$M_{\text{bol}} = +4,75$
Показатели цвета [1,3–7,9]	$B - V = +0,65$		
	$U - B = +0,13$		
	$U - V = +0,78$		
	$V - R = +0,52$		
	$V - I = +0,81$		
	$V - K = +1,42$		
	$V - M = +1,53$		
Болометрическая поправка	$BC = -0,08$		
Спектральный тип <i>G2V</i>			
Эффективная температура	= 5770 К		
Скорость относительно ближайших звезд	= 19,7 км/с		
Апекс Солнца	$A = 271^{\circ}$	$D = 30^{\circ}$ (1900)	
	$L^{\text{II}} = 57^{\circ}$	$B^{\text{II}} = 22^{\circ}$	
Возраст Солнца	= 5 · 10 ⁹ лет,		
т. е. немного больше, чем возраст Земли.			

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 63; **2**, § 75.
2. Dicke R. H., Ann. Rev. Astron. Ap., **8**, 297 (1970).
3. van den Bergh S., J. R. A. S. Canada, **59**, 253 (1965).
4. Gallouët L., Ann. d'Ap., **27**, 423 (1964).
5. Fernie J. D. et al., Publ. A. S. P., **83**, 79 (1971).
6. Alexander J. B., Stansfield R., Royal Obs. Bull., Greenwich, No. 119, 1966.
7. Карягина З. В., Харитонов А. В., А. Ж., **40**, 1123 (1963).
8. Labs D., Neckel H., Z. Ap., **69**, 1 (1968).
9. Johnson H. C., Lunar Plan. Lab., Arizona, **3**, 73 (1965).
10. Wesselink A. J., M. N., **144**, 297 (1969).
11. Bashkin S., Stellar Structure, ed. Aller and McLaughlin, Chicago, 1965, p. 1. (Русский перевод: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Аллера и Д. Б. Мак-Лафлина; изд-во «Мир», М., 1970.)

§ 76. Внутреннее строение Солнца

Данные, приведенные в таблице, усреднены и сглажены на основе большого числа моделей [1–4], которые включают широкий диапазон допущений. Надежность величин в таблице получена путем согласования этих моделей.

Центральные значения:

Температура	$T_c = 15 \cdot 10^6 \text{ К}$
Плотность	$\rho_c = 160 \text{ г/см}^3$
Давление	$P_c = 3,4 \cdot 10^{17} \text{ дин/см}^2$
Центральный химический состав	$X_c = 0,38$

Модель Солнца

T – температура, ρ – плотность, P – давление, M_r – масса внутри сферы радиуса r , \mathcal{L}_r – энергия, излучаемая сферой радиуса r , R_\odot , M_\odot , L_\odot – радиус, масса и светимость всего Солнца соответственно

r/R_\odot	$r, 10^3 \text{ км}$	$T, 10^8 \text{ К}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	M_r/M_\odot	\mathcal{L}_r/L_\odot	$\lg P$ (в дин/см ²)
0,00	0	15,5	160	0,000	0,00	17,53
0,04	28	15,0	141	0,008	0,08	17,46
0,1	70	13,0	89	0,07	0,42	17,20
0,2	139	9,5	41	0,35	0,94	16,72
0,3	209	6,7	13,3	0,64	0,998	16,08
0,4	278	4,8	3,6	0,85	1,00	15,37
0,5	348	3,4	1,00	0,94	1,000	14,67
0,6	418	2,2	0,35	0,982	1,000	14,01
0,7	487	1,2	0,08	0,994	1,000	13,08
0,8	557	0,7	0,018	0,999	1,000	12,18
0,9	627	0,31	0,0020	1,000	1,000	10,94
0,95	661	0,16	0,0 ³ 4	1,000	1,000	9,82
0,99	689	0,052	0,0 ⁴ 5	1,000	1,000	8,32
0,995	692,5	0,031	0,0 ⁴ 2	1,000	1,000	7,68
0,999	695,3	0,014	0,0 ⁶ 1	1,000	1,000	6,15
1,000	696,0	0,006	0,0	1,000	1,000	–

Химический состав внешних слоев (первоначальный состав)

Доля по массе	$X(\text{H})$	= 0,71
	$Y(\text{He})$	= 0,265
	Z (другие элементы)	= 0,025

Глубина конвективного слоя $\approx 100 \leftrightarrow 100000 \text{ км}$ от поверхности

Физические условия в этом слое недостаточно хорошо изучены.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 64; 2, § 76.
2. Sears R. L., Ap. J., **140**, 477 (1964).
3. Torres-Peimbert S., Simpson, Ulrich, Ap. J., **155**, 957 (1969),
4. Böhm K.-H., I. A. U. Symp, **28**, 366 (1967).
5. Stromgren B., Stellar Structure, ed. Aller and McLaughlin, Chicago, 1965, p. 269. (Русский перевод: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Аллера и Д. Б. Мак-Лафлина, изд-во «Мир», М., 1970.)

§ 77. Модель фотосферы

В настоящее время высоты в солнечной атмосфере измеряются от уровня с единичной оптической глубиной (в отличие от предыдущих изданий, где за нулевой уровень принималось основание хромосферы [1]). Модель описывает большую часть хромосферы и фотосферу. Вся эта область иногда называется *обращающим слоем*, т. е. слоем, в котором возникают (обращенные) линии поглощения. В таблице представлена модель, составленная в основном согласно работе [3].

τ_5 – оптическая глубина для $\lambda = 5000 \text{ Å}$

T – температура

P_g – газовое давление

P_e – электронное давление

ρ – плотность

N – число частиц (атомы + ионы + электроны) в единице объема

N_e – число электронов в единице объема

h – высота над уровнем, для которого $\tau_5 = 1,0$

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

$\int N dh$ – полное число частиц (атомы + ионы + электроны) над фиксированным уровнем

Шкала высот на уровнях выше 100 км $N = 110$ км

За основание хромосферы принят уровень, для которого $\tau_5 = 0,005$. Он расположен на 320 км выше уровня, где $\tau_5 = 1$. Все измерения солнечного радиуса, высот в короне, края Солнца и т. д. делаются относительно основания хромосферы.

Модель обращающего слоя [1–7]

τ_5	T, K	$\lg P_g$	$\lg P_e$	$\lg N$	$\lg N_e$	$\lg \int Ndh$ (в cm^{-2})	h, km	$\lg \rho$ (в g/cm^3)	$\lg \chi_5$ (в cm^2/g)
		(в $дин/cm^2$)		(в cm^{-3})					
0,0 ⁷ 1	9000	-0,9	-1,4	11,01	10,51	18,03	2000	-12,54	-0,7
0,0 ⁶ 1	8400	-0,8	-1,4	11,11	10,51	18,13	1900	-12,46	-0,8
0,0 ⁵ 1	7150	-0,4	-1,2	11,61	10,81	18,63	1580	-11,99	-1,2
0,0 ⁵ 2	6500	+0,2	-1,2	12,25	10,85	19,27	1350	-11,35	-1,7
0,0 ⁵ 5	5750	+1,3	-1,15	13,40	10,95	20,42	1004	-10,24	-2,4
0,0 ⁴ 1	5280	+1,9	-1,25	14,04	10,89	21,06	840	-9,60	-2,65
0,0 ⁴ 2	4870	+2,28	-1,36	14,45	10,81	21,47	690	-9,19	-2,65
0,0 ⁴ 5	4400	+2,71	-1,36	14,93	10,86	21,95	610	-8,71	-2,50
0,0 ³ 1	4180	+2,96	-1,20	15,20	11,04	22,22	560	-8,44	-2,33
0,0 ³ 2	4190	+3,15	-1,02	15,39	11,22	22,41	520	-8,25	-2,18
0,0 ³ 5	4300	+3,38	-0,79	15,61	11,44	22,63	460	-8,03	-2,00
0,001	4370	+3,54	-0,63	15,76	11,59	22,78	420	-7,88	-1,87
0,002	4460	+3,71	-0,47	15,92	11,74	22,94	375	-7,72	-1,73
0,005*	4560	+3,93	-0,24	16,13	11,96	23,15	320	-7,51	-1,55
0,01	4640	+4,10	-0,07	16,29	12,12	23,31	278	-7,35	-1,42
0,02	4760	+4,27	+0,10	16,45	12,28	23,47	235	-7,19	-1,29
0,05	4950	+4,49	+0,35	16,66	12,52	23,68	178	-6,98	-1,11
0,1	5140	+4,67	+0,56	16,82	12,71	23,84	136	-6,82	-0,98
0,2	5410	+4,83	+0,81	16,96	12,94	23,97	91	-6,68	-0,80
0,5	5920	+5,01	+1,28	17,10	13,37	24,12	36	-6,54	-0,46
1,0	6430	+5,13	+1,76	17,18	13,81	24,22	0	-6,46	-0,14
2	7120	+5,18	+2,32	17,19	14,33	24,31	-27	-6,45	+0,31
5	8100	+5,26	+2,99	17,21	14,94	24,39	-56	-6,43	+0,87
10	8650	+5,30	+3,38	17,22	15,30	24,46	-72	-6,42	+1,15
20	9200	+5,32	+3,64	17,22	15,54	24,51	-88	-6,42	+1,39

* – основание хромосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 65; 2, § 77.
2. Gingerich O., de Jager C., Sol. Phys., 3, 5 (1968).
3. Gingerich O., Noyes, Kalkofen, Cuny, Sol. Phys., 18, 347 (1971).
4. Holweger H., Z. Ap., 65, 365 (1967).
5. Heintze J. W. R. et al., B. A. N., 17, 442 (1964).
6. Lambert D. H., M. N., 138, 143 (1968).
7. Böhm K.-H., Ap. J., 137, 881 (1963).

§ 78. Интенсивности фраунгоферовых линий

r – интенсивность внутри спектральной линии в долях интенсивности континуума

r_c – значение r в центре линии, исправленное за инструментальные искажения

W – эквивалентная ширина линии. В единицах длины волны $W_\lambda = \int (1 - r) d\lambda$

W_λ/λ – эквивалентная ширина в безразмерных единицах. $10^{-6} = 1$ фраунгофер. Тогда $F =$

$= 10^6 W_\lambda/\lambda$ – эквивалентная ширина в фраунгоферах

f – сила осциллятора для поглощения

$-J = \lg(N_1 f / N_H)$ – величина, используемая при построении кривой роста. Здесь N_H – число атомов водорода в $1 cm^3$, N_1 – число атомов или ионов, в $1 cm^3$ на нижнем уровне. Заметим, что J представляет Nf и т. д. в отрицательных логарифмах (подобно звездным величинам).

Кривая роста для фраунгоферовых линий (центр диска) [3]

J $\lg(W_\lambda/\lambda)$	15	14	13	12	11	10	9	8	7
	-7,28	-6,28	-5,38	-4,81	-4,50	-4,14	-3,66	-3,17	-2,67
Это соотношение почти не зависит от λ в области 3000–10 000 Å									

Интенсивность внутри слабой фраунгоферовой линии

$$1 - r = \int_0^{-\infty} g(\tau_5)(\kappa/\kappa_5) d\tau_5,$$

эквивалентная ширина слабой фраунгоферовой линии

$$\begin{aligned} \frac{W_\lambda}{\lambda} &= 4,0 \cdot 10^3 \lambda f \int \left(\frac{g(\tau_\lambda)}{\kappa_\lambda} \right) \left(\frac{N}{N_H} \right) d\tau_\lambda \\ &= 4,0 \cdot 10^3 \lambda f \int \left(\frac{g(\tau_\lambda)}{\kappa_5} \right) \left(\frac{N}{N_H} \right) d\tau_5, \end{aligned}$$

где τ , τ_5 – оптическая глубина в континууме

Индекс 5 означает стандартную длину волны, $\lambda = 5000 \text{ Å}$

κ , κ_5 – коэффициент поглощения на единицу массы в континууме

g – весовая функция, выраженная через τ_λ или τ_5

Весовая функция g_λ для центра солнечного диска [3, 4]

τ_λ	$\lambda, \text{ Å}$			
	3 400	5 000	10 000	100 000
0,0	0,92	0,80	0,57	0,27
0,2	0,67	0,54	0,32	0,23
0,5	0,46	0,33	0,18	0,18
1,0	0,21	0,16	0,08	0,12
2,0	0,06	0,06	0,02	0,04

Зависимость коэффициента поглощения от λ [4, 5]

В таблице даются значения τ_λ для $\tau_5 = 0,01; 0,1$ и $1,0$

$\lambda, \text{ Å}$	1000	1200	1 500	1 600	1 700	2 000	2 100	2 600	3 000
$\tau_5 = 0,01$	760	70	105	8	0,25	0,18	0,02	0,009	0,008
0,1	–	260	360	30	1,1	0,75	0,12	0,064	0,068
1,0	–	600	650	60	3,5	2,1	0,69	0,60	0,71
$\lambda, \text{ Å}$ и мкм	4 000	5 000	6 000	8 000	10 000	16 000	25 000	100 000	100 мкм
$\tau_5 = 0,01$	0,009	0,010	0,011	0,013	0,012	0,002	0,004	0,06	6,3
0,1	0,084	0,100	0,115	0,131	0,124	0,025	0,053	0,84	83
1,0	0,82	1,000	1,16	1,33	1,27	0,44	0,92	14	–

Отношения эквивалентных ширин W для края, центра и всего диска Солнца [1, 6, 7]

Индексы: L – край диска ($\cos \theta \approx 0,3$), D – весь диск, C – центр

$10^6 W_C / \lambda$	0	1	10	100	1000
W_L / W_C	1,55	1,49	1,20	0,90	0,77
W_D / W_C	1,31	1,28	1,11	0,94	0,83

Отношения общей потери света в фраунгоферовых линиях [1, 12]

$$\begin{aligned} \sum W_L / \sum W_C &= 1,11 \\ \sum W_D / \sum W_C &= 1,06 \\ \sum W(\theta) / \sum W_C &= 1 + 1,05 (1 - \cos \theta) \end{aligned}$$

Об интегральной потере света в фраунгоферовых линиях для различных частей спектра см. в § 82.

Наиболее вероятные тепловая скорость и скорости турбулентности (определенные по ширине линий):

Тепловая скорость атомов $= (2kT/m_a)^{1/2}$
 $\xi_{th} = 1,4 \text{ км/с}$ (наиболее тяжелые атомы)

Скорости турбулентности. Индексы: mi – микро, ma – макро [1, 8–11, 13–15]

Микротурбулентность $\xi_{mi} = 1,1$ км/с

Различные оценки изменения скорости микротурбулентности с глубиной не согласуются между собой.

Макротурбулентность

$$\begin{aligned}\xi_{ma} \text{ (вертикальная)} &= 1,6 \text{ км/с} \\ \xi_{ma} \text{ (горизонтальная)} &= 2,8 \text{ км/с}\end{aligned}$$

Различные оценки изменения скорости макротурбулентности с глубиной не согласуются между собой.

Скорость, определяемая из кривой роста,

$$\xi_{cg} = (\xi_{th}^2 + \xi_{mi}^2)^{1/2}$$

Скорость, соответствующая ширине линии,

$$\begin{aligned}&= (\xi_{th}^2 + \xi_{mi}^2 + \xi_{ma}^2)^{1/2} \\ &= 2,4 \text{ км/с в центре диска} \\ &= 3,3 \text{ км/с на краю диска}\end{aligned}$$

Постоянная затухания для фраунгоферовых линий равна γ , где $\gamma/2\pi$ – полная ширина линии на уровне затухания $1/2$ в герцах. Выражения для затухания даны в § 34. γ_{cl} – классическая постоянная затухания излучения.

$$\begin{aligned}\gamma_{cl} &= 0,2223\lambda^{-2}c^{-1} [\lambda \text{ в см}] \\ &= 0,00074 \text{ \AA}\end{aligned}$$

$$d_{cl} \text{ (из § 34)} = \gamma_{cl}/4\pi = 5,9 \cdot 10^{-5} \text{ \AA}$$

Эмпирическая кривая роста $a = d/g$ [§ 34] = 0,04

при $g/\lambda = 7,9 \cdot 10^{-6}$ [3]

дает $\gamma/\gamma_{cl} = 20 \leftrightarrow 30$ для видимой области спектра

Отдельные оценки дают значения γ от 10 до 1000.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 67; **2**, § 78.
2. Moore C. E., Minnaert, *Houtgast*, The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å, U. S. N. B. S. Mon. 61, 1966.
3. Allen C. W., M. N., **148**, 435 (1970).
4. Gingerich O., de Jager C., *Sol. Phys.*, **3**, 5 (1968).
5. Gingerich O., Noyes, Kalkofen, Cuny, *Sol. Phys.*, **18**, 347 (1971).
6. Muller E. A., Mutschlechner J. P., *Ap. J. Supp.*, **9**, 1 (1964).
7. Holweger H., *Z. Ap.*, **65**, 365 (1967).
8. Mallia E. A., *Sol. Phys.*, **5**, 281 (1968).
9. Elste G. H. E., *Ap. J.*, **148**, 857 (1967).
10. Асланов И. А., Давудов Ю. Д., Салманов И. Р., *А. Ж.*, **45**, 62 (1968).
11. Parnell R. T., Beckers J. M., *Sol. Phys.*, **9**, 35 (1969).
12. Labs D., Neckel H., *Z. Ap.*, **69**, 1 (1968).
13. Гуртовенко Э. А., Троян В. И., *Sol. Phys.*, **20**, 264 (1971).
14. Бадалян О. Г., Лившиц М. А., *Sol. Phys.*, **22**, 297 (1972).
15. de Jager C., Neven L., *Sol. Phys.*, **22**, 49 (1972).

§ 79. Сильные фраунгоферовы линии

W – эквивалентная ширина, r_c – центральная или минимальная интенсивность, исправленная за инструментальные искажения, c – интенсивность в крыльях линии, определяемая соотношением $c = \Delta\lambda^2(1-r)/r$ [1, 9], где r – интенсивность (не глубина) относительно континуума на расстоянии $\Delta\lambda$ от центра линии. Для края диска принято считать $\cos \theta = 0,3$, где θ – угловое расстояние от центра диска. Между значениями $\cos \theta = 0,3$ и $0,0$ большинство параметров изменяется очень быстро.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 68; **2**, § 79.
2. McAllister H. C., *Atlas of Solar Ultraviolet 1800–2965 Å*, Upper Air Lab., Boulder, 1960.
3. Кули-заде Д. М., *А. Ж.*, **42**, 1022 (1965).
4. Holweger H., *Z. Ap.*, **65**, 365 (1967).
5. White O. R., Suemoto Z., *Sol. Phys.*, **3**, 523 (1968).
6. Brault J. W. et al., *Sol. Phys.*, **18**, 366 (1971).
7. de Jager C., Neven L., *B. A. N. Supp.*, **1**, 325 (1967).
8. Moore C. E. et al., *The Solar Spectrum 2935 to 8770 Å*, U. S. N. B. S. Mon. 61, 1966.
9. Gussmann E. A., *Z. Ap.*, **59**, 66 (1964).
10. Pasachoff J. M., *Sol. Phys.*, **19**, 323 (1971).

$\lambda, \text{Å}$	Название линии	Атом	Центр диска			Край диска ($\cos \theta = 0,3$)		Ссылки
			$W, \text{Å}$	$r_c, \%$	$c, \text{Å}^2$	$W, \text{Å}$	$r_c, \%$	
2 795,4		Mg II	} 22	10				
2 802,3		Mg II		10				
2 851,6		Mg I	10	10				[2]
2 881,1		Si I	2,6	20				
3 581,209	N	Fe I	2,2	3				
3 734,874	M	Fe I	3,1	1				
3 820,436	L	Fe I	1,8	2				
3 933,682	K	Ca II	19,2	3,9	39	16	8	[4, 10]
3 968,492	H	Ca II	14,4	4,1	26	12	8	[4]
4 045,825		Fe I	1,2	2	0,22	1,4	5	
4 101,748	h, H δ	H I	3,4	19		1,2	31	[3,4]
4 226,740	G	Ca I	1,5	2,4	0,23	1,5	4	[4]
4 340,475	G, H γ	H I	3,5	17		1,2	26	[3]
4 383,557	d	Fe I	1,1	3		1,1	5	
4 861,342	F, H β	H I	4,2	14		1,4	22	13,4]
5 167,327	b ₄	Mg I	0,9	12	0,09	0,7	18	
5 172,698	b ₂	Mg I	1,3	8	0,24	1,2	11	[4]
5 183,619	b ₁	Mg I	1,6	7	0,37	1,5	11	
5 889,973	D ₂	Na I	0,77	4,2	0,095	0,76	6	[4]
5 895,940	D ₁	Na I	0,57	4,8	0,049	0,56	6	
6 562,808	C, H α	H I	4,1	16		1,4	23	[3,4]
8 498,062		Ca II	1,3	30	0,3	1,1	32	[7]
8 542,144		Ca II	3,6	19	2,4	2,9	20	
8 662,170		Ca II	2,7	21	1,2	2,2	22	
10 049,27	P δ	H I	1,6	79				
10 938,10	P γ	H I	2,2	73		1,0	82	
12 818,23	P β	H I	4,2	63				

§ 80. Полное излучение Солнца

Солнечная постоянная – поток всего излучения, падающий вне атмосферы Земли на площадку единичной площади при среднем расстоянии Земли от Солнца [1–4]:

$$f = 1,950(4) \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}) \text{ или ланглей}/\text{мин} \\ = 1,360 \cdot 10^6 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

Общее излучение Солнца $\mathcal{E}_{\odot} = 3,826(8) \cdot 10^{33} \text{ эрг}/\text{с}$

Излучение на единицу массы, $\mathcal{E}_{\odot}/M_{\odot} = 1,924 \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{г})$

Поток излучения от поверхности Солнца

$$\mathcal{F} = 6,284 \cdot 10^{10} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

Средняя интенсивность излучения солнечного диска

$$F = \mathcal{F}/\pi = 2,000 \cdot 10^{10} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$$

Интенсивность излучения в центре диска

$$I_0 = 2,41 \cdot 10^{10} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$$

Эффективная температура Солнца [5]

$$T_e = (\mathcal{F}/\sigma)^{1/4} = 5770 \text{ К}$$

Температура в центре диска $(\pi I(0)/\sigma)^{1/4} = 6050 \text{ К}$

Средняя яркость солнечного диска вне атмосферы Земли

$$= 1,98 \cdot 10^5 \text{ сб}$$

Яркость в центре диска вне земной атмосферы

$$= 2,48 \cdot 10^5 \text{ сб}$$

Сила света Солнца

$$= 2,84 \cdot 10^{27} \text{ кд}$$

Освещенность, создаваемая Солнцем вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца,

$$= 12,7 \text{ ф} = 127 \text{ 000 лк}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 69, 2, § 80.
2. Labs D., Neckel H., Sol. Phys., **19**, 3 (1971).
3. Labs D., Neckel H., Z. Ap., **69**, 1 (1968).

4. *Drummond A. J. et al.*, Nature, **218**, 259 (1968); Science, **161**, 888 (1968).
 5. *Labs D., Neckel H.*, частное сообщение, 1972.
 6*. *Макарова Е. А., Харитонов А. В.*, Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная, «Наука», М., 1972.

§ 81. Потемнение к краю диска Солнца

$I'_\lambda(\theta)$ – интенсивность непрерывного излучения Солнца на угловом расстоянии θ от центра диска,
 θ – угол между радиусом-вектором Солнца и лучом зрения

$I'_\lambda(0)$ – интенсивность непрерывного излучения в центре диска

Отношение $I'_\lambda(\theta)/I'_\lambda(0)$, которое зависит от длины волны λ , характеризует *потемнение к краю диска*. Насколько возможно, интенсивность измеряется в континууме между линиями (измеренная таким образом интенсивность отмечается штрихом '). Результаты измерений можно представить в следующем виде:

$$I'_\lambda(\theta)/I'_\lambda(0) = 1 - u_2 - v_2 + u_2 \cos \theta + v_2 \cos^2 \theta,$$

Или
$$I'_\lambda(\theta)/I'_\lambda(0) = A + B \cos \theta + C [1 - \cos \theta \ln(1 + \sec \theta)],$$

где $A + B + (1 - \ln 2) C = 1$,

или с меньшей степенью точности

$$I'_\lambda(\theta)/I'_\lambda(0) = 1 - u_1 + u_1 \cos \theta.$$

Для определения u_1 удобнее всего положить $\cos \theta = 0,5$,

тогда $u_1 = u_2 + \frac{3}{2} v_2$.

Отношение (средняя интенсивность)/(центральная интенсивность)

$$F'_\lambda/I'_\lambda(0) = 1 - \frac{1}{3} u_2 - \frac{1}{2} v_2$$

или
$$\approx 1 - \frac{1}{3} u_1,$$

или
$$F'_\lambda/I'_\lambda(0) = A + C + \frac{2}{3} B - 2C \left(\frac{2}{3} \ln 2 - \frac{1}{6} \right) \\ = A + 0,667B + 0,409C$$

Отношение (интенсивность края диска)/(центральная интенсивность)

$$I'_\lambda(90^\circ)/I'_\lambda(0) = 1 - u_2 - v_2 \approx 1 - u_1$$

или

$$= A + C$$

Отношение интенсивностей на краю диска для полюса и для экватора равно, по-видимому, 1,00, однако результаты различных измерений не согласуются между собой [1–3, 11].

$I'_\lambda(\theta)/I'_\lambda(0)$ [1, 4–10]

λ , мкм	$\cos \theta$ $\sin \theta$	1,0 0,000	0,8 0,600	0,6 0,800	0,5 0,866	0,4 0,916	0,3 0,954	0,2 0,980	0,1 13,995	0,05 0,9987	0,02 0,9998
0,20	[8]	1,00	0,85	0,74	0,69	0,65	0,61	0,58			
0,22	»	1,00	0,58	0,33	0,26	0,21	0,16	0,12			
0,245	»	1,00	0,71	0,49	0,42	0,36	0,31	0,25			
0,265	»	1,00	0,68	0,42	0,32	0,24	0,19	0,14			
0,28	»	1,00	0,72	0,47	0,38	0,29	0,22	0,16			
0,30	»	1,00	0,77	0,57	0,48	0,39	0,30	0,22	0,14		
0,32	»	1,00	0,809	0,623	0,532	0,438	0,347	0,262	0,17		
0,35	»	1,00	0,837	0,665	0,579	0,487	0,397	0,306	0,21		
0,37	»	1,00	0,851	0,687	0,603	0,513	0,421	0,332	0,23	0,19	
0,38	»	1,00	0,83	0,66	0,58	0,48	0,39	0,30	0,22	0,18	
0,40	»	1,00	0,835	0,663	0,585	0,490	0,403	0,308	0,222	0,18	
0,45	»	1,00	0,860	0,714	0,637	0,556	0,468	0,378	0,278	0,21	0,14
0,50	»	1,00	0,877	0,744	0,675	0,599	0,513	0,425	0,323	0,26	0,19
0,55	»	1,00	0,890	0,769	0,703	0,633	0,556	0,468	0,371	0,31	0,24
0,60	»	1,00	0,900	0,788	0,727	0,664	0,587	0,508	0,412	0,35	0,28
0,80	»	1,00	0,924	0,843	0,793	0,744	0,681	0,615	0,533	0,47	
1,0	[10]	1,00	0,941	0,870	0,828	0,783	0,731	0,675	0,59	0,54	
1,5	»	1,00	0,957	0,902	0,873	0,831	0,789	0,735	0,65	0,58	
2,0	»	1,00	0,966	0,922	0,896	0,865	0,826	0,780	0,70	0,61	
3,0	»	1,00	0,976	0,944	0,922	0,902	0,873	0,835	0,78	0,67	
5,0	»	1,00	0,986	0,963	0,949	0,937	0,916	0,890	0,84	0,76	
10	»	1,00	0,992	0,981	0,973	0,964	0,956	0,937	0,90	0,87	
20	»	1,00	0,994	0,983	0,975	0,970	0,964	0,957	0,95	0,93	
Полное излучение		1,00	0,898	0,787	0,731	0,669	0,602	0,525	0,448	0,39	0,32

Постоянные закона потемнения к краю диска Солнца

λ , МКМ	u_2	v_2	A	B	C	u_1	$\beta = \frac{u_1}{1-u_1}$	$\frac{F'_\lambda}{I'_\lambda(0)}$	$\frac{I'_\lambda(90^\circ)}{I'_\lambda(0)}$
0,20	+0,12	+0,33	-0,2	0,9	+0,9	0,62	1,6	0,79	0,54
0,22	-1,3	+1,6	-3,4	2,9	+5	1,48	-	0,51	0,06
0,245	-0,1	+0,85	-1,9	2,0	+3	1,16	-	0,61	0,20
0,265	-0,1	+0,90	-1,9	2,1	+2,7	1,36	-	0,540	0,08
0,28	+0,38	+0,57	-1,3	1,8	+1,8	1,24	-	0,588	0,10
0,30	+0,74	+0,20	-0,4	1,2	+0,5	1,04	-	0,648	0,06
0,32	+0,88	+0,03	-0,02	0,97	+0,1	0,93	13	0,685	0,08
0,35	+0,98	-0,10	+0,25	0,79	-0,3	0,84	5,3	0,705	0,11
0,37	+1,03	-0,16	+0,42	0,68	-0,4	0,79	3,8	0,71	0,13
0,38	+0,92	-0,05	+0,26	0,78	-0,2	0,84	5,3	0,71	0,13
0,40	+0,91	-0,05	+0,20	0,81	-0,1	0,83	5,0	0,718	0,13
0,45	+0,99	-0,17	+0,54	0,60	-0,44	0,73	2,7	0,755	0,11
0,50	+0,97	-0,22	+0,68	0,49	-0,56	0,65	1,9	0,782	0,16
0,55	+0,93	-0,23	+0,74	0,43	-0,56	0,59	1,44	0,803	0,20
0,60	+0,88	-0,23	+0,78	0,39	-0,57	0,55	1,22	0,817	0,24
0,80	+0,73	-0,22	+0,92	0,25	-0,56	0,41	0,70	0,862	0,39
1,0	+0,64	-0,20	+0,97	0,18	-0,53	0,34	0,52	0,886	0,48
1,5	+0,57	-0,21	+1,11	0,08	-0,61	0,25	0,33	0,916	0,56
2,0	+0,48	-0,18	+1,09	0,07	-0,49	0,21	0,27	0,932	0,60
3,0	+0,35	-0,12	+1,04	0,06	-0,34	0,17	0,20	0,948	0,72
5,0	+0,22	-0,07	+1,02	0,05	-0,18	0,11	0,12	0,964	0,81
10,0	+0,15	-0,07	+1,04	0,00	-0,22	0,05	0,05	0,982	0,87
Общее излучение	+0,84	-0,20	+0,72	+0,42	-0,45	0,54	1,16	0,82	0,32

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 70; **2**, § 81.
2. Maltby P., Ap. Norvegica, **7**, 89 (1960).
3. Plaskett H. H., M. N., **123**, 541 (1962).
4. Pierce A. K., Waddell J. H., Mem. R. A. S., **68**, 89 (1961).
5. Peyturaux R., Contr. Inst. d'Ap. Paris, A. Nos. 168, 176, 1954; C. R., **238**, 1867; **239**, 1460 (1954).
6. Heintz J. R. W., Rech. Astron. Obs. Utrecht, **17/2**, 1965.
7. Mouradian Z., Ann. d'Ap., **28**, 805 (1965).
8. Bonnet R., Ann. d'Ap., **31**, 597 (1968).
9. Gaustad J. E., Rogerson J. R., Ap. J., **134**, 323 (1961).
10. Johnson N. J., диссертация, Michigan, 1971.
11. Alrock R. C., Canfield R. C., Sol. Phys., **23**, 257 (1972).

§ 82. Распределение энергии в спектре Солнца

- F_λ – интенсивность излучения в среднем по солнечному диску в единичном интервале длин волн для спектра со сглаженными неоднородностями. Тогда [§ 80] $F = \int F_\lambda d\lambda$
- $\mathcal{F}_\lambda = \pi F_\lambda$ – поток излучения от солнечной поверхности в единичном интервале длин волн
- $f_\lambda = \mathcal{F}_\lambda (\mathcal{R}_\odot / A)^2 = 6,80 \cdot 10^{-5} F_\lambda$ – поток солнечного излучения в единичном интервале длин волн, проходящий через единицу поверхности на границе земной атмосферы, A – астрономическая единица
- F'_λ – значение F_λ , относящееся к непрерывному спектру между линиями. За непрерывный спектр принимается кривая, соединяющая наиболее интенсивные «окна» между линиями. Она может заметно отличаться от непрерывного спектра при полном отсутствии линий поглощения. F'_λ не имеет никаких резких изменений (например, на границе бальмеровской серии)
- $I_\lambda(0)$ – интенсивность излучения в центре диска Солнца для спектра со сглаженными неоднородностями
- $I'_\lambda(0)$ – интенсивность излучения центра диска Солнца в участках спектра между линиями. Получается интерполяцией участков наибольшей интенсивности, как F'_λ
- $I''_\lambda(0)$ – интенсивность непрерывного излучения центра диска Солнца, вычисленная по модели [2, 3, 10]

Отношение $I_\lambda(0) / I'_\lambda(0)$ представляет наблюдаемое поглощение в линиях (так называемый покровный эффект).

$F_\lambda/I_\lambda(0)$ представляет собой отношение излучения всего диска в среднем к излучению центра. Оно приблизительно равно отношению $F'_\lambda/I'_\lambda(0)$ и $F''_\lambda/I''_\lambda(0)$.

Цветовые температуры в области $B - V$

F_λ и f_λ	5850 K
F'_λ	6700 K
I_λ	6270 K
I'_λ	7050 K

Яркостные температуры

	4400 Å	5500 Å
F_λ и f_λ	5850 K	5850 K
F'_λ	6100 K	5940 K
I_λ	6160 K	6080 K
I'_λ	6460 K	6200 K

Распределение энергии в спектре Солнца, $\lambda = 0,2 \leftrightarrow 5,0$ мкм [1–7, 10, 11]

λ , мкм	F_λ	F'_λ	$I_\lambda(0)$	$I'_\lambda(0)$	$I''_\lambda(0)$	f_λ , эрг/(см ² · Å · с)	$\frac{I_\lambda(0)}{I'_\lambda(0)}$	$\frac{F_\lambda}{I_\lambda(0)}$
0,20	0,02	0,04	0,03	0,04	0,5	1,3	0,7	0,7
0,22	0,07	0,11	0,14	0,20	2,0	4,5	0,7	0,5
0,24	0,09	0,2	0,18	0,30	1,9	6,0	0,6	0,6
0,26	0,19	0,4	0,37	0,5	3,2	13	0,7	0,5
0,28	0,35	0,7	0,59	1,19	3,5	24	0,5	0,56
0,30	0,76	1,36	1,21	2,15	3,7	52	0,56	0,62
0,32	1,10	1,90	1,61	2,83	3,8	75	0,57	0,67
0,34	1,33	2,11	1,91	3,01	3,90	91	0,64	0,69
0,36	1,46	2,30	2,03	3,20	3,92	99	0,63	0,71
0,37	1,57	2,50	2,33	3,62	5,0	107	0,63	0,68
0,38	1,46	2,85	2,14	4,1	4,9	99	0,53	0,69
0,39	1,53	3,10	2,20	4,4	5,0	104	0,50	0,69
0,40	2,05	3,25	2,9	4,58	4,95	140	0,63	0,70
0,41	2,46	3,30	3,43	4,60	4,9	166	0,74	0,72
0,42	2,47	3,35	3,42	4,59	4,85	168	0,75	0,72
0,43	2,46	3,36	3,35	4,55	4,75	166	0,74	0,73
0,44	2,66	3,38	3,58	4,54	4,65	180	0,79	0,74
0,45	2,90	3,40	3,86	4,48	4,55	198	0,86	0,74
0,46	2,93	3,35	3,88	4,40	4,50	200	0,87	0,75
0,48	2,86	3,30	3,73	4,31	4,33	194	0,86	0,76
0,50	2,83	3,19	3,63	4,08	4,15	193	0,88	0,78
0,55	2,72	2,94	3,40	3,68	3,70	185	0,92	0,79
0,60	2,58	2,67	3,16	3,27	3,27	175	0,97	0,8,1
0,65	2,31	2,42	2,78	2,88	2,88	156	0,97	0,83
0,70	2,10	2,13	2,50	2,53	2,53	144	0,988	0,84
0,75	1,88	1,91	2,22	2,24	2,24	127	0,990	0,85
0,8	1,69	1,70	1,96	1,97		115	0,992	0,86
0,9	1,33	1,36	1,53	1,55		91	0,993	0,87
1,0	1,08	1,09	1,21	1,23		73	0,995	0,88
1,1	0,88	0,89	0,99	0,99		60	1,0	0,89
1,2	0,73	0,74	0,81	0,81		49	1,0	0,90
1,4	0,512			0,564		35	1,0	0,91
1,6	0,375			0,403		25,5	1,0	0,92
1,8	0,248			0,268		16,9	1,0	0,92
2,0	0,171			0,183		11,6	1,0	0,93
2,5	0,0756			0,081		5,2	1,0	0,94
3,0	0,0386			0,041		2,6	1,0	0,95
4,0	0,0130			0,0135		0,9	1,0	0,96
5,0	0,0055			0,0057		0,4	1,0	0,96

Средняя интенсивность и яркостная температура в далекой инфракрасной области [2,3]

λ , мкм	$\lg F_\lambda (\approx I_\lambda \approx F'_\lambda \approx I'_\lambda)$ (в эрг/(см ² · с · ср · мкм))	T_b , К
5	7,74	5500
10	6,56	5050
20	5,36	4740
50	3,77	4500
100	2,57	4370
1000 = 1 мм		5500
1 см		8200

Бальмеровский скачок [10]

$$D = \lg (I''_{\lambda^+} / I''_{\lambda^-}) = 0,108$$

$$\lg (F''_{\lambda^+} / F''_{\lambda^-}) = 0,083$$

Распределение энергии во внешних областях спектра.

Радиоволны: см. § 92.

Ультрафиолетовое излучение в вакууме: см. § 93.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 71; **2**, § 82.
2. Labs D., Neckel H., Z. Ap., **69**, 1 (1968); Sol. Phys., **15**, 79 (1970).
3. Gingerich O. et al., Sol. Phys., **18**, 347 (1971).
4. Houtgast J., Sol. Phys., **3**, 47 (1968); **15**, 273 (1970).
5. Houtgast J., Namba O., B. A. N., **20**, 87 (1968).
6. Макарова Е. А., Харитонов А. В., А. Ж., **45**, 752 (1968).
7. Lambert D. L., Phil. Trans. Roy. Soc. London, **A 270**, 3 (1971).
8. Eddy J. A., Léna, MacQueen, Sol. Phys., **10**, 330 (1969).
9. Linsky J. L., Avrett E. H., Publ. A. S. P., **82**, 169 (1970).
10. Labs D., Neckel H., частное сообщение.
11. Broadfoot A. L., Ap. J., **173**, 681 (1972).
- 12*. Макарова Е. А., Харитонов А. В., Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная, «Наука», М., 1972.

§ 83. Хромосфера

Хромосфера простирается от *основания*, расположенного на уровне, для которого $\tau_5 = 0,005$ (см. § 77), до резко выраженного *переходного слоя* (переход в корону). В модели этот переход расположен точно на 2000 км выше основания. На самом деле он происходит в большом диапазоне высот. Хромосферное вещество, проникая выше обычного уровня перехода, порождает хромосферные явления вплоть до высоты 10 000 км. Действительно, протуберанцы, которые часто достигают высоты 40 000 км, имеют те же физические свойства, что и хромосфера. Хромосфера, видимая на краю диска, состоит в основном из выступающих спикул.

Модель нижней хромосферы приведена в соответствие с моделью фотосферы из § 77 по уровню, для которого $\tau_5 = 10^{-6}$ (1260 км выше основания).

N – число частиц в 1 см³ (атомы + ионы + электроны)

N_e – число электронов в 1 см³

h – высота над уровнем, для которого $\tau_5 = 0,005$ (высота над основанием)

Модель хромосферы и переходного слоя

h , км	r/R_\odot	T , К	$\lg N$ $\lg N_e$		$\lg P_e$ (в дин/см ²)	Ссылки
			(в см ⁻³)			
0	1,0000	4 560	16,13	11,96	-0,24	
200	1,0003	4 180	15,35	11,18	-1,16	[3, 5, 6, 10]
500	1,0007	5 230	14,08	10,88	-1,26	
1000	1,0014	6 420	12,25	10,87	-1,18	
1500	1,0022	8 000	11,17	10,54	-1,42	
1900	1,0027	11000	10,82	10,49	-1,33	
1990	1,0028	28 000	10,40	10,10	-1,32	[7-9, 11]
2000	1,0029	100 000	10,11	9,81	-1,05	
2010	1,0029	190 000	9,77	9,47	-1,11	
2100	1,0030	470 000	9,32	9,02	-1,17	

Кинетическая температура хромосферы [1]

$$= 8000 \text{ K}$$

Высота хромосферы, наблюдаемой на краю диска [1]

$$= 7000 \text{ км}$$

Высота по спектрогелиограммам [2, 3]

Центр линии $H\alpha$		3000 км
Центр линии $H\beta$		1900 км
Центр линии Mg, $\lambda = 5184 \text{ \AA}$		300 км
Центр линии Ca, $\lambda = 4226 \text{ \AA}$		600 км
Центр линии K Ca ⁺	(K3)	3000 км
$\Delta\lambda = 0,3 \text{ \AA}$	(K2)	1600 км
$\Delta\lambda = 0,6 \text{ \AA}$	(K1)	500 км
$\Delta\lambda = 1,0 \text{ \AA}$	(K1)	200 км

Наиболее вероятные скорости турбулентности ξ [2, 4]

h , км	0	1000	2000	выше перехода
ξ , км/с	2,6	8	14	10

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 72; **2**, § 83.
2. *de Jager C.*, Handb. d. Phys., **52**, 115, 125 (1959).
3. *White O. R., Wilson P. R.*, Ap. J., **146**, 250 (1966).
4. *Suemoto Z.*, Publ. A. S. Japan, **15**, 531 (1963).
5. *Gingerich O. et al.*, Sol. Phys., **18**, 347 (1971).
6. *Cuny Y.*, Sol. Phys., **16**, 293 (1971).
7. *Burton W. M. et al.*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, **A270**, 81 (1971).
8. *Ulmschneider P.*, Astron. Ap., **12**, 297 (1971).
9. *Jordan C.*, диссертация, London, 1965.
10. *Chipman E. G.*, Harv. Coll. Obs., TR-26, 1972.
11. *Lantos P.*, Sol. Phys., **22**, 387 (1972).

§ 84. Корона

Излучение короны состоит из трех компонент:

K – непрерывное излучение, рассеянное на электронах

F – фраунгоферов спектр, обусловленный рассеянием излучения фотосферы на межпланетных частицах

L – излучение в корональных эмиссионных линиях. Компонентой L пренебрегают при фотометрии короны, так как она составляет около 1 % от всего излучения.

Полный световой поток от короны за пределами $1,035 \mathcal{R}_{\odot}$ (типичный размер лунного диска) [1, 3]

при максимуме пятен $= 1,3 \cdot 10^{-6}$ солнечного потока

$= 0,57$ полной луны

при минимуме пятен $= 0,8 \cdot 10^{-6}$ солнечного потока

$= 0,35$ полной луны

Полное излучение F -короны $= 0,29 \cdot 10^{-6}$ солнечного потока

Распределение энергии в спектре K -компоненты подобно \mathcal{F}_{λ} из § 82 при $B - V = 0,65$. F -компонента немного краснее, для нее $B - V \approx 0,75$.

За основание короны можно принять переходную область при $r = 1,003 \mathcal{R}_{\odot}$.

Сжатие короны относительно изофот [3, 6, 7, 13]

$$\varepsilon = (A_3 - P_3) / A_3 \approx (A_1 - P_1) / A_1,$$

где A_1 и P_1 – экваториальный и полярный диаметры, а для получения A_3 и P_3 соответствующие диаметры усреднены вместе с диаметрами, повернутыми на 15° в обе стороны.

При максимуме солнечных пятен $\varepsilon \approx 0,05$.

При минимуме солнечных пятен $\varepsilon \approx 0,23$ вблизи $r = 1,6 \mathcal{R}_{\odot}$.

В таблице на стр. 160 приведены значения ε в зависимости от r / \mathcal{R}_{\odot} .

Поляризация света короны ($K + F$) [1, 10, 12]

$$p = (I_t - I_r) / (I_t + I_r),$$

где I_t и I_r – интенсивности поляризованного света в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно (вектор электрического поля). $p_{\max} \approx 42\%$. Остальные значения приведены в таблице в зависимости от r/R_{\odot} .

Неоднородности концентрации короны можно приближенно выразить фактором неоднородности $x = \overline{N_e^2} / (\overline{N_e})^2$, где N_e – электронная концентрация. Тогда среднеквадратичное значение $N_e = \overline{N_e} x^{1/2}$. Для лучистой внешней короны можно написать

$$x \approx 1 / (\text{часть пространства, занятая лучами}).$$

О факторе неоднородности имеются только приближенные данные (см. таблицу). x зависит от r/R_{\odot} .

Температура короны.

Спокойная корона $T_{\max} = 1,8 \cdot 10^6$ К при $r \approx 2 R_{\odot}$.

Температура растет в плотных лучах согласно соотношению

$$\Delta \lg T = 0,4 \Delta \lg N_e \text{ [4]}$$

Изменения p , ε , x , T вдоль радиуса короны

r/R_{\odot}	1,0	1,2	1,5	2	3	5	10	20	215
Поляризация, %									
p на экваторе	21	33	42	34	20	10	4	2,6	
p на полюсе (минимум солнечных пятен)	20	28	30	17	6	2			
Сжатие ε	0,06	0,11	0,17	0,16	0,08	0,09	0,18	0,26	
Неоднородность x [8]	1,1	1,2	1,6	2,5	4	8	17	21	25
T , 10^6 К [13]	0,5	1,2	1,7	1,8	1,7	1,4	1,1	0,8	0,2

Яркость неба около Солнца во время полного затмения [1, 5]

$$= 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ средней яркости Солнца}$$

Сглаженная яркость короны и электронная концентрация [1, 5, 13, 14]

r/R_{\odot} ρ/R_{\odot}	$\lg\left(\frac{r}{R_{\odot}} - 1\right)$	\lg (поверхностная яркость в $10^{-10} F_{\lambda}$) (см. § 82)				$\lg N_e$ (в см^{-3})			
		K			F [1, 14]	макс.	мин.		
		макс.	мин.				макс.	экватор	полюс
			экватор	полюс					
1,003	-2,5					9,0	9,0	9,0	
1,005	-2,3					8,8	8,7	8,6	
1,01	-2,0	4,68	4,43	4,35	3,22	8,6	8,4	8,3	
1,03	-1,5	4,55	4,30	4,15	3,16	8,45	8,25	8,12	
1,06	-1,2	4,41	4,16	3,90	3,06	8,36	8,10	7,98	
1,10	-1,0	4,25	4,01	3,72	3,00	8,23	7,96	7,81	
1,2	-0,7	3,91	3,65	3,15	2,80	7,90	7,67	7,30	
1,4	-0,4	3,34	3,08	2,39	2,46	7,44	7,18	6,64	
1,6	-0,2	2,92	2,67	1,89	2,24	7,05	6,83	6,13	
1,8	-0,1	2,54	2,30	1,48	2,06	6,78	6,56	5,78	
2,0	0,0	2,23	2,00	1,15	1,93	6,52	6,31	6,50	
2,2	+0,1	1,98	1,78	0,91	1,81	6,28	6,10	5,25	
2,5	+0,2	1,63	1,44	0,6	1,65	6,00	5,81	5,00	
3,0	+0,3	1,23	0,99	0,2	1,43	5,65	5,45	4,7	
4	+0,5	0,70	0,44	-0,3	1,10	5,18	4,97	4,3	
5	+0,6	0,3	0,05	-0,7	0,83	4,90	4,70	4,0	
10	1,0	-0,5	-0,8	-1,7	0,23	4,1	4,0		
20	1,3		-1,7		-0,27		3,2		
50	1,7						2,2		
100	2,0						1,5		
215	2,3						0,7		

Свет от Земли на Луне при полном затмении [7]

$$= 1,1 \cdot 10^{-10} \text{ средней яркости Солнца}$$

Фотометрия короны и электронная концентрация N_e . В предположении сферической симметрии распределение интенсивности короны I_c в зависимости от проекции радиального расстояния ρ можно использовать для получения распределения N_e в зависимости от радиального расстояния r . Классические выражения Баумбаха [16]:

$$10^6 I_c / I_\odot = 0,0532\rho^{-2,5} + 1,425\rho^{-7} + 2,565\rho^{-17},$$

откуда

$$N_e(r) = 10^8 (0,036r^{-1,5} + 1,55r^{-6} + 2,99r^{-16}) \text{ см}^{-3}.$$

Мера эмиссии. Так как эмиссия короны обычно зависит от N_e^2 , величина интеграла $\int N_e^2 dV$, взятого по объему какого-либо объекта, называется мерой эмиссии, МЕ.

Мера эмиссии полной короны Баумбаха (включая невидимую часть)

$$= 4,4 \cdot 10^{49} \text{ см}^{-3},$$

она иногда называется 1 баумбах [17], однако эта единица несколько неопределенна.

Корональные конденсации – это сложные образования, связанные с активными областями.

Плотность конденсации \approx до $10 \cdot$ (плотность нормальной короны)

Температура конденсации $\approx 4 \cdot 10^6 \text{ К}$

Поток ультрафиолетового и рентгеновского излучения для

$$\text{МЕ} = 10^{50} \text{ см}^{-3} \text{ [18–20]}$$

C – континуум, L – линии, T – полное

lg (поток вблизи Земли в эрг/(см² · с · Å))

$\lambda, \text{ \AA}$	lg T (в К)											
	6,2			6,6			7,0			8,0		
	C	L	T	C	L	T	C	L	T	C	L	T
1				-7		-7	-4,3		-4,3	-0,5		-0,5
2				-5,5		-5,5	-2,7	-5	-2,7	-0,7	-2,2	-0,7
3				-4,5	-6	-4,5	-2,4	-3,6	-2,4	-0,9	-3,0	-0,9
5	-5	-6	-5	-3,4	-4,0	-3,3	-2,1	-2,5	-2,0	-1,3	-3,6	-1,3
8	-4,3	-5	-4,2	-2,7	-3,0	-2,5	-2,0	-1,9	-1,65	-1,6	-4,5	-1,6
10	-3,9	-4,5	-3,8	-2,5	-2,5	-2,2	-2,0	-1,7	-1,5	-1,8	-5	-1,8
15	-3,3	-3,5	-3,1	-2,4	-1,6	-1,6	-2,1	-1,6	-1,5	-2,0	-6	-2,0
20	-3,1	-2,6	-2,5	-2,5	-2,0	-1,9	-2,3	-3,0	-2,2	-2,2		-2,2
30	-3,0	-2,6	-2,45	-2,7	-3,4	-2,6	-2,7	-3,7	-2,7	-2,6		-2,6
40	-3,0	-2,4	-2,3	-2,7	-3,1	-2,6	-2,8	-4,0	-2,8	-2,9		-2,9
50	-3,0	-2,1	-2,1	-2,8	-2,9	-2,6	-2,9	-4,4	-2,9	-3,2		-3,2
60	-3,1	-2,6	-2,5	-3,0	-3,5	-2,9	-3,0	-4,6	-3,0	-3,3		-3,3
80	-3,4	-2,7	-2,6	-3,1	-4,2	-3,1	-3,2	-4,5	-3,2			
100	-3,7	-2,8	-2,8	-3,3	-4,0	-3,2	-3,4	-4,4	-3,4			

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 73; 2, § 84.
2. Unsöld A., Astron. Ap., 4, 220 (1970).
3. van de Hulst H. C., В. А. N., 11, 135 (1950); also The Sun, ed. Kuiper, Chicago, 1953, p. 207. (Русский перевод: Солнце, под ред. Дж. Койпера, ИЛ, М., 1957.)
4. Reimers D., Astron. Ap., 10, 182 (1971).
5. Newkirk G., Dupree, Schmahl, Sol. Phys., 15, 15 (1970).
6. Ludendorff H., Sitz Preuss. Ak. Wiss., 185, 1928; 200, 1934.
7. de Jager C., Handb. d. Phys., 52, ed. Flügge, 249, 254 (1959).
8. Allen C. W., Solar Corona, I. A. U. Symp., 16, 1, 1961.
9. Stelzried C. T. et al., Sol. Phys., 14, 440 (1970).
10. Scholz G., Mitt. Ap. Obs. Potsdam, No. 132, 1969.
11. Delcroix A., Lemaire A., Ap. J., 156, 787 (1969).
12. Blackwell D. E., Dewhirst, Ingham, Adv. Astron. Ap., 5, 1 (1967).
13. Newkirk G., Ann. Rev. Astron. Ap., 5, 213 (1967).
14. Blackwell D. E., Petford A. D., M. N., 131, 383, 399 (1966).
15. Elgaröy Ö., Eckhoff H. Kr., Ap. Norvegica, 10, 127 (1966).
16. Baumbach S., Astr. Nach., 263, 121 (1937).
17. Мандельштам С. Л., Phil. Trans. Roy. Soc. London, A270, 135, 142 (1971).
18. Landini M., Mon Fossi B. C., Astron. Ap., 6, 468 (1970); Sol. Phys., 17, 379 (1971).
19. Tucker W. H., Koren M., Ap. J., 168, 283 (1971).
20. Mewe R., Sol. Phys., 22, 459 (1972).
- 21*. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М., Солнце и ионосфера, «Наука», М., 1969.

§ 85. Линейчатый спектр короны

Эмиссионный спектр короны наблюдается в интервале длин волн от 7 Å до 3 мкм. Избранные линии приведены в трех списках, которые дают неодинаковую информацию.

T_m – температура, при которой спектр достигает наибольшей интенсивности

f – поток энергии от корональных линий, наблюдаемый вне атмосферы Земли

W – эквивалентная ширина затменной корональной линии в единицах непрерывного спектра, создаваемого электронным рассеянием

A – вероятность перехода

m – мультиплетная линия, отождествление мультиплета.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 74; **2**, § 85.
2. Jordan C., Comm. Univ. London Obs., **68** (1965).
3. Batstone R. M. et al., Sol. Phys., **13**, 389 (1970).
4. Freeman F. F., Jones B. B., Sol. Phys. **15**, 288 (1970).
5. Olsen K. H. et al., Las Almos Lab., LA-DC-12459, 1971.
6. Walker A. B. C., Ruge R. H., Astron. Ap., **5**, 4 (1970).
7. Jordan C., Eclipse of 1970, COSPAR Symp. 1971.
8. Gabriel A. H. et al., Ap. J., **169**, 595 (1971).
9. Jordan C., неопубликованные данные, 1972.

Избранные разрешенные линии, $\lambda = 7 \leftrightarrow 400 \text{ Å}$

λ , Å	Ион	Переход	f , 10^{-3} эрг/(см ² · с)	$\lg T_m$ (в К)
9,2 [3, 6]	Mg XI	$1s^2-1s2p$	2	6,4
12,1 m	Ne X, Fe XVII		1	
13,6	Ne IX	$1s^2-1s2p$	2	6,20
15,1 m [2, 4]	Fe XVII	$2p^6-2p^53d$	8	6,58
16,9 m	Fe XVII	$2p^6-2p^53s$	9	6,58
19,0	O VIII	$1s-2p$	8	6,36
21,6 m	O VII	$1s^2-1s2p$	6	5,9
50,6 m	Si X	$2p-3d$	6	6,14
69,7	Fe XIV	$3p-4s$	4	6,27
171,0	Fe IX	$3p^5-3p^53d$	85	5,85
174,8 m	Fe X	$3p^5-3p^43d$	90	6,00
177,2	Fe X	$3p^5-3p^43d$	33	6,00
180,4	Fe XI	$3p^4-3p^33d$	75	6,11
188,3	Fe XI	$3p^4-3p^33d$	40	6,11
195 m	Fe XII	$3p^3-3p^23d$	60	6,16
202,0	Fe XIII	$3p^2-3p3d$	25	6,21
211,3	Fe XIV	$3p-3d$	15	6,27
284,1	Fe XV	$3s^2-3s3p$	40	6,31
303,4	Si XI	$2s^2-2s2p$	30	6,22
335,4	Fe XVI	$3s-3p$	20	6,40
368,1	Mg IX	$2s^2-2s2p$	15	5,97
499	Si XII	$2s-2p$	10	6,27
610	Mg X	$2s-2p$	12	6,04

Избранные запрещенные линии, $\lambda = 1000 \leftrightarrow 3000 \text{ Å}$ [9]

λ , Å [7, 8]	Ион	Переход	$\lg T_m$ (в К)
1242,2	Fe XII	p^3 $^4S_{1/2}-^2P_{1/2}$	6,16
1349,6	Fe XII	p^3 $^4S_{1/2}-P_{1/2}$	6,16
1446,0	Si VIII	$2p^3$ $^4S_{1/2}-^2D_{1/2}$	5,93
1467,0	Fe XI	$3p^4$ $^3P_1-^1S_0$	6,11
2126,0	Ni XIII	$3p^4$ $^3P_2-^1D_2$	6,27
2149,5	Si IX	$2p^2$ $^3P_2-^1D_2$	6,04
2169,7	Fe XII	$3p^3$ $^4S_{1/2}-^2D_{2/2}$	6,16

Избранные запрещенные линии, $\lambda = 3000 \leftrightarrow 15\,000 \text{ \AA}$

$\lambda, \text{ \AA}$	Ион	Переход	Верхний потенциал возбуждения, эВ	$A, \text{ с}^{-1}$	$W, \text{ \AA}$	$\lg T_m$ (в К)
3 329 [1]	Ca XII	$2p^5 \quad 2P_{1/2} - 2P_{1/2}$	3,72	488	0,7	
3 388,2 »	Fe XIII	$3p^2 \quad 3P_2 - 1D_2$	5,96	87	10	6,19
3 600,9 »	Ni XVI	$3p \quad 2P_{1/2} - 2P_{1/2}$	3,44	193	1,3	6,37
4 232,0 »	Ni XII	$3p^5 \quad 2P_{1/2} - 2P_{1/2}$	2,93	237	1,1	6,17
5 302,9 »	Fe XIV	$3p \quad 2P_{1/2} - 2P_{1/2}$	2,34	60	20	
5 694,4 »	Ca XV	$2p^2 \quad 3P_0 - 3P_1$	2,18	95	0,3	6,27
6 374,5 »	Fe X	$3p^5 \quad 2P_{1/2} - 2P_{1/2}$	1,94	69	5	6,00
6 701,9 »	Ni XV	$3p^2 \quad 3P_0 - 3P_1$	1,85	57	1,2	6,32
7 891,9 »	Fe XI	$3p^4 \quad 3P_2 - 3P_1$	1,57	44	6	6,11
10 746,8 »	Fe XIII	$3p^2 \quad 3P_0 - 3P_1$	1,15	14	50	6,21
10 797,9 »	Fe XIII	$3p^2 \quad 3P_1 - 3P_2$	2,30	10	30	6,21
14 310 [5]	Si X	$2p^2 \quad 2P_{1/2} - 2P_{1/2}$				6,14

§ 86. Вращение Солнца

Наклонение солнечного экватора к эклиптике

$$= 7^\circ 15'$$

Долгота восходящего узла

$$= 74^\circ 22' + 84' T,$$

где T – эпоха в столетиях от 1900,0

Сидерическое вращение зоны солнечных пятен (зависит от широты φ) [1, 4, 8]

$$= 14,44^\circ - 3,0^\circ \sin^2 \varphi \text{ в сутки}$$

Синодическое вращение зоны солнечных пятен

$$= 13,45^\circ - 3,0^\circ \sin^2 \varphi \text{ в сутки}$$

Сидерическое вращение – синодическое вращение = орбитальное движение Земли

$$= 0,9856^\circ \text{ в сутки}$$

Период синодического вращения

$$\approx 26,75 + 5,7 \sin^2 \varphi \text{ сут}$$

Период сидерического вращения, выбранный для системы гелиографических долгот (соответствующий $\varphi = 17^\circ$) и используемый для определения момента количества движения и т. п.

$$= 25,38 \text{ сут}$$

Соответствующий синодический период

$$= 27,275 \text{ сут}$$

Синодический период, равный 27,00 сут (соответствующий $\varphi = 12^\circ$), используется для многих статистических исследований.

Угловая скорость вращения Солнца ($\varphi = 17^\circ$)

$$= 2,865 \cdot 10^{-6} \text{ рад/с}$$

Сидерическое экваториальное вращение, ($\varphi = 0$), определенное по различным деталям:

Солнечные пятна, факелы, флоккулы, волокна, протуберанцы

$$= 14,45^\circ$$

Металлический обращающий слой [1, 3, 6]

$$= 13,72^\circ$$

Линия Ha [7]

$$= 14,1^\circ$$

Экваториальная скорость вращения поверхности в км/с

$$= 0,1406 \times (\text{сидерическое вращение в град/сут})$$

Экваториальная скорость поверхности (солнечные пятна)

$$= 2,03 \text{ км/с}$$

Экваториальная скорость поверхности (обращающий слой)

$$= 1,93 \text{ км/с}$$

Сидерическое вращение за сутки для всего диапазона солнечных широт φ

φ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Солнечные пятна и факелы [1, 2, 8, 9]	14,4	14,3	13,7	12,8	11,4	10,1	8,8
Обращающий слой [3, 10]	13,7	13,6	13,2	12,3	11,2	10,3	9,8
Волокна, корона, магнитное поле [1, 2, 4, 5]	14,2	14,1	13,8	13,2	12,5	11,7	10,9

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 75; **2**, § 86.
2. Hansen R. T. et al., Sol. Phys., **10**, 135 (1969).
3. Howard R., Harvey J., Sol. Phys., **12**, 23 (1970).
4. Wilcox J. M., Howard R., Sol. Phys., **13**, 251 (1970).
5. Šykora J., Sol. Phys., **18**, 72 (1971).
6. Асланов И. А., А. Ж., **40**, 1036 (1963).
7. Livingston W. C., Sol. Phys., **7**, 144 (1969); **9**, 448 (1969).
8. Ward F., Ap. J., **145**, 416 (1966).
9. Piddington J. H., Sol. Phys., **21**, 4 (1971).
10. Солонский Ю. А., Sol. Phys., **23**, 3 (1972).

§ 87. Изменения солнечных пятен и солнечная активность

Число солнечных пятен (число Вольфа) $R = k(10g + s)$,

где k – поправочный коэффициент обсерватории, вводимый для установления единства, g – число групп солнечных пятен, s – общее число отдельных пятен, R_Z – цюрихское число солнечных пятен.

Средние отношения между различными мерами солнечной активности [1–3]

Отношение	При минимуме солнечных пятен $R \approx 0$	При максимуме солнечных пятен $R \approx 100$
Число отдельных пятен/ R_Z	0,70	0,87
Число групп пятен/ R_Z	0,097	0,083
Площадь тени (10^{-6} полусферы)/ R_Z	2,5	2,7
Площадь пятен (10^{-6} полусферы)/ R_Z	14,0	16,5
Площадь факелов (10^{-6} полусферы)/ R_Z	38	25
Число новых групп за год/среднее R_Z	6,9	5,0
Число возродившихся групп за год/среднее R_Z	0,51	0,56
Число отдельных, пятен в группе	7,3	11,0

Среднее значение отношения (площадь проекции солнечных пятен в миллионных долях диска)/(исправленная площадь пятен в миллионных долях полусферы)
= 1,33

Среднее значение отношения (площадь проекции факелов в миллионных долях диска)/(исправленная площадь факелов в миллионных долях полусферы)
= 0,84

Однопараметрические кривые цикла солнечных пятен [1, 3, 5, 6]
 \bar{R} (сглажено)

Параметр цикла a	R_{\max}	Годы от начальной эпохи s															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
3,8	155	0	16	82	140	154	133	98	66	41	23	12	6	3	1	0	
4,2	138	0	10	61	117	138	125	94	64	40	23	12	6	3	1	0	
4,6	124	0	6	46	98	123	116	90	63	39	22	12	6	3	1	0	
5,0	112	0	3	32	81	110	107	86	61	38	22	12	6	3	1	0	
6,0	89	0	1	15	48	81	88	76	57	36	22	12	6	3	1	0	
7,0	73	0	0	8	30	57	72	67	53	34	22	12	6	3	1	0	
8,0	60	0	0	4	16	40	57	58	49	33	22	12	6	3	1	0	
9,0	51	0	0	1	9	27	44	51	45	32	21	12	6	3	1	0	
10,0	44	0	0	0	4	18	33	43	41	31	21	12	6	3	1	0	

В таблице характеристик цикла солнечных пятен приведены параметры отдельных циклов и номера циклов (современный стандарт). Номера определяют четные и нечетные циклы. Нулевой год $\approx s + 0,5$. Осторожно: двойное использование символа s .

Средний период пятнообразования = 11,04 года

Среднее максимальное число пятен (сглаженное значение)

$$\bar{R}_M = 103$$

Среднее минимальное число пятен $\bar{R}_m = 5,2$

Изменение магнитной полярности в чередующихся циклах. В *четных* циклах (например, 1947 г.) *ведущее* пятно в *северном* полушарии имеет *южный* (т. е. видимый как южный) полюс *на самом верху* солнечной поверхности, т. е. магнитное поле направлено *внутрь* поверхности Солнца (и обозначается через V в ранних записях [7]).

80-летний цикл максимумов числа пятен [8, 10]

Год максимума	Сглаженное значение R_M
1776	123
1854	122
1950	135

Характеристики циклов солнечных пятен [1, 4]

Параметры a и s соответствуют однопараметрическим кривым

Цикл	Максимум M		Минимум m		Интервалы, годы				Параметры цикла	
	эпоха	R_M	эпоха	R_m	m \leftrightarrow m	m \leftrightarrow M	M \leftrightarrow m	M \leftrightarrow M	s	a
-12	1615,5		1610,8		8,2	4,7	3,5			
-11	1626,0		1619,0		15,0	7,0	8,0	10,5		
-10	1639,5		1634,0		11,0	5,5	5,5	13,5		
-9	1649,0		1645,0		10,0	4,0	6,0	9,5		
-8	1660,0		1655,0		11,0	5,0	6,0	11,0		
-7	1675,0		1666,0		13,5	9,0	4,5	15,0		
-6	1685,0		1679,5		9,5	5,5	4,0	10,0		
-5	1693,0		1689,0		9,0	4,0	5,0	8,0		
-4	1705,5	54	1698,0	0	14,0	7,5	6,5	12,5		
-3	1718,2	60	1712,0	0	11,5	6,2	5,3	12,7		
-2	1727,5	113	1723,5	11	10,5	4,0	6,5	9,3		
-1	1738,7	112	1734,0	5	11,0	4,7	6,3	11,2		
0	1750,5	92,6	1745,0	5	10,2	5,3	4,9	11,6	1744,7	6,2
1	1761,5	86,5	1755,2	8,4	11,3	6,3	5,0	11,2	1755,8	5,8
2	1769,7	115,8	1766,5	11,2	9,0	3,2	5,8	8,2	1765,5	5,2
3	1778,4	158,5	1775,5	7,2	9,2	2,9	6,3	8,7	1774,6	4,6
4	1788,1	141,2	1784,7	9,5	13,6	3,4	10,2	9,7	1784,3	4,2
5	1805,2	49,2	1798,3	3,2	12,3	6,9	5,4	17,1	1797,7	8,3
6	1816,4	48,7	1810,6	0,0	12,7	5,8	6,9	11,2	1810,6	9,5
7	1829,9	71,7	1823,3	0,1	10,6	6,6	4,0	13,5	1823,5	6,6
8	1837,2	146,9	1833,9	7,3	9,6	3,3	6,3	7,3	1833,3	4,4
9	1848,1	131,6	1843,5	10,5	12,5	4,6	7,9	10,9	1843,9	5,0
10	1860,1	97,9	1856,0	3,2	11,2	4,1	7,1	12,0	1855,6	5,6
11	1870,6	140,5	1867,2	5,2	11,7	3,4	8,3	10,5	1866,8	4,6
			1878,9	2,2				13,3		

Продолжение

Цикл	Максимум M		Минимум m		Интервалы, годы				Параметры цикла	
	эпоха	R_M	эпоха	R_m	m \leftrightarrow m	m \leftrightarrow M	M \leftrightarrow m	M \leftrightarrow M	s	a
12	1883,9	74,6			10,7	5,0	5,7		1877,9	6,8
13	1894,1	87,9	1889,6	5,0	12,1	4,5	7,6	10,2	1888,8	6,2
14	1907,0	64,2	1901,7	2,6	11,9	5,3	6,6	12,9	1901,2	6,9
15	1917,6	105,4	1913,6	1,5	10,0	4,0	6,0	10,6	1912,7	6,0
16	1928,4	78,1	1923,5	5,6	10,2	4,8	5,4	10,8	1922,5	6,4
17	1937,4	119,2	1933,8	3,4	10,4	3,6	6,8	9,0	1933,6	4,9
18	1947,5	151,8	1944,2	7,7	10,1	3,3	6,8	10,1	1944,2	4,0
19	1957,9	201,3	1954,3	3,4	10,4	3,6	6,8	10,4	1954,3	3,8
20	1968,9	110,6	1964,7	9,6		4,2		11,0		

Солнечная активность

В таблице показаны изменения отдельных солнечных характеристик в течение цикла пятнообразования. Характеристики средней группы солнечных пятен

Число Вольфа $R = 12$

Число отдельных пятен = 10

Площадь пятна (тень + полутень) = 200 миллионов долей полусферы
= 260 миллионов долей диска

Радиус пятна (если это одиночное пятно)

= 0,020 R_{\odot}

Площадь, занятая кальциевыми флоккулами

= 1800 миллионов долей полусферы

Средние изменения характеристик солнечной активности в течение цикла пятнообразования

Годы	Минимум ————— Максимум ————— Минимум											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Солнечные пятна</i>												
R, новый цикл	1	10	48	86	100	93	69	47	27	16	9	4
R, старый цикл	4	2	0									
Широта пятен	27°	23°	20°	18°	16°	14°	13°	12°	10°	9°	8°	8°
Интервал широт												
низкие	19°	13°	7°	3°	1°	0°	0°	0°	0°	0°	1°	2°
высокие	34°	36°	36°	37°	37°	33°	31°	28°	25°	20°	16°	12°
<i>Протуберанцы</i>												
Относительные числа												
на экваторе	10	10	20	42	60	65	61	52	41	27	15	10
на полюсе	14	19	32	40	37	31	24	19	15	14	14	14
Широты												
экваториальные			30°	29°	28°	27°	25°	24°	23°	23°	22°	22°
полярные	45°	49°	56°	64°	70°	81°	90°		48°	45°	44°	45°
<i>Корона</i>												
Относительная эмиссия в линии λ 5303 Å	20	40	71	92	100	95	90	83	77	65	55	20
Широтные границы эмиссии в линии λ 5303 Å												
низкие широты	31°	28°	23°	20°	18°	17°	15°	13°	11°	10°	8°	7°
высокие широты	50°	55°	65°	78°	90°			45°	50°	56°	52°	48°
Сжатие, § 84	0,24	0,16	0,07	0,02	0,04	0,11	0,18	0,23	0,25	0,27	0,26	0,24
<i>Число дней в году, в которые наблюдаются магнитные возмущения</i>												
Периодические	31	23	27	32	38	45	51	60	69	77	73	31
Спорадические	2	4	8	11	13	13	11	9	6	3	2	2
Неопределенные	14	18	22	25	27	27	26	24	22	19	17	14
Сильные бури	0,4	0,9	1,7	2,4	2,9	2,7	2,1	1,4	0,9	0,6	0,4	0,4

Активные области

С активной областью AR на Солнце связаны многие явления: пятна, факелы, факельные поля, сильные магнитные поля, корональные конденсации, усиленное радиоизлучение, источники ультрафиолетового и рентгеновского излучения, области вспышек.

Одни области активнее других, однако не существует единственного признака, по которому можно было бы охарактеризовать AR. Основными мерами активности являются площади пятен, числа пятен, размеры и интенсивности факелов и факельных полей, потоки рентгеновского, ультрафиолетового и радиоизлучения.

Чтобы установить связь между общими потоками и активными областями, удобно специфицировать потоки излучения следующим образом [9]:

Q – излучение спокойного Солнца, временная шкала	1 год
AR – излучение активных областей, » »	1 сут
F1 – вспышки, » »	1 мин

Полный поток от Солнца \odot выразится в виде

$$\odot = Q + \sum AR + \sum FI$$

Полный поток удобно стандартизировать при $R = 0$ и $R = 100$.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 76; **2**, § 87.
2. Waldmeier M., Регулярные сводки о солнечных пятнах, Цюрих.
3. Waldmeier M., Astr. Mitt. Eid. St. Zurich, No. 285, 286 (1968).
4. Gleissberg W., Naturwiss., **47**, 197 (1960).
5. Cook A. P., J. Geoph. Res., **54**, 347 (1949).
6. Waldmeier M., Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung, Akad. Verlag, Leipzig, 1955. (Русский перевод. 1-го изд.: Вальдмайер М., Результаты и проблемы исследования Солнца, ИЛ, М., 1950.)
7. Hale G. E., Nicholson S. B., Magnetic Observations of Sunspots, Carnegie Inst., 1938.
8. Gleissberg W., Sol. Phys., **2**, 231 (1967); **4**, 93 (1968).
9. Allen C W., Phil. Trans. Roy. Soc. London, **A270**, 71 (1971).
10. Gleissberg W., Sol. Phys., **21**, 240 (1971).

§ 88. Солнечные пятна

Интенсивность полного излучения большого пятна.

Тень пятна/фотосфера = 0,24

Полутень/фотосфера = 0,77

Эффективная температура большого пятна (центр диска)

Тень = 4240 К

Полутень = 5680 К

Фотосфера (для сравнения) = 6050 К

Зависимость интенсивности непрерывного излучения пятна от длины волны [1, 3–8]

φ_u = тень/фотосфера

φ_{pu} = полутень/фотосфера

λ , мкм	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	4,0
φ_u	0,01	0,03	0,06	0,10	0,21	0,32	0,50	0,59	0,67
φ_{pu}		0,68	0,72	0,76	0,81	0,86	0,89	0,91	0,94

φ_u и φ_{pu} не зависят от размера пятна, если радиус тени r_u меньше 4" [5].

Изменения φ от центра к краю диска (θ – угловое расстояние от центра) [13]

$$\varphi_u = \varphi_u(\text{центральное}) + 0,09(1 - \cos \theta)$$

$$\varphi_{pu} = \varphi_{pu}(\text{центральное}) + 0,02(1 - \cos \theta)$$

Эти изменения почти не зависят от длины волны.

Обращающий слой в тени пятна [1, 2]. Данные относятся к уровню, для которого оптическая глубина равна 0,1.

Температура $T = 3710$ К

Электронное давление $P_e = 0,64$ дин/см²

Полное давление $P_g = 8 \cdot 10^4$ дин/см²

Спектральный тип К0

Модель тени солнечного пятна [9–13]

Оптическая глубина	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10
T	3200	3200	3340	3720	4150	5400
$\lg P_e$	-2,1	-1,5	-0,95	-0,22	+0,47	+1,6
$\lg P_g$	3,2	3,80	4,38	4,95	5,41	5,9

Соотношения между радиусами тени пятна r_u , полутени r_{pu} и окружающего пятно светлого кольца r_b [1,2]

$$r_u / r_{pu} = 0,42$$

$$r_b / r_{pu} = 1,35$$

Эффект Вильсона [2, 13, 21]

Видимое углубление тени пятен, наблюдаемых вблизи края диска
= 500 км

Зависимость магнитного поля в центре пятна B_0 от радиуса r_{pu} и площади $a (= \pi r_{pu}^2)$ [1, 14]

$a, 10^{-6}$ полусферы	5	10	50	100	500	1000	2000
$r_{pu}, 10^{-3} \mathcal{R}_\odot$	3	6	10	14	30	45	63
$B_0, \text{Гс}$	1000	1400	1700	2200	3200	3600	3900

Распределение магнитного поля в пятне [1, 15, 16]

B_v – компонента поля, направленная вертикально к солнечной поверхности

r – радиальное расстояние от центра пятна

$$B_v = B_0 \exp(-2,1 r^2 / r_{pu}^2)$$

r / r_{pu}	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
B / B_0	1,00	0,96	0,85	0,67	0,44	0,15

Отклонение направления магнитного поля от солнечной вертикали [1, 15, 16]

$$\alpha = 75^\circ \times (r / r_{pu})$$

Магнитный поток пятна [2, 19]

$$\Phi = 0,39 B_0 \pi r_{pu}^2$$

$$\approx 0,036 A_m \cdot 10^{21} \text{ Мкс,}$$

где A_m – максимальная площадь группы пятен в 10^{-6} полусферы, а 10^{21} Мкс считается единицей солнечного потока

Среднее отношение магнитных потоков ведущего и следующего пятен

$$= 3,7$$

Радиальная скорость вытекания вещества из пятна в обрабатывающий слой, достигающая максимума в области полутени [1, 16]

Максимальная скорость = 1,5 км/с

Среднее время жизни группы пятен [7]

$$= 0,12 \times (\text{максимальная площадь в миллионных долях полусферы}) \text{ сут}$$

Время жизни средней группы пятен [7]

$$= 6 \text{ сут,}$$

а время жизни больших групп, определяющих изменения солнечной активности

$$= 1,5 \text{ месяца}$$

Скорость распада большого пятна [20]

$$= 13 \cdot 10^{-6} \text{ полусферы/сут,}$$

различные оценки удивительно хорошо согласуются.

Время уменьшения площади большого пятна в e раз

$$\approx 11 \text{ сут}$$

Распределение времен жизни пятен (для пятен всех размеров) [1, 17, 20]

Время жизни, сут	1	2	3	5	10	20	30	50	70	100	150
% пятен в интервале одних суток	38	14	8	5	2	0,5	0,2	0,05	0,015	0,003	0,001

Время жизни радиальных волокон в полутени [1, 2, 18]

$$= 1 \text{ ч}$$

Ширина радиальных волокон в полутени [1, 2, 18]

$$= 300 \text{ км}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 77; **2**, § 88.
2. Bray R. J., Loughhead R. E., Sunspots, Chapman and Hall, 1964. (Русский перевод: Брей Р. и Лоухед Р., Солнечные пятна, изд-во «Мир», М., 1967.)
3. Mattig W., Sol. Phys., **18**, 434 (1971).
4. Maltby P., Staveland L., Sol. Phys., **18**, 443 (1971).
5. Rossbach M., Schröter E. H., Sol. Phys., **12**, 95 (1970).
6. Wöhl H. et al., Sol. Phys., **13**, 104 (1970).
7. Maltby P., Mykland N., Sol. Phys., **8**, 23 (1969).
8. Stankiewicz A., Acta Astron., **12**, 58 (1962).
9. Zwaan C., Rech. Astron. Obs. Utrecht., **17/4**, 1965.
10. Fricke K., Elsasser H., Z. Ap., **63**, 35 (1965).
11. Yun H. S., Sol. Phys., **16**, 379, 398 (1971).
12. Hekoux J. C., Astron. Ap., **2**, 288 (1969).
13. Wittmann A., Schröter E. H., Sol. Phys., **10**, 357 (1969).
14. Hale G. E., Nicholson S. B., Magnetic Observations of Sunspots, Carnegie Inst., 1938.
15. Adam M., M. N., **145**, 1 (1969).
16. Бумба В., Изв. Крымской Астрофиз. Обс., **23**, 213, 253 (1960).
17. Гневыхев М. Н., Циркул. Пулк. Обс., № 24, 37 (1938).
18. Danielson R. E., Ap. J., **134**, 275 (1961).
19. Sheeley N. R., Ap. J., **144**, 723 (1966).
20. Ringnes T. S., Ap. Norvegica, **8**, 303 (1964); **9**, 95 (1964).
21. Suzuki Y., Publ. A. S. Japan, **19**, 220 (1967).

§ 89. Факелы и факельные поля

Факелы и факельные поля являются видимыми признаками активных областей (AR, см. § 87), они испускают слабо меняющееся рентгеновское, ультрафиолетовое и радиоизлучение.

Факелы

Факелы наблюдаются в белом свете вблизи края диска (т. е. когда $\sin \theta \rightarrow 1,0$). Они имеют очень зернистую и неправильную структуру. Можно привести только сглаженные изменения яркости факелов.

Сглаженная яркость факелов относительно соседних участков фотосферы [1–7]

$\sin \theta$	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98
4 000 Å	1,015	1,02	1,03	1,05	1,08	1,14	1,20	1,5
6 000 Å	1,010	1,015	1,02	1,03	1,05	1,09	1,17	1,4
10 000 Å	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,05		

Время жизни среднего факела [1] = 15 сут,

а время жизни больших факелов, определяющих изменения солнечной активности

$$= 2,7 \text{ мес}$$

Время жизни элементов грануляции в факеле

$$1 \text{ ч (?)}$$

Диаметр элементов грануляции в факеле [1, 7]

$$= 1,6'' = 1200 \text{ км}$$

Избыток температуры в факельных гранулах

$$= 900 \text{ К}$$

Избыток температуры факела относительно уровня с оптической глубиной τ_5 в фотосфере или хромосфере [5, 6]

$$T(\text{факел}) - T(\text{фотосфера}) = -1000 \text{ К} (1 + \lg \tau_5)$$

на уровнях, расположенных выше, чем уровень, для которого $\tau_5 = 0,1$.

Факельные поля

Факельные поля, или яркие флоккулы, часто наблюдаются в линии Na и линиях H и K Ca⁺. Их положение хорошо согласуется с положением факелов, но факельные поля наблюдаются на всем диске. Систематически проводятся измерения площади и визуальные оценки интенсивности факельных полей по пятибалльной шкале [8].

Приближенная связь между площадью факельного поля и площадью пятна (10^{-6} полусферы)

Площадь факельного поля	500	1000	2 000	3 000	4 000	6 000	8 000	10 000
Площадь пятна	0	30	100	180	280	500	900	2 000

Так как продолжительность жизни факельного поля намного больше, чем пятна, площадь пятна может быть намного меньше, чем табличное значение.

Обычно пятна присутствуют тогда, когда интенсивность факельного поля

$$\geq 3$$

Время, за которое наблюдаемая площадь факельного поля уменьшается в e раз

$$= 1,6 \text{ оборотов} = 43 \text{ сут}$$

В действительности площадь факельного поля непрерывно растет, но интенсивность более слабых частей становится ниже порога измерения.

Характеристики типичной большой активности области AR [1]

Площадь пятна = $600 \cdot 10^{-6}$ полусферы

Площадь факельного поля = $6000 \cdot 10^{-6}$ полусферы

Площадь факельного поля в центре диска = $12\,000 \cdot 10^{-6}$ диска

Диаметр факельного поля = 3,5'

Поток излучения (радио- или рентгеновского и ультрафиолетового)

$$= 0,4 \times (\text{поток при } R = 100)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 78; **2**, § 89.
2. Лившиц М. А., А. Ж., **40**, 419 (1963).
3. Кузьминых В. Д., А. Ж., **40**, 419 (1963).
4. Кузьминых В. Д., Ситник Т. Ф., А. Ж., **40**, 954 (1963).
5. Schmahl G., Z. Ap., **66**, 81 (1967).
6. Chapman G. A., Sol. Phys., **14**, 315 (1970).
7. Rogerson J. B., Ap. J., **134**, 331 (1961).
8. Solar Geophysical Data, Служба наблюдения за окружающей средой, Boulder, U. S. A.

§ 90. Грануляция, сетка, спикулы

Гранулы

Диаметр гранул [1, 2, 6] = 1,3" = 1000 км

Размер гранулы колеблется от 0,5" до 2,5".

Расстояние между гранулами [2, 6] = 1,6"

Число гранул на всей поверхности фотосферы [1, 2, 6] = $4 \cdot 10^6$

Соответствующая площадь, занимаемая одной ячейкой грануляции = $1,5 \cdot 10^6 \text{ км}^2$

Контраст интенсивности гранулы

Яркая гранула/промежуток между гранулами = 1,3

Соответствующая разность температур = 300 К

Среднеквадратичные колебания [1, 3, 7] интенсивности для $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ = $\pm 0,09 \times$ (среднее значение) температуры = $\pm 110 \text{ К}$

Среднее время жизни гранул [1–3] = 8 мин

Скорость, подъема вещества в яркой грануле [1, 4] = 0,4 км/с

Скорость колебательного движения [2, 4]
 $\approx 0,5$ км/с

с периодом 295 с

Сетка

Супергрануляция [2, 4]

диаметр ячеек = 32 000 км

время жизни = 20 ч

горизонтальная скорость вещества в ячейке (от центра к краям)
 $= 0,4$ км/с

Спикулы и хромосферные узелки

Время жизни хромосферных спикул и узелков [5]

= 8 мин

Число спикул на высоте 3000 км для всей поверхности Солнца [1,5]

= 250 000

Горизонтальный размер спикул и узелков

= 1000 км

типичная высота = 7000 км

Число спикул, видимых на высоте h над поверхностью Солнца [5]

$h, 10^3$ км	2	5	10	16
Логарифм числа спикул (для всей поверхности)	6,0	4,9	3,9	2,5

Размер ярких и темных узелков = 3"

Скорости движения вещества в спикулах [5]

среднеквадратичная = 9 км/с

средняя = 4 км/с

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 79; 2, § 90.
2. Bray R. J., Loughhead R. E., The Solar Granulation, Chapman and Hall, 1967.
3. Bahng J., Schwarzschild M., Ap. J., **134**, 312 (1961).
4. Zirin H., The Solar Atmosphere, Blaisdell Co., 1966, pp. 223, 283. (Русский перевод: *Зирин Г.*, Солнечная атмосфера, изд-во «Мир», М., 1969.)
5. Beckers J. M., Ap. J., **138**, 648 (1963); Sol. Phys., **3**, 367 (1968).
6. Nambra O., Diemel W. E., Sol. Phys., **7**, 167 (1969).
7. Mehlretter J. P., Sol. Phys., **19**, 32 (1971).

§ 91. Вспышки, протуберанцы

Вспышки

Частицы с высокой энергией, испускаемые Солнцем, порождаются только большими вспышками классов 3, 4. Потоки частиц чрезвычайно изменчивы и достигают вблизи Земли величины 10^3 частиц/(см² · с) [6] [§ 130].

Потоки излучения от малых вспышек приблизительно эквивалентны потоку от одной вспышки класса 1 в сутки [12].

Физические характеристики вспышек [7] (выведенные из оптических данных и имеющие очень слабое отношение к источникам частиц высокой энергии и синхротронного радиоизлучения)

Ig (электронная концентрация в см⁻³) = 13,5

Температура = 15 000 К

Температура, соответствующая энергиям частиц, может быть равна 10^6 К и выше [8]

Характеристики вспышек и флоккулов, наблюдаемых в линии H α [1, 2]

Явление	Центральная интенсивность линии H α относительно континуума	Ширина линии H α в спектре вспышки, Å	Площадь вспышки, 10 ⁻⁶ видимой полусферы	Продолжительность вспышки, мин
Темный водородный флоккул	0,07			
Обычная поверхность Солнца	0,16			
Яркий водородный флоккул	0,4			
Вспышка, класс				
1	0,8	2,6	100 ↔ 250	20
2	1,2	4,1	250 ↔ 600	35
3	1,6	7	600 ↔ 1200	70
4	2	10	> 1200	

Поток излучения f и полная энергия излучения E вспышки [3–5, 12]

Класс вспышки	lg f (в эрг/(см ² · с ²))		lg E (в эргах)	
	8 ↔ 12 Å, XUV около Земли	H α около Земли	H α	весь видимый спектр
S	-2,8	-2,1		
1	-2,2	-1,5	28,7	29,3
2	-1,5	-0,8	29,3	30,4
3	-1,0	-0,3	30,0	31,2

Протуберанцы

Физические характеристики типичных протуберанцев

$$\lg (\text{электронная концентрация в см}^{-3}) [1, 9] = 10,5$$

достигает значения 13 в ярких протуберанцах [10]

$$\lg (\text{число атомов водорода в } 1 \text{ см}^3) [1] = 11$$

Кинетическая температура и температура возбуждения

$$T_{\text{kin}} [1, 9, 11] = 7000 \text{ K}$$

$$T_{\text{excit}} = 4200 \text{ K}$$

Скорость турбулентного движения [9, 11]

$$\xi_t = 4 \text{ км/с}$$

Размеры типичного протуберанца

Высота = 30 000 км (в основном < 40 000 км)

Длина = 200 000 км

Толщина = 5 000 км

Объем = 10²⁸ см³

Число темных волокон на Солнце

при максимуме числа пятен ≈ 20

при минимуме числа пятен ≈ 4

Среднее время жизни спокойного протуберанца

$$= 2,3 \text{ оборота Солнца}$$

Скорость увеличения длины волокна на ранних стадиях развития

$$= 100 \text{ 000 км/оборот}$$

Время падения вещества спокойного протуберанца на Солнце

$$\approx 5 \text{ сут}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 80; 2, § 91.
2. Рабочая группа по вспышкам, Trans. I. A. U., 9, 146 (1955).
3. Thomas R. J., Teske R. H., Sol. Phys., 16, 431 (1971).
4. de Jager C., Utrecht reprint, No. 57, 1969.
5. Обаишев С. О., Труды Астрофиз. института (АН Казахской ССР), 15, 27 (1969).
6. Fichtel C. E., McDonald F. B., Ann. Rev. Astron. Ap., 5, 351 (1967).

7. Svestka Z., Adv. Astron. Ap., **3**, 120 (1965).
8. de Jager C., Sol. Phys., **2**, 327 (1967).
9. Stellmacher G., Astron. Ap., **1**, 62 (1969).
10. Зуйков В. Н., Изв. ГАО, № 182, 116 (1967).
11. Курюхина А. И., А. Ж., **46**, 66 (1969).
12. Teske R. G., Sol. Phys., **21**, 146 (1971).

§ 92. Радиоизлучение Солнца

Следующие пять компонент радиоизлучения, от (а) до (д), можно распознать в записях, сделанных на одной частоте, а спектры быстро изменяющихся явлений можно классифицировать как всплески типов I, II, III, IV, V:

- а) спокойное тепловое излучение;
- б) медленно изменяющееся излучение, связанное с пятнами (устойчивые пятна);
- в) шумовые бури (усиленное излучение), состоящие в основном из всплесков I типа, связанных с пятнами;
- г) выбросы, комплексы, содержащие всплески II, III, IV, V типов или излучение, связанное со вспышками;
- д) отдельные (неполяризованные) всплески III и V типов и U-всплески, связанные с пятнами или вспышками.

В качестве количественной характеристики солнечного радиоизлучения можно принять плотность потока f_v , которую обычно выражают в солнечных единицах потока: 10^{-22} Вт/(м² · Гц) около Земли, или видимую температуру T_a , т. е. чернотельную температуру видимого диска, необходимую для создания данной плотности потока.

$$f_v = 2,089 \cdot 10^{-44} T_a v^2 \quad [f_v \text{ в Вт/(м}^2 \cdot \text{Гц)}, T_a \text{ в К}, v - \text{ частота в Гц}]$$

Радиоизлучение спокойного Солнца (другие компоненты исключены)

Диапазон	λ , см	ν , МГц	$\lg T_a$ (в К)		$\lg T_c$ (в К)		T_c / T_a		$\lg f_v$ [в 10^{-22} Вт/(м ² · Гц)]	
			МИНИМУМ солнечных пятен	МАКСИМУМ солнечных пятен	МИНИМУМ солнечных пятен	МАКСИМУМ солнечных пятен	МИНИМУМ солнечных пятен	МАКСИМУМ солнечных пятен	МИНИМУМ солнечных пятен	МАКСИМУМ солнечных пятен
			[1, 3–6]		[1, 3, 7, 9]		[1, 3]		[1, 8]	
м	600	50	5,86	6,02	5,75	5,83	0,78	0,64	-0,41	-0,24
	300	100	5,94	6,04	5,79	5,82	0,74	0,61	+0,26	+0,34
	150	200	5,92	6,04	5,77	5,83	0,73	0,62	0,84	0,98
дм	60	500	5,53	5,74	5,40	5,55	0,72	0,64	1,25	1,46
	30	1 000	5,12	5,34	4,99	5,17	0,75	0,67	1,44	1,66
	15	2 000	4,75	4,93	4,64	4,79	0,78	0,73	1,67	1,85
см	6	5 000	4,33	4,50	4,25	4,40	0,84	0,79	2,05	2,22
	3	10 000	4,10	4,22	4,05	4,15	0,89	0,86	2,42	2,54
	1,5	20 000	3,98	4,04	3,95	4,00	0,93	0,92	2,90	2,96
мм	0,6	50 000	3,83	3,87	3,82	3,86	0,97	0,97	3,55	3,59
	0,3	10^5	3,80	3,81	3,80	3,81	1,00	1,00	4,12	4,13
	0,15	$2 \cdot 10^5$	3,77	3,77	3,78	3,78	1,02	1,02	4,69	4,69
	0,06	$5 \cdot 10^5$	3,75	3,75	3,77	3,77			5,47	5,47

I_v – интенсивность излучения = $2,599 \cdot 10^{-47} T_b v^2$ Вт/м × (минута дуги)² · Гц

T_b – яркостная температура

T_c – яркостная температура в центре диска спокойного Солнца

Величины, которые меняются в течение цикла пятнообразования, приведены (насколько возможно) к условиям минимума ($R = 0$, $A_c = 0$) или максимума ($R = 100$, $A_c = 1650$) солнечных пятен. R – число Вольфа, A_c – соответствующая площадь пятен (в миллионных долях полусферы), A_p – площадь проекции пятен (в миллионных долях диска).

Яркостная температура активной области T_b получена из равенства: площадь поверхности, излучающей радиоволны, равна площади факельного поля.

Поток, связанный с солнечной активностью, всплески и непрерывное излучение

Диапазон	λ , см	ν , МГц	Медленно меняющееся излучение		Типичная шумовая буря	Типичный выброс	Всплески	Всплески непрерывного излучения
			Поток, $R = 100, 10^{-22}$ Вт/(м ² · Гц)	$T_b, 10^6$ К			III	IV
[1, 8, 11–13]					[1, 2]			
					10 ⁻²² Вт/(м ² · Гц)			
м	600	50	0		70	500		
	300	100	0		100	500		
	150	200	0,2	1	70	400	200	
дм	60	500	12	6	5	200	80	
	30	1 000	30	5	0	100	150	120
	15	2 000	59	3		50	100	200
см	6	5 000	76	0,5			120	300
	3	10 000	44	0,1			160	400
	1,5	20 000	16					500
мм	0,6	50 000	10					
	0,3	10 ⁵	50?					
	0,15	2 · 10 ⁵	200?					

Средняя интенсивность «типичной» шумовой бури превышает в течение 10 сут в год при максимуме солнечных пятен.

Интенсивность «типичного» выброса превышает примерно 100 выбросах в год при максимуме солнечных пятен. Время жизни типичного выброса составляет около 10 мин.

Всплески [14]

Всплеск I типа [15]

Ширина полосы частот ≈ 4 МГц = 0,02 ν [16]

Время жизни $\approx 0,5$ с

Всплеск II типа

Ширина полосы частот ≈ 10 МГц

Время жизни ≈ 1 мин

Всплеск III типа [16]

Ширина полосы частот ≈ 10 МГц

Время жизни на одной частоте ≈ 2 с = (200/(ν в МГц)) с

Дрейф частоты $dv/dt = -0,4\nu$ с⁻¹

Точка поворота для U-всплеска, $\nu = 100$ МГц

Всплеск IV типа

Полоса частот $20 \leftrightarrow 20\,000$ МГц

Время жизни ≈ 1 ч

Всплеск V типа

Полоса частот < 500 МГц

Время жизни ≈ 2 мин

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, §81; 2, §92.
2. Kundu M. R., Solar Radio Astronomy, John Wiley, 1965.
3. Reimers D., Astron. Ap., 14, 198 (1971).
4. Wrixon G. T., Hogg D. C., Astron. Ap., 10, 193 (1971).
5. Shimabakuro F. I., Stacey J. M., Ap. J., 152, 777 (1968).
6. Федосеев Л. И., Лубяко Л. В., Кукин Л. М., А. Ж., 44, 1191 (1967).
7. Дубов Э. Е., Sol. Phys., 18, 43 (1971).
8. das Gupta M. K., Sarkar S. K., Sol. Phys., 18, 276 (1971).
9. Staelin D. H. et. al., Sol. Phys., 3, 26 (1968).
10. Tsuchiya A., Sol. Phys., 7, 268 (1969).
11. Noci G., Obs. Ap. Arcetri, Contributions, 199, 1968.
12. Кисляков А. Г., Соломонович А. Е., А. Ж., 40, 229 (1963).
13. Beckman J. E., Clark C. D., Sol. Phys., 16, 87 (1971).
14. Hachenberg O., Landolt-Bornstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965, p. 132.
15. Elgaröy Ö., Ap. Letters, 1, 13 (1967).
16. Elgaröy Ö., Lyngstad E., Astron. Ap., 16, 1 (1972).
- 17*. Железняков В. В., Радиоизлучение Солнца и планет, «Наука», М., 1964.

§ 93. Рентгеновское и ультрафиолетовое излучения Солнца

Можно считать, что рентгеновское и ультрафиолетовое, излучения включают в себя рентгеновские лучи и ионизирующее излучение в далекой ультрафиолетовой области (т. е. $\lambda < 1000 \text{ \AA}$). Однако для удобства в этом параграфе рассматривается все вакуумное ультрафиолетовое излучение ($\lambda < 2000 \text{ \AA}$).

f или f_λ – поток излучения около Земли для спектра с «размазанными» линиями излучения и поглощения (некоторые очень сильные линии излучения исключены и обработаны отдельно).

f' или f'_λ – поток непрерывного излучения около Земли. В области линий излучения, $\lambda < 1400 \text{ \AA}$,

$$f/f' > 1$$

и (f/f') – 1 равно отношению потоков (линии/непрерывный спектр).

В области линий поглощения, $\lambda > 1400 \text{ \AA}$,

$$f/f' < 1$$

и $1 - (f/f') = \eta$ – доля непрерывного излучения, задерживаемого в линиях.

Зависимость от длины волны солнечного потока рентгеновского и ультрафиолетового излучений [1–9]

$\lambda, \text{ \AA}$	$\lg f_\lambda$ (в эрг/(см ² · с · Å))			$\lg f'_\lambda$ [в эрг/(см ² · с · Å)]
	$R = 0$	$R = 100$	F1	
5	-8	-5	-2,5	-7
10	-5	-3,7	-1,9	-4,3
20	-3,6	-2,8	-1,7	-3,7
50	-2,7	-2,1	-2,0	-3,2
100	-2,8	-2,4	-2,4	-3,4
200	-2,2	-1,8		-2,8
500	-3,0	-2,8		-3,6
900		-2,3		-2,3
1000		-3,0		-3,4
1200		-2,8		-3,1
1400		-2,32		-2,6
1600		-1,24		-1,8
1800		-0,46		-0,7
2000		+0,15		+0,6

В таблице приведены данные для следующих случаев:

$R = 0$ – спокойное Солнце при минимуме пятен

$R = \pm 100$ – нормальное Солнце при умеренном максимуме пятен

F1 – вспышка класса 2

В таблицу не включены эмиссии в ярких хромосферных линиях [4]

La 1216 Å $f = 5$ эрг/(см² · с)

He I 584 Å $f = 0,06$ эрг/(см² · с)

He II 304 Å $f = 0,23$ эрг/(см² · с)

Некоторые корональные линии излучения в рентгеновской и ультрафиолетовой областях спектра даны в § 85, где приводится их вклад в поток f .

Чтобы отделить излучение спокойного Солнца f_0 от излучения активных областей f_{AR} , учитывая, что и то и другое меняется в течение цикла солнечной активности [11], определим их следующим образом:

$$\begin{aligned} f_0 &= f_0 (1 + q\bar{R}/100), \\ f_{AR} &= f_0 aR/100, \\ f(R, \bar{R}) &= f_0 (1 + q\bar{R}/100 + aR/100). \end{aligned}$$

Заметим, что компонента Q выражена через усредненное число солнечных пятен R , а компонента AR – через R . Значения величин q и a приведены в таблице в зависимости от T_m (см. § 85) и главной длины волны области λ .

q и *a*

$\lg T_m$ (в К)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0
λ , Å		1500	800	500	250	60	30	20	10	7
<i>q</i>	0,20	0,10	0,06	0,11	0,43	0,85	1,9	5,0	12	25
<i>a</i>	0,40	0,30	0,14	0,19	0,59	1,2	2,8	8,0	34	200

Увеличение к краю диска яркости спокойного Солнца хорошо известно, сделаны некоторые измерения, однако систематические зависимости от T_m , λ и R пока не установлены.

Количественные оценки солнечного спектра в рентгеновской и ультрафиолетовой областях

В § 84 приводятся оценки излучения в линиях и континууме для высокотемпературной астрофизической плазмы в зависимости от меры эмиссии, температуры и длины волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **2**, §82.
2. *Thomas R. J., Teske R. G.*, Sol. Phys., **16**, 431 (1971).
3. *Van Gils J. N., de Graff W.*, Sol. Phys., **2**, 290 (1967).
4. *Allen C. W.*, Space Sci. Rev., **4**, 91 (1965).
5. *Friedman H.*, Rep. Prog. Phys., **25**, 163 (1962).
6. *Neupert W. M.*, Ann. Rev. Astron. Ap., **7**, 121 (1969).
7. *Cuny Y.*, Sol. Phys., **16**, 293 (1971).
8. *Dupree A. K., Reeves E. M.*, Harv. Coll. Obs., TR-17, 1971.
9. *Parkinson W. H., Reeves E. M.*, Sol. Phys., **10**, 342 (1969).
10. *Allen C. W.*, Sol. Phys., **8**, 72 (1969).
11. *Allen C. W., Youssef Sh.*, M. N., **161**, 181 (1973).

Нормальные звезды

§ 94. Величины и соотношения

\mathcal{M}	– масса (\mathcal{M}_\odot – масса Солнца)
\mathcal{R}	– радиус
\mathcal{L}	– светимость – полный выход излучения
L	– поток светового излучения
$\bar{\rho}$	– средняя плотность = $\mathcal{M}/\left(\frac{4}{3}\pi\mathcal{R}^3\right)$
S_p	– 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. $\mathcal{F}_\lambda, \mathcal{F}_\nu$ – 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_λ, f'_λ 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, $v_t = 4,741 \mu/\pi$
$\alpha, \delta, l^{\text{II}}, b^{\text{II}}$	– 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_{λ} , B_{λ} , U_{λ} 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 $\lambda = 5\,500 \text{ \AA}$ и $\lambda = 4\,400 \text{ \AA}$ соответственно.

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

$$\lg (\mathcal{L}_{*} / \mathcal{L}_{\odot}) = 3,4 \lg (\mathcal{M}_{*} / \mathcal{M}_{\odot}) [\text{см. § 100}],$$

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

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

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. A. 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 Sp 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 линии 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 CH
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	B0 I, sgF, cB0
II	Яркие гиганты	B5 II
III	Гиганты	G0 III, gG
IV	Субгиганты	G5 IV
V	Звезды главной последовательности	G0 V, dG
VI	Субкарлик	sdK5
VII	Белые карлики	DA, wA4

В приводимых ниже таблицах спектральный класс Sp 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]

Sp	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 тяжелые 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>Sp</i>		Пары линий, определяющие <i>Sp</i>
O5 ↔	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
		4026 He I / 3934 Ca II
A2 ↔	F5	4030–34 Mn I / 4128–32
		4300 CH/4385
F2 ↔	K	4300 (G-полоса) / 4340 H γ
F5 ↔	G5	4045 Fe I / 4101 H δ
		4226 Ca I / 4340 H γ
G5 ↔	K0	4144 Fe I / 4101 H δ
K0 ↔	K5	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. A. 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			–5,0	–4,7	–4,1	–3,3	+10,2			
B5	–6,9	–6,1	–5,4	–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 Δ ($1/\lambda$).

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_e, 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

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

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)

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

где G_G – относительный коэффициент по гринвичской системе.

Приближенные соотношения:

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

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]					[1, 3-7]			
-0,5	-6,6	-6,6				-6,5			
-0,4	-6,6	-6,5				-5,6			
-0,3	-6,7	-6,4				-3,9	-3,3		
-0,2	-6,8	-6,1	-5,4	-5,1	-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

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]				[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	$(B-V)_0$	$(U-B)_0$	$T_{\text{эф}}$	BC	$M_{\text{бол}}$
		[1, 2, 5, 6, 8, 10, 12, 21, 25, 27, 28]			[1, 2, 25, 26]	
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 последо- ватель- ность	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]

λ , 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., Кунсик 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. Гринстейна, 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	$\lg (M/M_{\odot})$			$\lg (R/R_{\odot})$			$\lg (L/L_{\odot})$			$\lg \bar{\rho}$		
	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		-2,1		-1,2
B5	+1,4		+0,81	+1,5	+1,0	+0,58	+4,8	+2,9		-2,9		-0,78
A0	+1,2		+0,51	+1,6	+0,8	+0,40	+4,3	+1,9		-3,5		-0,55
A5	+1,1		+0,32	+1,7		+0,24	+4,0	+1,3		-3,8		-0,26
F0	+1,1		+0,23	+1,8		+0,13	+3,9	+0,8		-4,2		-0,01
F5	+1,0		+0,11	+1,9	+0,6	+0,08	+3,8	+0,4		-4,5		+0,03
G0	+1,0	+0,4	+0,04	+2,0	+0,8	+0,02	+3,8	+1,5	+0,1	-4,9	-1,8	+0,13
G5	+1,1	+0,5	-0,03	+2,1	+1,0	-0,03	+3,8	+1,7	-0,1	-5,2	-2,4	+0,20
K0	+1,1	+0,6	-0,11	+2,3	+1,2	-0,07	+3,9	+1,9	-0,4	-5,7	-2,9	+0,25
K5	+1,2	+0,7	-0,16	+2,6	+1,4	-0,13	+4,2	+2,3	-0,8	-6,4	-3,4	+0,38
M0	+1,2	+0,8	-0,33	+2,7		-0,20	+4,5	+2,6	-1,2	-6,7	-4	+0,4
M2	+1,3		-0,41	+2,9		-0,3	+4,7	+2,8	-1,5	-7,2		+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)

$\lg (M/M_{\odot})$	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

§ 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

Sp	$\overline{v_e \sin i}$, 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., \mathcal{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	Sp	$T_c, 10^6$ К	$\lg \rho_c$ (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]

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

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

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]

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

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

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)	$\mathcal{L}_r/\mathcal{L}$	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]

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

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]

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

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
$\lg E_{\text{CN}}$ (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 $4,28 \cdot 10^{-5}$ эрг = 26,8 МэВ

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

Для CN цикла $4,00 \cdot 10^{-5}$ эрг = 25,0 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 $\approx 0,91 T_{\text{eff}}$

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

Sp	$\lg P$ (в $\text{дин}/\text{см}^2$)			$\lg P_e$ (в $\text{дин}/\text{см}^2$)			$\lg P_r$ (в $\text{дин}/\text{см}^2$)	$\lg \kappa_5$ (в $\text{см}^2/\text{г}$)	
	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).

Звезды, имеющие особенности

§ 104. Переменные звезды

Все типы переменных собраны в *Каталоге переменных звезд* [2]. В 1971 году были известны следующие числа переменных различных типов:

Пульсирующие переменные

C	классические цефеиды	696
I (L)	неправильные переменные	1687
M	звезды типа Миры Кита	4600
SR	полуправильные переменные	2261
RR	переменные типа RR Лиры	4423
RV	звезды типа RV Тельца	100
β C	звезды типа β Цефея	14
δ Sc	звезды типа δ Щита	12
α CV	звезды типа α^2 Гончих Псов	28

Взрывающиеся переменные

N	новые	}	203
Ne	новоподобные переменные		
SN	сверхновые		7
RCB	звезды типа R Северной Короны		31
RW(I)	звезды типа RW Возничего, Т Тельца		1005
UG	звезды типа U Близнецов		210
UV	звезды типа UV Кита (вспыхивающие)		100
Z	звезды типа Z Жирафа		19

Число *затменных переменных* всех типов равно 4018.

В скобках приводятся более современные обозначения [2].

Большая последовательность переменных звезд включает в себя основные типы пульсирующих переменных и некоторые типы взрывных переменных. Для этих звезд выполняется следующий приближенный закон изменения звездной величины [1]:

$$\Delta m_v \approx 0,5 + 1,7 \lg P,$$

где P – период в сутках, $\Delta m_v = m_{\min} - m_{\max}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 103–107; 2, § 104.
2. Кукаркин Б. В., Паренаго П. П., Ефремов Ю. Н., Холопов П. Н., Общий каталог переменных звезд, т. 1, 2, 3, изд-во АН СССР, М., 1958, 1965, 1971.
3. Кукаркин Б. В., Ефремов Ю. Н., Холопов П. Н. и др., Дополнения к третьему изданию общего каталога переменных звезд, «Наука», М., I – 1971; II – 1974; III – 1976.

§ 105. Цефеиды

Типы цефеид

Обозначения, принятые МАС	Название	Тип населения	Период, сут	$m_v(10)$
C δ	Классические цефеиды (δ Сер)	I	2 \leftrightarrow 40	5,2
RR	Короткопериодические цефеиды (RR Lyr)	Экстремальное II	0,4 \leftrightarrow 1	10
δ Sc	Карликовые цефеиды	Экстремальное I	0,06 \leftrightarrow 0,3	10
CW	Звезды типа W Девы	II	0,08 \leftrightarrow 0,19	8
β C	Звезды типа β Большого Пса, β Цефея	II I	1 \leftrightarrow 50 0,15 \leftrightarrow 0,25	5,3

$$\Delta m = \Delta M = m_{\min} - m_{\max}$$

$$\bar{m} = \frac{1}{2} (m_{\min} + m_{\max})$$

Фаза 0,0 соответствует максимуму блеска.

Средняя кривая колебания блеска цефеид, нормированная с помощью равенства $\Delta m = 1$:

Фаза	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$m - \bar{m}$	-0,50	-0,28	-0,06	+0,09	+0,25	+0,39	+0,48	+0,50	+0,40	+0,06	-0,50

Наблюдается тенденция более медленного спада, более резкого подъема и, следовательно, более позднего минимума для более коротких периодов.

Амплитуды скорости [1, 12, 13]

Классические цефеиды

$$2K = \Delta v = \Delta m_v \cdot 54 \text{ км/с}$$

$$= \Delta m_B \cdot 35 \text{ км/с}$$

Короткопериодические цефеиды

$$2K = \Delta v = \Delta m_B \cdot 64 \text{ км/с}$$

Связь период – плотность для пульсирующих звезд [1, 12]

$$P = Q (\bar{\rho}_{\odot} / \bar{\rho})^{1/2}$$

$$= 1,19 Q \bar{\rho}^{-1/2},$$

где $(\bar{\rho}_{\odot})^{1/2} = 1,19 \text{ (г/см}^3)^{1/2}$, P – период, ρ – средняя плотность звезды. Коэффициент Q слабо зависит от внутреннего строения звезды.

Зависимость физических характеристик цефеид от периода

lg P (сут)	\bar{M}_v	\bar{M}_B	Sp		$\Delta M_v = \Delta M_B$	$\bar{B} - \bar{V}$	$\Delta(B-V)$	lg M/M_{\odot}	lg R/R_{\odot}	lg L/L_{\odot}
			в макси- муме	в мини- муме						
<i>Классические цефеиды [1, 2, 4–6, 8, 10, 16]</i>										
0,4	-2,7	-2,3	F5	F8	0,5	+0,41	0,1	0,65	1,41	3,2
0,6	-3,1	-2,7	F5	GO	0,6	+0,47	0,2	0,70	1,56	3,4
0,8	-3,6	-3,1	F6	G2	0,7	+0,53	0,3	0,75	1,71	3,5
1,0	-4,2	-3,6	F6	G4	0,8	+0,62	0,4	0,80	1,86	3,7
1,2	-4,7	-4,0	F7	G7	0,9	+0,68	0,5	0,85	2,02	3,9
1,4	-5,3	-4,5	F7	KI	1,0	+0,75	0,6	0,95	2,17	4,1
1,6	-5,9	-5,1	F8	K2	1,0	+0,80	0,7	1,0	2,29	4,3
1,8	-6,4									
<i>Короткопериодические цефеиды (типа RR Lyr) [1, 6, 7, 15]</i>										
-0,6	+1,2	+1,4	A5	F1				0,3	0,6	1,7
-0,4	+0,9	+1,1	A5	F2	1,3	+0,2	0,3	0,3	0,7	1,7
-0,2	+0,7	+0,9	A6	F3	0,9	+0,2	0,2	0,4	0,9	1,6
0,0	+0,5	+0,7	A7	F3	0,6	+0,2	0,1	0,4	1,0	1,6
<i>Карликовые цефеиды [1]</i>										
-1,2	+4		A2		0,6	+0,3	0,14			
-1,0	+3		A4		0,6	+0,2	0,14			
-0,8	+2		A7		0,5	+0,2	0,14			
<i>Звезды типа δ Щита [3, 6]</i>										
-0,9	+1,8	+2,1		F3	0,1	+0,32		+0,1		
<i>Звезды типа W Девы [1, 4, 6, 11, 17]</i>										
0,4	-1,0	-0,7	F1	F5	0,6	+0,3	0,1	0,6	1,4	2,4
0,6	-1,4	-1,0	F3	F8	0,6	+0,45	0,2	0,7	1,6	2,6
0,8	-1,7	-1,2	F4	GO	0,7	+0,55	0,3	0,7	1,7	2,8
1,0	-2,0	-1,3	F5	G1	0,7	+0,67	0,3	0,8	1,9	2,9
1,2	-2,4	-1,6	F6	G3	0,8	+0,77	0,4	0,9	2,0	3,1
1,4	-2,8	-2,0	F7	G4	0,9	+0,8	0,5	1,0	2,2	3,3
1,6	-4	-3	F7	G5	1,0	+0,9	0,5	1,0	2,3	3,4
<i>Звезды типа β Смай β Cep [1, 6]</i>										
-0,8	-3,0	-2,7		B2 IV	0,1	-0,3		1,5		3,8
-0,6	-4,5	-4,3		B1 III	0,1	-0,2		1,7		4,2

Наблюдаемые значения Q [12, 14]

Классические цефеиды	$Q = 0,04$ сут
Короткопериодические цефеиды	$Q = 0,12$
Звезды типа W Девы	$Q = 0,16$
Звезды типа β Большого Пса и β Цефея	$Q = 0,03$
Звезды типа δ Щита	$Q = 0,04$

Теоретические значения Q [12, 14]

	$\rho_c/\bar{\rho}$	Q
Гомогенная модель	1	0,116 сут
Политропа, $n = 1,5$ (с конвекцией)	6	0,071
Стандартная модель, $n = 3$	54	0,039
Первоначальная модель Эпштейна	$2 \cdot 10^6$	0,031
Модель с внешней конвекцией	$1 \cdot 10^6$	0,056
Численное соотношение		

$$\lg Q = \lg P + 0,5 \lg g + \lg T_{\text{eff}} + 0,1 M_V + 6,41$$

Изменения радиуса ΔR и ускорение силы тяжести на поверхности g для классических цефеид [5, 9]

$\lg P$ (в сут)	0,4	0,8	1,2	1,6
$\lg (\Delta R/R_\odot)$	1,4	1,7	2,0	2,3
$\lg g$ (в cm/c^2)	2,2	1,8	1,4	1,0

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 103; **2**, § 105.
2. Sandage A., Tammann G. A., Ap. J., **151**, 531 (1968); **157**, 683 (1969); **167**, 293 (1971).
3. McNamara D. H., Augason G., Ap. J., **135**, 64 (1962).
4. Fernie J. D., A. J., **69**, 258 (1964); **72**, 1327 (1967).
5. Opolski A., Acta Astron., **18**, 515 (1968).
6. Beyer M., Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 517.
7. Clube S. V. M., Jones D. H. P., M. N., **151**, 231 (1971).
8. Макаренко Е. Н., А. Ж., **47**, 1215 (1970).
9. Parsons S. B., Bouw G. D., M. N., **152**, 121, 133 (1971).
10. Fernie J. D., Ap. J., **142**, 1072 (1965).
11. Petit M., Ann. d'Ap., **23**, 681, 710 (1960).
12. Ledoux P., Walraven Th., Handb. Phys., **51**, Springer, 1958, p. 353.
13. Eggen O. J., Gascoigne, Burr, M. N., **117**, 406, 430 (1957).
14. Dickens R. J., Penny A. J., M. N., **153**, 287 (1971).
15. Woolley R. v. d. R. et al., Royal Obs. Bull., No. 97, 3 (1965).
16. Rodgers A. W., M. N., **151**, 133 (1970).
17. Demers S., Wehlau A., A. J., **76**, 916 (1971).

§ 106. Долгопериодические переменные (типа Миры Кита)

Долгопериодические переменные (L. P. V.) или звезды типа Миры Кита (M) – это гиганты поздних типов и сверхгиганты [6], обычно имеющие светлые линии в спектре. Сюда также входят углеродные звезды (R, N) и звезды, содержащие тяжелые металлы (S). Они принадлежат к населению диска.

Период колебаний

$$P > 100 \text{ сут}$$

Изменение блеска

$$\Delta M_V = M_{\text{min}} - M_{\text{max}} > 2,5$$

Если $\Delta M_V < 2,5$, переменные обозначаются $M?$ или рассматриваются как полуправильные.

Звездные величины

$$m_V(10) = 5,4$$

Постоянная пульсации [6] (§ 105)

$$Q = 0,056 \text{ сут}$$

Средняя галактическая широта

$$\bar{b} = 20^\circ$$

Распределение долгопериодических переменных L. P. V. по спектральным классам [1]

Sp	K	M	S	R	N
% звезд со светлыми линиями	0,5	73	4	0,2	2,3
% звезд без светлых линий	0,7	13	0,6	0,4	5

Масса $L. P. V.$ [9]

$$\approx M_{\odot}$$

Характеристики, приведенные в таблице, относятся главным образом к максимуму блеска (max). Полный диапазон изменений обозначается через Δ , например, ΔM_V .

Физические характеристики долгопериодических переменных

P , сут	Sp в максимуме [1, 3, 4]	M_V в максимуме	ΔM_V [1-4, 8]	M_{bol}	$\lg (R/R_{\odot})$ [1]	T_{eff} , К		Пространственная скорость км/с [1, 6]
						в максимуме	в минимуме	
100	K6	-1,6	3,2	-3,5	1,9	3800		20
140	M1	-2,2	3,8	-3,9	2,1	3300	3000	80
180	M3	-3,0	4,2	-4,2	2,2	3000	2600	110
220	M4	-2,3	4,5	-4,4	2,3	2900	2500	80
260	M47	-1,9	4,8	-4,6	2,3	2800	2300	60
300	M5	-1,5	4,9	-4,7	2,4	2800	2200	40
400	M6	-0,9	5,1	-5,0	2,5	2600	2000	20
500	M7	-0,6	5,2	-5,5	2,6			10
600	M8	-0,4		-6	2,7			10
200 [7]	R6	-0,2	5	-2	2,0	3000	2400	
300	N0	-1,0	4	-3,5	2,3	2400	1900	
400	N5	-2,0	3	-5	2,7	2100	1800	
300	S, Se	-1,6	7			2500	1900	

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 104; 2, § 106.
2. Clayton M. L., Feast M. W., M. N., **146**, 411 (1969).
3. Osvalds V., Risley A. M., Publ. Leander McCormick Obs., **11**, 147 (1961).
4. Smak J. I., Ann. Rev. Astron. Ap., **4**, 19 (1966).
5. Ledoux P., Walraven Th., Handb. Phys., **51**, Springer, 1958, p. 402.
6. Feast M. W., M. N., **125**, 367 (1963).
7. Gordon C. P., Publ. A. S. P., **80**, 597 (1968).
8. Landolt A. U., Publ. A. S. P., **80**, 450 (1968).
9. Fernie J. D., Brooker A. A., Ap. J., **133**, 1088 (1961).
- 10*. Пульсирующие звезды, под ред. Б. В. Кукаркина, «Наука», М., 1970.
- 11*. Явления нестационарности и звездная эволюция, под ред. А. А. Боярчука, Ю. Н. Ефремова, «Наука», М., 1974.

§ 107. Неправильные и полуправильные переменные

Характеристики неправильных и полуправильных переменных являются в некоторой степени промежуточными между характеристиками цефеид и долгопериодических переменных. Имеется много типов, однако точная классификация не всегда возможна. Фактор $m_V(10)$ указывает звездную величину наиболее ярких звезд данного типа. Во многих случаях период P означает обратную частоту появления.

Характеристики вспыхивающих звезд [6-8]:

Масса $= 0,3 M_{\odot}$

Спектр не во время вспышки, яркость и цвет примерно такие же, как у звезд типа MeV.

Типичное изменение блеска во время вспышки $= 2^m$

Время увеличения блеска $= 1$ мин

Продолжительность вспышки $= 20$ мин

Частота вспышек $= 1$ в сутки

Полная энергия вспышки в видимой области $= 10^{32}$ эрг

В отдельную группу выделяют звезды, связанные с межзвездными облаками и имеющие очень быстрые изменения блеска (Flash Stars) [7].

Типы неправильных и полуправильных переменных [1, 2]

Обозначение	Тип и особенности	Тип населения	Период, сут	Sp	M_V	ΔM_V	$m_V(10)$	b^H
RV	RV Тельца, UU Геркулеса. Неправильные минимумы с меняющейся глубиной	II	75	$G \leftrightarrow K$	-2	1,3	7,4	23°
SR a, b, c, d	Долгопериодические полуправильные, включая μ Цефея, δ Ориона	I – II	100	$G \leftrightarrow M$ N	-1	1,6	5,4	22
I	Неправильные			K M N	-0,5	1,3	5,4	22
RW	T Тельца, RW Возничего. Небулярные и эмиссионные линии в спектре [9]	I экстремальное		FeV \leftrightarrow \leftrightarrow KeV	+5	3	11	14
RCB	R Северной Короны. Внезапные уменьшения блеска	I		G, K, R	-5?	4	10,5	14
UG	SS Лебедя U Близнецов	} Внезапные периодические увеличения блеска	60	B, A	8 \pm 3	3,6	13	25
Z	Z Жирафа CN Ориона		20	F	10 \pm 3	3,2	13,5	22
	SX Центавра. Наложение больших и малых периодов		30 800	F \leftrightarrow M		1,2 2,0	13,5	15
UV	Вспыхивающие звезды, UV Кита [6]	I	1	Me V 2 \leftrightarrow 6	12	2	10,9	

Избранные вспыхивающие звезды [6]

	1950		Sp	V	$B - V$	π	M_V	Интервал изменения m
	α	δ						
UV Cet	01 ^h 36 ^m	-18°13'	M6e	12,95	1,76	0,370"	15,80	6 ^m
YZ CMi	07 42	+03 41	M4,5e	11,35	2,06	0,182	12,66	1,4
AD Leo	10 17	+20 07	M4e	9,43	1,54	0,227	11,05	1,3
WX UMa	11 03	+43 47	M5,5e	14,8	1,2	0,173	16,0	1,8
α Cen C	14 26	-62 28	M5e	10,68	2,72	0,762	15,09	1,1
DO Cep	22 26	+57 27	M4,5e	11,41	1,44	0,249	13,40	1,5
EV Lac	22 45	+44 05	M4,5e	10,05	1,45	0,198	11,53	2
EQ Peg B	23 29	+19 40	M5,5e	12,58	1,19	0,144	13,3	0,4

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 105; 2, § 107.
2. Gaposchkin C. P., Gaposchkin S., Variable Stars, Harvard Mon., 5, 1938.
3. Кукаркин Б. В., Паренаго П. П., Ефремов Ю. И., Холопов П. Н., Общий каталог переменных звезд, т. 1, 2, 3, Изд. АН СССР, М., 1958, 1965, 1971.
4. Bečvář A., Atlas Coeli II, Catalogue, Prague, 1959.
5. Payne-Gaposchkin C., Variable Stars and Galactic Structure, Athlone, 1954.
6. Solomon L. H., Smithsonian Ap. Obs. S. R., No. 210 (1966).
7. Haro G., Bol. Tonanzintla, 2, No. 14, 5 (1956).
8. Haro G., Nebulae and Interstellar Matter, ed. Kuiper, Middlehurst, VII, Chicago, 1968, p. 141.
9. Herbig Q. H., Adv. Astron. Ap., 1, 47 (1962).
- 10*. Гершберг Р. Е., Вспышки красных карликовых звезд, «Наука», М., 1970.

§ 108. Новые и сверхновые

Число галактических новых, наблюдаемых за год, включая повторные новые [1]

$$= 2,2 \text{ новые за год}$$

Полное число новых, вспыхивающих за год в Галактике [2],

$$\approx 40 \text{ во всей Галактике}$$

$$\approx 4 \cdot 10^{-10} \text{ доля среди звезд населения II типа}$$

Спектральный класс остатков новых O, WC, (WC + WN)

Показатель цвета новых вблизи максимума

$$B - V \approx +0,2$$

Типы новых

Обозначения, принятые МАС	Тип	Тип населения [4, 5]	Места вспышек	Число вспышек в одной галактике за год [2, 7–9, 11]	M_{pg}			lg (выделяемая энергия, эрг)	t_3 , сут
					до вспышки	в максимуме	после вспышки		
					[1, 6, 10]				
SN I	Сверхновые I тип	II+I	Галактики	†					
SN II	II тип (варианты см. в [6])	I	Спирали Sb, Sc	0,01				51	30*
N	Новые	II?		0,02	+5	–18,8	+3?	49	70
Nd	Повторные новые			40		–17	+3?	45	40
						–7,7	+4	43	

* Через 40 дней после вспышки сверхновой I типа ее блеск начинает регулярно падать на 1^m за 80 дней.
† Подсчеты относятся к галактикам поздних типов, Sb или Sc [11]. Они пропорциональны массе и светимости рассматриваемой галактики.
 t_3 – время, за которое блеск падает на 3^m от максимального.

Галактические сверхновые [10, 14, 15]

Место вспышки сверхновой	Год вспышки	l^II	b^II	m_{pg} в максимуме	Расстояние, кпс	M	Тип
Центавр?	185	315°	0°				
Телец?	396	173	–22	–3			
Скорпион?	827	0	0	–10			
Волк – Центавр	1006	328	+15		1,3?		I
Телец (Крабовидная туманность)	1054	184	–6	–6	1,8	–18	I?
Кассиопея (Тихо Браге)	1572	120	+1	–4,1	5,0	–18	I
Змееносец (Кеплера)	1604	4	+7	–2,2	7?	–17	I
Кассиопея А [13]	1667	112	–2		3,4		II

Характеристики новой и скорость падения блеска [12]

t_3 (время падения блеска на 3^m), сут	10	30	100	300
Скорость основного выброса v_1 , км/с	1600	900	500	300
Усиленная скорость диффузии v_2 , км/с	2600	1700	1100	700
Скорость расширения сверхновой, км/с	6000			
M_{pg} (в максимуме)	–8,6	–7,6	–6,5	–5,3
m_{pg} (до и после минимума) – m_{pg} (в максимуме)	12	10,5	9	8

Избранные галактические новые [1, 3]

Новая	Год вспышки	l^II	b^II	m			M в максимуме	Sp после вспышки	t_3 , сут
				до максимума	в минимуме	после вспышки			
η Car	1843	287°	–1°		–0,8	7,9	–7,8	pec	3000
V 841 Oph 2	1848	7	+17	>10	3	12,6	–7	O con	300
Q Cyg	1876	90	–8		3,0	14,9	–8,3	Oe	11
T Aur	1891	177	–1	>13	4,0	14,8	–6,2	Oe	120
V 1059 Sgr	1898	22	–9		3	16,5	–8,2		19
GK Per 2	1901	151	–10	13,5	0,2	13,2	–8,3	Oe	12
DM Gem 1	1903	185	+12	>14	5,0	16,5	–8,2	O con	14
DI Lac	1910	103	–5	13,7	4,6	14,3	–7,2	O con	37
DN Gem 2	1912	183	+15	15	3,5	14,6	–8,1	Oe	34
V 603 Aql 3	1918	33	0	10,6	–1,1	10,9	–8,4	Oe	7
HR Lyr	1919	60	+12	16,0	6,5	15,0	–6,8	O con	70
V 476 Cyg 3	1920	87	+13	>15	2,0	16,1	–8,5	Oe	14
RR Pic	1925	271	–25	12,7	1,2	9	–6,1		150
DQ Her	1934	72	+26	14,3	1,4	13,8	–6,2		105
CP Lac	1936	102	–1	15,3	2,1	15,4	–8,2		9
V 630 Sgr	1936	357	–7	14	4,5		–8,5		8
BT Mon	1939	214	–2	16	6	17,6	–5		36
CP Pup	1942	253	–1	17	0,2		–10,5	Oe	8
V 500 Aql	1943	47	–10	>17	6,3	14,4	–6,7		29

Повторные новые [1–3, 15]

Новая	Годы вспышек	l^{II}	b^{II}	Период, годы	m		$m-M$	t_3 , сут
					в максимуме	в минимуме		
U Sco	1866, 1906, 1936	358°	+21°	37	8,9	17,6	16,5	6
T CrB	1866, 1946	42	+48	79	2,1	10,6	10,2	6
T Pux	1890, 1902, 1920, 1944	256	+9	18	6,9	13,7	13,3	113
RS Oph	1898, 1933, 1958	20	+10	35	4,3	11,6	12,8	10
WZ Sge	1913, 1946	58	-8	32	7,3	15,9	14,4	33
V 1017 Sgr	1901, 1919	3	-9	17	7,2	14,2	13,6	130

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 107; **2**, § 108.
2. *Payne-Gaposchkin C.*, Variable Stars and Galactic Structure, Athlone, 1954, p. 56.
3. *Payne-Gaposchkin C.*, Galactic Novae, North-Holland, 1957.
4. *Minkowski R.*, Ann. Rev. Astron. Ap., **2**, 247 (1964).
5. *Arp H. C.*, A. J., **61**, 15 (1956).
6. *Zwicky F.*, Ann. d'Ap., **27**, 300 (1964).
7. *Псковский Ю. П.*, А. Ж., **38**, 656 (1961).
8. *Caswell J. L.*, Astron. Ap., **7**, 59 (1970).
9. *Chai C.-S., van den Bergh S.*, A. J., **75**, 672 (1970).
10. *Katgert P., Oort J. H.*, B. A. N., **19**, 239 (1967).
11. *Tammann G. A.*, Astron. Ap., **8**, 458 (1970).
12. *McLaughlin D. B.*, Ap. J., **91**, 369 (1940); Publ. A. S. P., **57**, 69 (1945).
13. *van den Bergh S., Dodd W. W.*, Nature, **223**, 814 (1969).
14. *Hsi Tsê-tsung*, Smithson. Contr. Ap. Obs., **2**, 109 (1958).
15. *Beyer M.*, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 544.
- 16*. *Псковский Ю. П.*, Новые и сверхновые звезды, «Наука», М., 1974.

§ 109. Звезды Вольфа – Райе и звезды ранних спектральных классов с эмиссионными линиями

Звезды ранних типов с эмиссионными линиями в спектре [1]

Звезда	Тип населения	Sp	M_V	$m_V(10)$	T, K [1, 6]	R/R_{\odot}
			[1–3, 6]			
Ядра планетарных туманностей	II	O	+1	11	50 000	0,4
Звезды Вольфа – Райе (WR)						
азотная последовательность	I	WN	-4,7	8,0	38 000	2
углеродная последовательность		WC	-5,3	8,5	23 000	
Звезды Of	I	Of	-5,7	7,4		
Звезды типа Р Лебеда	I	Be	-4	6,5	27 000	8
Звезды типа α Лебеда	I	Ae	-7	6,5	12 000	60
Звезды Be	I	Be		3,5	20 000	
Звезды с оболочками [7]	I	B, Ae		5		

Подклассы звезд типа WR [2]

	WN		WC	
Подкласс	3 ↔ 5	6 ↔ 8	5 ↔ 7	8 ↔ 9
M_V	-4,2	-6,3	-4,4	-6,2
$B - V$	-0,16	-0,17	-0,21	-0,32

Избранные звезды Вольфа – Райе [2, 3]

HR, BS	Звезда	l^{II}	b^{II}	Sp	V	B-V	M_V [5]
3207	γ^2 Vel	263°	-8°	WC8 + 07	1,82	-0,26	-4,8
4188		287	-1	WN7	6,41	+0,04	-6,8
4210	η Car	288	+1	WN7	-1		-6,8
4952	θ Mus	305	-2	WC6 + B0	5,50	-0,02	-6,4
6249		343	+1	WN7	6,45	+0,30	-6,8
6265		343	+1	WC7 + O8	6,61	+0,30	-5,5

Основные линии в спектрах звезд Вольфа – Райе

В спектрах звезд WN присутствуют линии He, N, в спектрах звезд WC – линии He, O, C

Ион	И.Р., эВ	λ , Å
He I	24,6	5876, 4471, 4026, 3889
He II	54,4	4686, 3203, 5412, 4859, 4542
C II	24,4	4267
C III	47,9	4650, 5696, 4069
C IV	64,5	5805, 3934
N III	47,4	4638, 4525, 4100, 3360
N IV	77,4	3480, 4058
N V	97,9	4609
O III	54,9	3962, 3760, 3708, 3265
O IV	77,4	3730, 3411
O V	113,9	5590, 5114
O VI	138,1	3812, 3835

Доля звезд ранних типов, имеющих эмиссионные линии в спектре

<i>Sp</i> % звезд с эмиссией	O	B0	B2	B5	B8	A0	A2
	13	14	17	6	1	0,1	0,05

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 106, 110; **2**, § 109.
2. *Smith L. F.*, M. N., **138**, 109 (1968); **140**, 409 (1968).
3. *Crampton D.*, M. N., **153**, 303 (1971).
4. *Pyper D. M.*, Ap. J., **144**, 13 (1966).
5. *Baschek B.*, Astron. Ap., **7**, 318 (1970).
6. *O'Dell C. R.*, Ap. J., **138**, 67 (1963).
7. *Underhill A. B.*, The Early Type Stars, Reidel, 1966, p. 231.
- 8*. *Рублев С. В., Черепашук А. М.*, Звезды Вольфа – Райе, в кн. «Явления нестационарности и звездная эволюция», «Наука», М., 1974, стр. 47.

§ 110. Пекулярные А-звезды и магнитные звезды

К пекулярным А-звездам относятся звезды следующих типов [3, 7, 8]:

Ap или **α CVn** Звезды, имеющие anomalно интенсивные и переменные линии ,Mn Si, Cr, Sr, Eu, спектрально-переменные; магнитные и магнитно-переменные звезды

Am Звезды, в спектре которых особенно хорошо развиты линии металлов по сравнению с линиями H и Ca⁺

Звезды типов Ap и Am можно объединить в отдельную группу медленно вращающихся звезд классов B2 ↔ F2, IV, V [4].

Цвет, спектр и звездная величина

<i>B – V</i>		0,00	0,10	0,20	0,30
<i>Спектр</i> [8]	Ap	A0	A3	A6	F0
	Am		A1	A3	A6
	Am		A6	F0	F5
<i>U – B</i> [8]	Ap	–0,04	+0,07	+0,09	
	Am		+0,11	+0,13'	+0,11
<i>M_V</i> [4, 8]	Ap	+0,6	+1,2	+1,4	+1,6
	Am		+1,5	+2,0	+2,6

Скорость вращения

Обычно $v \sin i < 50$ км/с и не зависит от спектрального класса.

Магнитные поля [2, 5–7]

Порядок величины напряженности магнитного поля 1000 Гс

Максимальное значение напряженности 34 000 Гс

Магнитное поле обнаруживается у большинства А-звезд, имеющих скорость вращения < 10 км/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 2, § 110.
2. von Klüber H., Landolt-Börnstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965, p. 564.
3. Cowley A. et al., A. J., 74, 375 (1969).
4. van den Heuvel E. P. J., B. A. N., 19, 326 (1968).
5. Preston G. W., Ap. J., 164, 309 (1971).
6. Babcock H. W., Ap. J., 132, 521 (1960).
7. Ledoux P., Reason P., Ann. Rev. Astron. Ap., 4, 293 (1966).
8. Hack M., Vistas in Astron., ed. Beer, 7, 107 (1966).
- 9*. Пикельнер С. Б., Хохлова В. Л., Усп. физич. наук, 107, вып. 3 (1972).

§ 111. Звезды пониженной светимости

Типы звезд, более слабых, чем звезды главной последовательности

Типы звезд	Тип населения	<i>Sp</i>	Понижение блеска относительно главной последовательности
Белые карлики, плотные вырожденные звезды			
1-я последовательность, включая Гиady [2]	I	B ↔ G	9 ^m
2-я последовательность, включая «пигмеи» [3]	I, II	A ↔ K	10 ^m
Субкарлики, звезды с высокими скоростями	II	F ↔ M	1,4 ^m
Слабые голубые звезды, ультрафиолетовые карлики [4], включая ядра планетарных туманностей	II	O, B	5 ^m

Средние физические характеристики белых карликов [5, 6]

Последовательность	$\lg M/M_{\odot}$	$\lg R/R_{\odot}$	$\lg \rho$ (в г/см ³)	$\lg g$ (в см/с ²)	M_V	<i>Sp</i>	Содержание H, %	Молекулярный вес
1	0,0	-1,85	5,7	8,1	11,2	DA	70	1,2
2	-0,4	-2,03	5,8	8,1	13,5	DF	0	2,2

Точно определить спектральный класс белого карлика обычно невозможно [5]. Спектры без видимых линий обозначаются как ВС. Буква *s* означает резкие линии.

Зависимость физических характеристик белых карликов от B – V

<i>B – V</i>		-0,2	0,0	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8	+1,0
<i>U – B</i> [3]		-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	-0,0	
M_V	1 посл.	10,4	11,2	11,6	11,9	12,2		
	[1, 2, 8, 9] 2 посл.	11,7	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,2
<i>Sp</i>		DB	DA	DA	DF	DG	DK	
Масса		Нет заметных различий						
Радиус		Нет заметных различий						
M_{bol} [5]	1, 2 посл.	8,1	10,5	12,0	13,6	15,3		
T_{eff} , К		25 000	14 000	9 700	6 600	4 500		

Избранные белые карлики [1, 5, 9]

Звезда	1950		μ''	π , 0,001"	<i>Sp</i>	<i>V</i>	M_V	<i>B – V</i>	$\lg M/M_{\odot}$	$\lg R/R_{\odot}$
	α	δ								
Ван Маанена [2]	0 ^h 46 ^m	+5° 10'	3,01	237	DG	12,36	14,24	+0,56	-0,2	-1,91
L870–2	1 35	-5 14	0,67	65	DA _s	12,83	11,89	+0,33	-0,16	-1,89
40 (=O ₂) Eri B	4 13	-7 44	4,07	201	DA	9,50	11,01	+0,03	-0,44	-1,77
Сириус B	6 43	-16 39	1,32	376	DA	8,4	11,3	+0,4	-0,01	-1,6
He3 = Ci ₂₀ 398	6 44	+37 36	0,95	61	DA	12,03	10,95	-0,07	-0,3	-1,83
Процион B	7 37	+5 22	1,25	291	DF	10,8	13,1	+0,5	-0,37	-1,9
L532–81	8 40	-32 47	1,69	103	DA _s	11,8	11,9	+0,05	-0,2	-1,94
R627	11 22	+21 39	1,00	81	DF	14,24	13,8	+0,30	-0,18	-2,0
L770–3	16 15	-15 28	0,25		DA	13,4	10	-0,2	-0,32	-1,84
W1346	20 32	+24 53	0,66	72	DA	11,53	10,8	-0,07	-0,4	-1,79
L1512–34B	23 44	+32 15	0,22	49	DA	12,89	11,3	+0,17	-0,09	-1,9

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 108; 2, § 111.
2. Eggen O. J., Ap. J., **157**, 287 (1969).
3. Eggen O. J., Sandage A., Ap. J., **148**, 911 (1967).
4. Stothers R., A. J., **71**, 943 (1966).
5. Weidemann V., Landolt-Börnstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965, p. 575.
6. Паренго П. П., А. Ж., **33**, 340 (1956).
7. Terashita Y., Matsushima S., Ap. J., **156**, 203 (1969).
8. Strand K. Aa., p. 18; Gliese W., p. 35 in White Dwarfs, I. A. U. Symp., **42** Reidel, 1971.
9. Luyten W. J., Adv. Astron. Ap., **2**, 199 (1963).
10. Greenstein J. L., Ap. J., **169**, 563 (1971).
- 11*. Гринштейн Дж., Спектры звезд, лежащих ниже главной последовательности, в кн. «Звездные атмосферы», под ред. Дж. Гринштейна, ИЛ, М., 1963, стр. 668.
- 12*. Racoš A., Astr. Ap., **34**, 157 (1974).

§ 112. Двойные звезды

Из семи ближайших звездных систем, включая Солнце, пять по крайней мере двойные (бинарные), одна имеет планетную систему и одна, по-видимому, простая. У многих звезд могут быть слабые спутники, которые невозможно обнаружить. Статистические данные о двойных и кратных звездах могут сильно зависеть от таких невидимых спутников. Двойные звезды подразделяются на следующие типы:

Визуальные двойные

Спектрально-двойные

Затменные переменные (которые являются также спектрально-двойными)

Доля двойных звезд, определенная по каталогам близких звезд [2]

Визуальные двойные	25 % независимо от спектрального типа
Спектрально-двойные	25 % звезд ранних типов
	10 % звезд поздних типов

Если учесть необнаружимые компоненты [3], двойственность станет почти независимой от выбора звезд и от спектрального типа.

На 100 звездных систем приходится

одиночных звезд	30 систем	30 компонент
двойных звезд	47 „	94 „
кратных звезд	23 „	81 „
всего	100 „	205 „

Отсюда двойственность звезд равна $1,05 = 105\%$.

Двойственность в зависимости от большой полуоси a орбит двойных систем [2, 3]

$\lg a$ (в а.е.)	-1,5	-0,5	+0,5	+1,5	+2,5	+3,5	
Двойственность, %	3	12	14	21	30	17	3

Эксцентриситет орбиты двойной звезды и орбитальный период P [1, 3, 4]

$\lg P$ (в сут)	0	1	2	3	4	5	6	7
Средний эксцентриситет	0,03	0,17	0,31	0,42	0,47	0,45	0,64	0,8
	затменные,			спектрально-двойные		визуально-двойные		

Визуальные двойные

Теоретическое разрешение телескопом двойных звезд (правило Дауэса)

$$= 4,6''/7D_{in}, \text{ где } D_{in} - \text{ диаметр объектива в дюймах}$$

$$= 11,6''/D_{cm}, \text{ где } D_{cm} - \text{ диаметр объектива в сантиметрах}$$

Предельное разрешение при наилучших наземных условиях видимости

$$= 0,1''$$

Максимальное угловое расстояние ρ между компонентами, которые могут образовать физически связанную пару,

$$\lg \rho = 2,8 - 0,2m_V [\rho \text{ в секундах дуги}]$$

Избранные яркие спектрально-двойные системы [6]

1 – более яркая звезда
2 – более слабая звезда

e – эксцентриситет, i – наклонение орбиты

Звезда	BS №	1900		V	$Sp \frac{1}{2}$	P	e	$K, \frac{1}{2}$ км/с	$M_1 M_2 \sin^3 i \frac{1}{2}$
		α	δ						
ζ Phe	388	01 ^h 04 ^m	-55° 47'	3,94	B6 V A0 V	1,67 ^d	0,03	121,4 247	6,02 2,96
4 β Tri	622	02 04	+34 31	3,00	A5 III	31,4	0,53	33,3 69,2	1,43 0,69
γ Per	915	02 58	+53 07	2,92	gG0 A2	5350	0,72	12,7 21,9	4,72 2,74
σ Per	1131	03 38	+31 58	3,83	B1 III	4,42	0,04	109,3 159,4	5,25 3,60
41v Eri	1347	04 14	-34 03	3,55	B9	5,01	0,01	63,7 64,8	0,56 0,55
i Ori	1899	05 30	-05 59	2,76	O8 III O9	29,14	0,76	115,2 195,8	15,9 9,4
β Aur	–	05 52	+44 56	1,90	A2 IV A2 IV	3,96	0,0	107,5 111,5	2,20 2,12
σ Leo	3852	09 36	+10 21	3,50	F5 A3	14,5	0,0	54,0 63,1	1,30 1,12
ρ Vel	4167	10 33	-47 42	3,85	F4 IV F4 V	10,2	0,56	43,3 53,6	0,30 0,24
η Vir	4689	12 15	-00 07	3,90	A0 V	71,9	0,34	30,5 43,7	0,35 0,24
ζ^2 UMa	5054	13 20	+55 27	2,29	A2 V	20,54	0,54	68,8 67,6	1,67 1,64
α Vir	5056	13 20	-10 38	0,96	B2 V B3 V	4,01	0,16	117,2 193,6	7,51 4,52
ζ Cen	5231	13 49	-46 48	2,54	B2 VI	8,02	0,5	110,7 159,4	6,4 4,4
T CrB	5958	15 55	+26 13	2,0	gM3 Nd § 108	227,6	0,06	24,0 33,5	2,91 2,08
β Sco	5984	16 00	-19 32	2,63	B0 V	6,83	0,28	129,0 215,2	16,0 9,6
μ Sco	6247	16 45	-37 53	3,0	B1 V B	1,45	0,0	185 280	9,1 6,0
ϵ Her	6324	16 56	+31 04	3,92	A0 V	4,02	0,02	70,7 112,0	1,55 0,98
β Lyr	7106	18 46	+33 15	3,3	B8p	12,91	0,02	185	
θ Agl	7710	20 06	-01 07	3,21	B9 III B9	17,12	0,61	51,0 63,7	0,75 0,60
31 σ^1 Cyg	7735	20 10	+46 26	3,80	K4 I B4	3784	0,22	14,0 20,8	9,2 6,2
32 σ^2 Cyg	7751	20 12	+47 24	3,98	K5 B8	1141	0,27	16,6 47	21 7,6
β Cap	7776	20 15	-15 06	3,08	G0 B8	1374	0,42	21,9 20,0	4,35 4,77
α Equ	8131	21 11	+04 50	3,90	F8 A3	97,56	0	19,1 4,9	0,03 0,11

Медианные периоды и эксцентриситеты [1, 4]

Sp	O	B	A	F	G	K	M
Медианный период в сутках							
Главная последовательность	5	4	5	6	10	10	10?
Гиганты				20	100	500	3000
Все звезды	7	6	5	9	80	200	240
Эксцентриситет							
Период 0 → 1 сут		0,04		0,02		0,02	
0 → 10 »		0,08		0,06		0,03	
10 → 100 »		0,17		0,28		0,13	
100 → 1000 »		0,35		0,44		0,29	
больше 1000 »		–		0,4		0,6	

Постоянные для определения большой полуоси орбиты и массы спектрально-двойной звезды [1, 4]

$$a_1 \sin i = 0,01375 K_1 P (1 - e^2)^{1/2} \quad (\text{аналогично для } a_2, K_2),$$

$$(\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2) \sin^3 i = 1,035 \cdot 10^{-7} (1 - e^2)^{3/2} (K_1 + K_2)^3 P,$$

где большая полуось a_1 (или a_2) – в 10^6 км, а полная масса $\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2$ – в \mathcal{M}_\odot . Полуамплитуды лучевой скорости K_1 и K_2 – в км/с, период P – в сутках.

Распределение отношений масс в спектрально-двойных системах [1, 4]

$\lg \mathcal{M}_1/\mathcal{M}_\odot$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
% от общего числа	60	19	13	6	2	

Затменные переменные

Доля спектрально-двойных звезд, которые являются также затменно-переменными

$$= 9\%.$$

Классификационные схемы [1, 4]

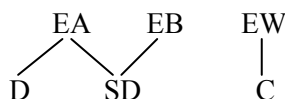
I. По степени эллиптичности компонент

EA	типа Алголя	Почти сферические компоненты
EB	типа β Лиры	Эллипсоидальные компоненты неодинаковой яркости
EW	типа W Большой Медведицы	Эллипсоидальные компоненты одинаковой яркости
	$P < 1$ сут	

II. По устойчивости внутри эквипотенциальной поверхности (пределы Роша). Если компонента достигает эквипотенциальной поверхности, она теряет массу.

D	Разделенная	Обе компоненты полностью находятся внутри эквипотенциальной поверхности
SD	Полуразделенная	Одна компонента достигает эквипотенциальной поверхности
C	Контактная	Обе компоненты достигают эквипотенциальной поверхности

Связь между различными типами



Связь между P , M_V и Sp

Медианный P , сут	2,5	0,36
Медианная M_V	+0,2	+4,0
Sp	$B \rightarrow G$	$F \rightarrow G$

Элементы затменно-двойных систем [10]

Звезда Переменная	HD	P , сут	Разделе- ние R_{\odot}	Sp 1 2	$\frac{M}{M_{\odot}}$ 1 2	$\frac{R}{R_{\odot}}$ 1 2	M_{bol} 1 2	m_v	Расстояние, пс
<i>Разделенные системы</i>									
σ Aql	185 507	1,95	15,2	B8 B9	6,8 5,4	4,2 3,3	-1,9 -0,9	5,1	137
WW Aur	46 052	2,52	11,9	A7 F0	1,92 1,90	1,92 1,90	+1,7 +2,0	5,7	77
AR Aur	34 364	4,13	18,5	B9 A0	2,55 2,30	1,82 1,82	+0,3 +0,6	5,5	100
YZ Cas	4 161	4,47	19,4	A3 F5	3,3 1,6	2,75 1,49	+0,4 +3,1	5,6	90
AR Cas	221 253	6,07	34,8	B3 A0	11,9 3,0	7,1 2,3	-4,8 +0,2	4,7	350
α CrB	139 006	17,36	41,9	A0 G6	2,5 0,89	2,9 0,87	-0,1 +5,4	2,3	22
AR Lac	210 334	1,98	9,1	G5 gK0	1,32 1,31	1,54 2,86	+3,8 +3,4	6,5	48
U Oph	156 247	1,68	12,8	B5 B6	5,30 4,65	3,4 3,1	-2,4 -1,9	5,9	310
VV Ori	36 695	1,49	16,0	B1 B5	18 6,1	6,2 3,0	-5,3 -2,1	5,1	500
RS Sgr	167 647	2,42	10,1	B5 A5	1,4 0,94	3,2 2,6	-2,2 +0,7	6,1	250
<i>Полуразделенные системы</i>									
R CMa	57167	1,14	3,8	F0 gG9	0,49 0,11	1,06 0,97	+3,3 +5,5	5,9	33
RZ Cas	17 138	1,20	6,4	A0 gG1	1,80 0,63	1,53 1,80	+0,9 +3,4	6,3	90
U Cep	5 697	2,49	12,6	B8 gG8	2,9 1,4	2,4 3,9	-0,6 +2,3	6,8	180
u Her	156 633	2,05	15,0	B3 B8	7,9 2,8	4,5 4,3	-3,8 -2,1	4,7	260
δ Lib	132 742	2,33	11,6	A0 gG2	2,6 1,1	3,5 3,5	-0,8 +2,2	4,8	100
β Per (Алголь)	19 356	2,87	15,7	B8 gK0	5,2 1,01	3,57 3,76	-1,0 +2,7	2,2	27
V Pup	65 818	1,45	16,2	B1 B4	16,6 9,8	6,0 5,3	-5,1 -3,9	4,5	400
U Sge	181 182	3,38	19,5	B9 gG2	6,7 2,0	4,1 5,4	-1,4 +1,2	6,4	250
V 505 Sgr	187 949	1,18	7,2	A1 gF8	2,33 1,21	2,27 2,26	+2,7 +0,3	6,5	145
λ Tau	25 204	3,95	16,1	B3 A3	2,3 0,92	3,4 4,8	-3,2 -0,9	3,8	132
TXU Ma	93 033	3,06	13,7	B8 gG3	2,8 0,85	2,16 3,79	-0,4 +2,1	6,9	180
<i>Контактная система</i>									
W UMa	83 950	0,33	2,5	F8 F7	1,30 0,65	1,11 0,79	+4,1 +4,7	7,8	67

Период вращения и спектральный тип [1, 11]

В таблице приведены основные интервалы без учета нескольких исключительных случаев. Наименьший период определяется контактом между компонентами. Период P – в сутках

Тип	Sp						
	O	B	A	F	G	K	M
EA		2 ↔ 20	0,8 ↔ 30	0,7 ↔ 30	0,6 ↔ 10	0,5 ↔ 5	
EB	7	1 ↔ 7	0,5 ↔ 2	0,5 ↔ 2	0,6 ↔ 10		
EW			0,6 ↔ 1,3	0,4 ↔ 0,7	0,3 ↔ 0,6	0,26 ↔ 0,5	
Наименьший период P	3	1,0	0,4	0,27	0,20	0,13	0,10

ЛИТЕРАТУРА

1. A Q. **1**, § 109; **2**, § 112.
2. Woolley R. et al., Royal Obs. Bull., Greenwich, No. 166 (1971).
3. Heintz W. D., J. R. A. S. Canada, **63**, 275 (1969).
4. Herczeg T., Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 501.
5. van de Kamp P., Handb. Phys., **50**, 187 (1958); A. J., **64**, 236 (1959).
6. Batten A. H., Publ. Dom. Ap. Obs., **13**, No. 8, 119 (1967).
7. Jaschek C., Jaschek M., Publ. A. S. P., **69**, 546 (1967).
8. Wilson R. E., General Catalogue of Stellar Radial Velocities, Carnegie Publ., No. 601, 1953.
9. Pedoussant A., Ginestet N., Astron. Ap. Supp., **4**, 253 (1971).
10. Kopal Z., Shapley M. B., Jodrell Bank Ann., **1**, 141 (1956).
11. Struve O., Stellar Evolution, Princeton, 1950. (Русский перевод: Струве О., Эволюция звезд, ИЛ, М., 1954.)
- 12*. Затменные переменные звезды, под ред. В. П. Цесевича, «Наука», М., 1971.

§ 113. Пульсары

Измеряемые характеристики пульсаров

$$\begin{aligned}
 P & - \text{период} & f & = 1/P \\
 \dot{P} & - \text{скорость увеличения периода} \\
 W_e & - \text{ширина импульса} \\
 \nu & - \text{частота радиоизлучения} \\
 \Delta t & - \text{запаздывание сигнала} \\
 DC & - \text{постоянная дисперсии} \\
 & & & = -\Delta t/\Delta (1 - v^2) \\
 DM & - \text{мера дисперсии} & & = \int N_e dl \text{ (см}^{-3} \cdot \text{пс)} \\
 T & - \text{характерное время} & & = P/\dot{P} \\
 E & - \text{энергия одного пульсара} \\
 & & & DM \text{ (см}^{-3} \cdot \text{пс)} = 2,41 \cdot 10^{-16} DC \text{ (Гц)} [1, 2]
 \end{aligned}$$

Медианный период пульсаров $\bar{P} = 0,66 \text{ с}$

Медианная галактическая широта $\bar{b} = 7^\circ$

В таблице периоды P даны с точностью $\pm 10^{-7}$ с, однако периоды многих пульсаров известны с точностью $\pm 10^{-11}$ с. Эпоха для периодов приблизительно 1969. Ширина импульса W_e и энергия в импульсе E_{400} определены для частоты $\nu \approx 400 \text{ МГц}$.

Параметры пульсаров [2, 3]

PSR	α	δ	l^{II}	b^{II}	$P, \text{ с}$ 1969	$P, 10^{-15}$	$T, 10^6 \text{ лет}$ [1]	$DM, \text{ см}^{-3} \cdot \text{пс}$	$W_e, 10^{-3} \text{ с}$ [2]	$10^{-28} E_{400}, \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$ [2]	Расстояние, пс [3,4]
CP	03 ^h 29 ^m	+54°	145,0°	-01,2°	0,7145187	2,05	11	26,8	8,7	120	500
NP	05 31	+21 *	184,6	-05,8	0,0330976	422,69	0,0025	56,8	1,9	1,6	1700
CP	08 09	+74	140,0	+31,6	1,2922413	0,16	250	5,8	45	10	130
PRS	08 33	-45 **	263,6	-02,8	0,0892093	125,26	0,23	69,2	1,7	40	400
CP	08 34	+06	219,7	+26,3	1,2737635	6,80	5,9	12,9	17	10	400
CP	09 50	+08	228,9	+43,7	0,2530650	0,23	34	3,0	9,5	6	60
CP	11 33	+16	241,9	+69,2	1,1879112	3,73	10	4,8	18	12	130
HP	15 08	+55	91,3	+52,3	0,7396779	5,04	4,6	19,6	13	4	>600
PSR	17 49	-28	1,5	-01,0	0,5625532	8,15	2,2	50,9	6	50	1000
CP	19 19	+21	55,8	+03,5	1,3373011	1,35	32	12,4	25	19	250
JP	19 33	+16	52,4	-02,1	0,3587354	6,00	1,9	158,5	6,5	4	3000
AP	20 16	+28	68,1	-04,0	0,5579534	0,15	120	14,2	14	10	300
PSR	20 45	-16	30,5	-33,1	1,9615669	10,96	5,6	11,5	42	12	400

* В крабовидной туманности.

** Паруса X.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hewish A., Ann. Rev. Astron. Ap., **8**, 265 (1970).
2. Manchester R. N., Taylor J. H., Ap. Letters, **10**, 67 (1972). (Русский перевод: Нейтронные звезды и пульсары, изд-во «Мир», М., 1973.)
3. Prentice A. I. R., ter Haar D., M. N., **146**, 423 (1969).
4. Gunn J. E., Ostriker J. P., Ap. J., **160**, 979 (1970).

Типы звездного населения и окрестности Солнца

§ 114. Ближайшие звезды

Ниже приводится список 100 ближайших звезд или компонент кратных звезд, причем невидимые спутники и спектрально-двойные звезды отдельно не названы. Обозначения звезд взяты, как правило, из разных каталогов, для каждой звезды даны по возможности два обозначения. Номера без букв взяты из Дрэперовского каталога HD, подобные обозначения, но начинающиеся с широты в градусах, – из Боннского обозрения BD, Кордобского обозрения CD и т. п. Приведены также распространенные обозначения. Положение звезд определяется координатами α и δ (1950). Большая часть информации взята из Каталога ближайших звезд издания 1969 года [2].

V , $B - V$, $R - I$ – стандартные звездные величины и показатели цвета, μ – собственное движение, π – параллакс, v_r – лучевая скорость (знак + соответствует движению от Солнца), M – масса, R – радиус. В столбце Sp использованы следующие обозначения: D – белые карлики, VI – субкарлики. Большинство остальных звезд находится на главной последовательности. Многие слабые звезды типа M имеют эмиссионные линии, но это не указано.

В примечаниях даны угловое расстояние между компонентами (например, AB 24"); элементы орбиты: P – период, a – большая полуось для орбиты вторичной компоненты относительно главной (например, AB $P = 44$ года, $a = 2,4$ "); невидимые компоненты, для которых иногда приводятся период P и масса M (например: невидимая компонента, $P = 4,8$ года, $M = 0,008$); указаны спектрально-двойные (например, A сп. дв.) или тройные (тр.) звезды, а также вспыхивающие звезды (например, В всп.).

100 перечисленных видимых компонент входят в 72 звездные системы, следовательно, видимая двойственность равна 1,39. Параллаксы приведенных звезд $\pi > 154 \cdot 0,001''$, поэтому все они находятся внутри сферы с радиусом 6,5 пс.

Пропущенная звезда [6]:

G158–27, $0^h04^m -7^\circ48'$, $\pi = 0,226''$, $\mu = 2,06''$ в год, $m = 13,8$.

См. таблицу на стр. 209–211.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 111; 2, § 113.
2. Gliese W., Veröffentlichungen der Rechen-Inst., Heidelberg, No. 22 (1969).
3. Gray D. F., A. J., 73; 769 (1968).
4. O'Leary B. T., Icarus, 5, 419 (1966).
5. van de Kamp P., Publ. A. S. P., 81, 5 (1969).
6. van de Kamp P., Ann. Rev. Astron. Ap., 9, 103 (1971).
7. Woolley R. et al., Royal Obs. Ann., No. 5, Herstmonceux, 1970

§ 115. Самые яркие звезды

Список содержит 100 визуально наиболее ярких звезд. В случае кратных звезд данные относятся ко всей системе в целом или к главной звезде.

Фотометрические данные определены в стандартной системе U, B, V , а спектральный класс Sp дан в системе МКК (иногда сглажен усреднением), μ – собственное движение. Расстояние d определено по параллаксу π , если $\pi > 0,030''$, и по спектральному классу светимости, если $\pi < 0,015''$. Значения расстояний бывают усреднены. v_r – лучевая скорость, со знаком +, если расстояние увеличивается (красное смещение).

В примечаниях указаны переменность, двойственность и т. п. Многие системы сложные, и относящиеся к ним указания не полные. Оптическая двойственность не отмечена.

- пер. – переменная
непр. пер. – неправильная переменная
дв., тр., ч. – двойная, тройная, четырехкомпонентная система, обычно визуальная

- сп.-дв. – спектрально-двойная
 затм. – затменно-переменная
 астр. – астрометрическая

Периоды P выражены в сутках или годах, угловое расстояние между компонентами дано в секундах дуги.

Предельная звездная величина для 100 самых ярких звездных систем

$$V = 2,59.$$

См. таблицу на стр. 212–214.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 112; **2**, § 114.
2. *Hoffleit D.*, Catalogue of Bright Stars, Yale, 1964.
3. *Blanco V. M. et al.*, Publ. U. S. Naval Obs., **21** (1968).
4. *Lesh J. R.*, Ap. J. Supp., **17**, 151, 371 (1968).
5. *Prentice A. J. R., ter Haar D.*, M. N., **146**, 423 (1969).

§ 116. Типы звездного населения

Звезды и другие объекты сначала разделяются на два типа населения [2], а затем на пять подразделений [3]. В таблице на стр. 215 приведены основные объекты, звезды и характеристики разных типов и подразделений.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 113; **2**, § 115.
2. *Baade W.*, Ap. J., **100**, 137, 147 (1944).
3. *Oort J. H. et al.*, Stellar Populations, ed. O'Connell, Vatican Obs., 1958, pp. 414, 533.
4. *Blaauw A.*, Galactic Structure, ed. Blaauw, Schmidt, Chicago, 1965, p. 435.
5. *King I. R.*, Publ. A. S. P., **83**, 377 (1971).

§ 117. Числа звезд

N_m – число на квадратный градус звезд ярче величины m , m может быть фотографической ($pg \approx B$) или визуальной ($vis \approx V$) звездной величиной.

A_m – число на квадратный градус звезд, яркость которых заключена в пределах $m + \frac{1}{2} \leftrightarrow m - \frac{1}{2}$.

Приведенные значения N_m (pg) почти на 0,1 dex больше, чем соответствующие значения в [6], хотя были использованы одни и те же источники.

Зависимость N_m от галактической широты вблизи плоскости Галактики ($b < 20^\circ$) можно выразить формулой

$$\lg N_m = \lg N_m(0^\circ) - cb,$$

в которой символы имеют следующие числовые значения:

m	5	10	15	20
c	0,014	0,016	0,024	0,031
$\lg N_m(0) pg$	-1,3	+1,0	+3,1	+4,7
$\lg N_m(0) vis$	-1,1	+1,2	+3,4	+5,0

Для звезд ранних спектральных типов с эмиссией [5]

$$m \approx 12, \quad \lg N_m(0) = -0,9, \quad c = 0,11.$$

Свет звезд от всего неба [1, 7]

- = 230 звезд нулевой фотографической звездной величины
- = 580 звезд 1-й величины
- = 460 звезд нулевой визуальной величины
- = 1160 звезд 1-й величины

Средний вековой параллакс (за год)

$$= 4,2 \times (\text{годовой параллакс}).$$

См. таблицы на стр. 216–218.

Ближайшие звезды [1, 2]

Звезда	1950		V	$B-V$	$R-I$	M_V	Sp	μ сек. дуги за год	π , 0,001"	v_r , км/с	M/M_\odot	R/R_\odot	Примечания	
	α	δ												
-37° 15 492; 225 213		0 ^h 02 ^m	-37° 36'	8,63	1,45	0,92	10,39	M4V	6,09	225	+23			
+43° 44; 1 326	A	0 15	+43 44	8,07	1,56	0,88	10,32	M1 V	2,90	282	+13		} А сп.-дв., АВ $P = 3000$ лет } 44"; В всп.	
» »	B	»	»	11,04	1,80	1,22	13,29	M6 V	»	»	+20			
β Hvi; 2 151		0 23	-77 32	2,79	0,62	0,23	3,80	G1 IV	2,25	159	+23	1,66		
η Cas; 4614	A	0 46	+57 33	3,45	0,57	0,22	4,60	G0 V	1,11	170	+9	0,85	0,84	} АВ $P = 480$ лет, $a = 12''$ } невид. комп. $M = 0,01$
» »	B	»	»	7,51	1,39	0,59	8,66	M0 V	»	»	+13	0,52	0,07	
v. Maanen; Wolf 28		0 46	+5 09	12,37	0,56	-	14,26	DG	2,97	236	+54			
L726-8	A	1 36	-18 13	12,45	-	1,70	15,27	M5	3,36	367	+29	0,044		} АВ $P = 100$ лет, $a = 4''?$ } В всп.
UV Cet	B	»	»	12,95	-	-	15,8	M6	»	»	+32	0,035		
τ Cet; 10 700		1 41	-16 12	3,50	0,72	0,26	5,72	G8 VI	1,91	276	-16		1,04	
L1 159-16		1 57	+12 50	12,27	1,80	-	13,91	M8	2,08	212	-			всп.
82 Eri; 20 794		3 17	-43 16	4,26	0,71	0,28	5,29	G5	3,12	161	+87			
ϵ Eri; 22 049		3 31	-9 38	3,73	0,88	0,30	6,13	K2 V	0,98	303	+16		0,98	
σ^2 (40) Eri; 26 965	A	4 13	-7 44	4,43	0,82	0,31	5,99	K1 V	4,08	205	-43	0,8		} АВ 82" } ВС $P = 248$ лет, $a = 6,9''$
-7° 781; 26 976	B	»	»	9,53	0,03	0,83	11,09	DA	4,11	»	-21	0,43	0,018	
» »	C	»	»	11,17	1,68	-	12,73	M4	»	»	-45	0,21	0,43	
AC + 58 25001	A	4 26	+58 53	11,09	1,64	-	12,51	M4	2,37	192	-			
AC + 58 25002	B	»	»	12,44	0,31	-	13,86	-	»	»	-			
Картеус; -45° 1 841		5 10	-45 00	8,81	1,56	0,77	10,85	M0	8,81	256	+245			
-3° 1 123; 36 395		5 29	-3 41	7,97	1,47	0,85	9,12	M1 V	2,23	170	+11			
Ross 47; AC + 12 1 800-213		5 39	+12 29	11,60	1,65	1,27	12,75	M6 VI	2,37	168	+103			
LP 658-2		5 53	-4 08	14,52	1,06	-	15,62	DK	2,37	166	-			
-21° 1 377; 42 581		6 08	-21 51	8,13	1,50	0,82	9,33	M1 V	0,74	174	+4			
Ross 614	A	6 27	-2 46	11,17	1,74	1,39	13,16	M7	0,99	250	+24	0,14		} АВ $P = 16,5$ года } $a = 0,98''$
»	B	»	»	14	-	-	16	-	»	»	»	0,08		
Сириус; 48 915	A	6 43	-16 39	-1,46	0,00	-0,12	1,42	A1 V	1,33	377	-8	2,31	1,8	} АВ $P = 50,1$ года } $a = 7,5''$
»	B	»	»	8,68	-	-	11,56	DA	»	»	»	0,98	0,022	
Wolf 294; AC + 33 25644		6 52	+33 20	9,90	1,60	1,09	11,3	M4	0,85	168	+36			
Ross 986; AC + 38 23616		7 07	+38 38	11,48	1,71	1,39	12,62	M5	1,08	169	+39			
+5° 1 668; Luyten		7 25	+5 23	9,82	1,56	1,19	11,98	M5	3,74	268	+26			
Процион; 61 421	A	7 37	+5 21	0,37	0,42	0,14	2,64	F5 V	1,25	286	-3	1,77	1,7	} дв.? } АВ $P = 40,6$ года } $a = 4,5''$
» »	B	»	»	10,7	-	-	13,0	DF	»	»	»	0,63	0,01	
YZ CMi; Ross 882		7 42	+3 41	11,20	4,59	1,40	12,29	M4	0,61	165	+18			всп.

Продолжение

Звезда	1950		V	$B-V$	$R-I$	M_V	Sp	μ сек. дуги за год	π , 0,001"	v_r , км/с	M/M_\odot	R/R_\odot	Примечания
	α	δ											
L97-12	7 ^h 53 ^m	-67° 38'	14,34		-	15,5	D	2,05	173	-			
L674-15	8 10	-21 24	13,8		-	15,0	M	0,73	171	-			
+53° 1 320; 79 211	A 9 11	+52 54	7,62	1,38	0,68	8,72	M0 V	1,68	166	+11			} АВ $P=1000$ лет } $a=19''$
+53° 1 321; 79 210	B »	»	7,72	1,34	0,69	8,82	M0 V	1,70	»	+10			
+50° 1 725; 88 230	10 08	+49 42	6,59	1,36	0,60	8,32	K7 V	1,45	219	-26			
+20° 2 465	10 17	+20 07	9,43	1,54	1,12	10,98	M4 V	0,49	203	+11			невид. комп. $P=26$ лет, $a=0,11''$, всп.
Wolf 359	10 54	+7 19	13,53	2,01	1,85	16,68	M8	4,71	429	+13			невид. комп. $P=8$ лет, $a=0,03''$, $M=0,02$
+36° 2 147; 95 735	11 01	+36 18	7,50	1,51	0,91	10,49	M2 V	4,78	401	-84	0,35		
+44° 2 051	A 11 03	+43 47	8,77	1,55	0,82	10,12	M2 V	4,54	186	+65			} АВ 28" } В всп.
WX UMa	B »	»	14,53		1,72	15,88	M8	»	»	»			
L145-141	11 43	-64 33	11,44	0,19	-	13,01	DA	2,68	206	-			
AC + 79° 3 888	11 45	+78 58	10,94	-	1,18	12,38	M4 VI	0,89	195	-117			
Ross 128	11 45	+1 06	11,10	1,76	1,30	13,50	M5	1,37	301	-13			
Wolf 424	A 12 31	+9 18	13,16	1,80	1,62	14,98	M6	1,75	230	-5			} АВ $a=0,7''$
»	B »	»	13,4	-	-	15,2	M7	»	»	»			
+ 15° 2 620; 119 850	13 43	+15 10	8,50	1,43	0,85	10,02	M4 V	2,30	205	+15			
Проксима Центавра	C 14 26	-62 28	11,05	1,97	1,65	15,45	M5	3,85	762	-16	0,1		} AC 7 849"; всп. } АВ $P=79,9$ года, $a=17,6''$
-11° 3 759	14 32	-12 19	11,36	1,65	1,28	12,38	M4	0,69	160	-			
α Cen; 128 620	A 14 36	-60 38	-0,01	0,68	0,22	4,35	G2 V	3,68	745	-22	1,1	1,23	} ближайшая звездная система
»	B »	»	1,33	0,88	0,24	5,69	K5 V	»	»	-	0,89	0,87	
-20° 4 125; 131 977	A 14 55	-21 12	5,78	1,10	0,42	7,06	K5 V	2,04	180	+26			} АВ 20" гипербол. } $a=5,6''$
-20° 4 123 »	B »	»	7,93	1,50	0,89	9,21	M2 V	»	»	+26			
-40° 9 712	15 29	-41 06	10,1		1,05	11,2	M4	1,55	169	-			
-12° 4 523	16 28	-12 32	10,2	1,60	1,20	12,10	M5	1,18	249	-13			сп. дв.
Wolf 629	D 16 53	-8 14	11,70	1,70	1,22	12,73	M4 VI	1,19	161	+22			D сп. дв. AD 72" } АВ $P=1,7$ года, $a=0,22''$
-8° 4 352; Wolf 630	A 16 53	-8 15	9,76	1,62	1,08	10,79	M4	1,18	161	+19	0,38		} АВ всп } AC 221"
»	B »	»	9,8			10,8	M5	»	»	»	0,38		
VB 8	C »	»	16,66	2,05		17,69		»	»	»			
+45° 2 505; 155 876	A 17 11	+45 45	9,96	1,49	1,08	10,91	M3	1,59	155	-21	0,31		} АВ $P=13,0$ лет } $a=0,7''$
» Fu 46 »	B »	»	10,33			11,28		»	»	»	0,25		
-26° 12 026; 155 886	A 17 12	-26 32	5,06	0,86	0,31	6,38	K1 V	1,24		-1			} АВ $P=600$ лет, $a=14''?$ } AC 732"
36 Oph; 155 885	B		5,09			6,41	K1 V	1,23	184	0			
-26° 12 036; 156 026	C 17 13	-26 29	6,24	1,16	0,44	7,66	K5 V	1,22	184	-1			
-46° 11 540	17 25	-46 51	9,36	1,53	1,03	11,03	M4	1,10	216	-			

Продолжение

Звезда	1950		V	B-V	R-I	M _V	Sp	μ сек. дуги за год	π, 0,001"	v _r , км/с	M1. M ₀	R1. R ₀	Примечания
	α	δ											
-44° 11 909	17 ^h 33 ^m	-44° 17'	11,2			12,8	M5	1,16	213	-			
+68° 946; A0e 17 415-6	17 37	+68 23	9,15	1,50	1,10	10,79	M4 V	1,32	209	-22			невид. комп. $a = 0,1''$, $M = 0,026$
L205-128; UC 48	17 42	-57 17	12,9			14,0	M	1,71	170	-			
Barnard; +4° 3 561	17 55	+4 33	9,54	1,74	1,23	13,25	M5 V	10,31	552	-108			невид. комп. $P = 25$ лет, $M = 0,0016$
+2° 3 482; 70 Oph	A 18 03	+2 31	4,22	0,86	0,30	5,67	K0 V	1,12	195	-7	0,92		A сп. или невид. дв.?
165 341; 70 Oph	B »	»	6,0	-	-	7,45	K5 V	»	»	-10	0,69		AB $P = 88$ лет, $a = 4,5''$
+59° 1 915; 173 739	A 18 42	+59 33	8,90	1,54	1,07	11,15	M4	2,30	283	0	0,4		AB $P = 453$ года, $a = 17''$
» Σ 2 398; 173 740	B »	»	9,69	1,59	1,14	11,94	M5	2,28	»	+10	0,4		
Ross 154; AC - 242 833-183	18 47	-23 53	10,6	-	1,30	13,3	M4	0,72	345	-4			всп
+4° 4 048; 180 617	A 19 14	+5 06	9,12	1,50	1,00	10,31	M4 V	1,46	173	+33			
VB10	B 19 15	+5 05	17,38	2,12	-	18,57	M5	1,49	»	»			AB 74"
L347-14	19 17	-45 37	13,7	-	-	14,9	M7	2,94	175	-		0,84	
σ Dra; 185 144	19 32	+69 35	4,69	0,80	0,29	5,92	K0 V	1,83	176	+27			
Альгаир; 187 642	19 48	+8 44	0,76	0,22	0,02	2,24	A7 V	0,66	197	-26			
σ Pav; 190 248	20 04	-63 19	3,55	0,76	0,23	4,76	G6 V	1,65	175	-22			
-36° 13 940; 191408	A 20 08	-36 14	5,32	0,87	0,34	6,56	K3 V	1,65	177	-130			AB 7"
» »	»	»	11,5	-	-	12,7	M5	»	»	»			
-45° 13 677; 191 849	B 20 10	-45 19	7,97	1,41	0,73	9,04	M0 V	0,78	164	-30			
61 Cyg; 201 091	A 21 05	+38 30	5,22	1,17	0,47	7,58	K5 V	5,21	294	-64	0,63		AB $P = 700$ лет, $a = 25''$
» ; 201 092	B »	»	6,03	1,37	0,60	8,39	K7 V	»	»	»	0,6		невид. комп. $P = 4,8$ года $M = 0,008$
-39° 14 192; 202 560	21 14	-39 04	6,67	1,38	0,69	8,75	M0 V	3,46	260'	+21			
-49° 13 515; 204 961 -	21 30	-49 13	8,67	1,46	0,93	10,32	M1 V	0,81	214	+8			
ε Ind; 209 100	22 00	-57 00	4,68	1,05	0,40	7,00	K5 V	4,69	291	-40			
Krüger 60; 239 960	A 22 26	+57 27	9,85	1,62	1,15	11,87	M3	0,86	253	-26	0,27	0,51	AB $P = 45$ лет, $a = 2,4''$
D0 Cep »	B »	»	11,3	1,8	-	13,3	M4	»	»	»	0,16		A невид. комп. $M = 0,01$ B всп.
L789-6	22 36	-15 36	12,18	1,96	1,66	14,60	M7	3,26	303	-60			
+43° 4 305	22 45	+44 05	10,2	1,6	1,15	11,65	M4	0,83	194	-2			всп.
-15° 6 290; Ross 780	22 51	-14 31	10,17	1,60	1,22	11,77	M5	1,15	207	+9			
-36° 15 693; 217 987	23 03	-36 08	7,36	1,46	0,85	9,59	M2 V	6,90	279	+10			
+19° 5 116	A 23 20	+19 40	10,38	1,56	1,13	11,33	M4	0,55	155	-1			AB $P = 178$ лет, $a = 3,9''$
»	B »	»	12,4	-	-	13,4	M6	»	»	-4			A или B всп.
Ross 248	23 39	+43 55	12,29	1,92	1,56	14,80	M6	1,59	317	-81			
1° 4 774	23 47	+2 08	8,69	1,48	0,87	10,19	M2 V	1,37	175	-65			

Наиболее яркие звезды [1–5]

Звезда	1950		V	$B - V$	$U - V$	M_V	Sp	μ 0,001" за год	d , пс	v_r , км/с	Примечания	
	α	δ										
Альферац	α And	0 ^h 06 ^m	+28° 49'	2,03	-0,10	-0,39	-0,9	B9p	211	39	-12 пер.	дв. 76", сп.-дв. 96,7 сут
Шаф	β Cas	0 06	+58 52	2,26	+0,34	+0,10	+1,5	F2 IV	555	14	+12	сп.-дв. 27 сут
	α Phe	0 24	-42 35	2,39	+1,08	+0,87	+0,2	K0 III	443	28	+75 пер.	астр. дв. 0,07", сп.-дв. 3849 сут
Шедар	α Cas	0 38	+56 16	2,22	+1,17	+1,13	-1,0	K0 II-III	58	45	-4	
	β Cet	0 41	-18 16	2,04	+1,02	+0,87	+0,7	K1 III	234	18	+13	пер.
	γ Cas	0 54	+60 27	2,59	-0,22	-1,07	-3,9	B0e IV	27	190	-7	непр. пер., дв. 2"
Мирак	β And	1 07	+35 21	2,06	+1,62	+1,96	+0,1	M0 III	211	23	0	пер.
Полярная	α UMi	1 49	+89 02	2,3	+0,6	-4,6	F8 Ib	46	240	-17 пер.	пер. 4 сут, сп.-дв. 30 лет	
Ахернар	α Eri	1 36	-57 29	0,48	-0,18	-0,67	-2,2	B5 IV-V	98	39	+19 пер.	
Альмак	γ And	2 01	+42 05	2,13	+1,20	+0,92	-2,2	K3 II	69	75	-12	дв. 10"
Хамаль	α Ari	2 04	+23 14	2,00	+1,15	+1,12	+0,2	K2 III	242	23	-14	пер.
Мира	α Cet	2 17	-3 12	2,0	+1,7	-1,0	M6e III	233	40	+64 пер.	пер. 332 сут	
Менкар	α Cet	3 00	+3 54	2,52	+1,64	+1,95	-0,7	M2 III	75	45	-26	
Алголь	β Per	3 05	+40 46	2,2	-0,1	-0,3	-0,3	B8 V	7	32	+4 пер.	пер., дв. 1,8 года, затм. сп. тр. 3 сут, 2 года
Мирфак	α Per	3 21	+49 41	1,80	+0,48	+0,39	-4,3	F5 Ib	35	160	-2	пер.
Альдебаран	α Tau	4 33	+16 25	0,85	+1,53	+1,89	-0,7	K5 III	203	21	+54	пер., дв. 31", 122", 2"
Капелла	α Aur	5 13	+45 57	0,08	+0,79	+0,45	-0,6	G8 + F	436	14	+30 пер.	пер., сп.-дв. 105 сут
Ригель	β Ori	5 12	-8 15	0,11	-0,03	-0,67	-7,0	B8 Ia	1	250	+21 пер.	пер., дв. 9", сп.-дв. 10 сут
Беллатрикс	γ Ori	5 22	+6 18	1,63	-0,22	-0,87	-3,3	B2 III	16	93	+18	пер.
Эльнат	β Tau	5 23	+28 34	1,65	-0,13	-0,49	-2,0	B7 III	178	55	+8	
Минтака	δ Ori	5 29	-0 20	2,19	-0,21		-6,1	O9,5 II	2	460	+17 пер.	дв. 33", сп.-дв. 5,7 сут
Арнеб	α Lep	5 31	-17 51	2,58	+0,22	+0,22	-4,7	F0 Ib	6	300	+25	
Альнилам	ε Ori	5 34	-1 14	1,70	-0,19	-1,04	-6,7	B0 Ia	0	470	+26	
Альнитак	ζ Ori	5 38	-1 58	1,79	-0,21	-1,06	-6,4	O9,5 Ib	5	450	+18	пер., дв. 3"
	κ Ori	5 45	-9 41	2,05	-0,18	-1,03	-6,8	B0,5e I	5	560	+21	пер.
Бетельгейзе	α Ori	5 52	+7 24	0,8	+1,86		-6	M2 I	29	200	+21 пер.	пер., сп.-дв. 5,8 года
Менкалинан	β Aur	5 56	+44 57	1,90	+0,03		-0,2	A2 V	51	27	-18 пер.	пер., затм. сп.-дв 3,96 сут
Мирцам	β CMa	6 20	-17 56	1,98	-0,24	-0,99	-4,5	B1 II	4	200	+34 пер.	сп. пер. 0,25 сут, 42 сут
Канопус	α Car	6 23	-52 40	-0,73	+0,16		-4,7	F0 Ib	25	60	+21	
Альхена	γ Gem	6 35	+16 27	1,93	0,00	+0,03	-0,4	A0 IV	66	31	-13 пер.	сп.-дв. 2175 сут
Сириус	α CMa	6 43	-16 39	-1,45	0,00	-0,04	+1,41	A1 V	1324	2,7	-8 пер.	дв. 9", 50 лет
Адара	ε CMa	6 57	-28 54	1,50	-0,22	-0,92	-5,0	B2 II	4	200	+27	дв. 8"

Продолжение

Звезда	1950		V	$B-V$	$U-V$	M_V	Sp		μ 0,001" за год	d , пс	v_r , км/с	Примечания	
	α	δ											
Кастор	δ CMa	7 ^h 06 ^m	-26° 19'	1,84	+0,67	+0,50	-7,3	F8	Ia	5	600	+34	
	η CMa	7 22	-29 12	2,42	-0,07	-0,73	-7,0	B5	Ia	8	750	+41	
	α Gem	7 31	+32 00	1,58	+0,04	+0,01	+0,85	A1	M+A	200	14	+4	пер. тр., каждая сп.-дв.
Процион	α CMi	7 37	+5 21	0,35	+0,41	0,00	+2,65	F5	IV	1248	3,5	-3	пер. пер., дв. 4", 41 год, сп.-дв. 40 лет
Поллукс	β Gem	7 42	+28 09	1,15	+1,00	+0,85	+0,95	K0	III	625	11	+3	пер. пер., ближайший гигант
	ζ Pup	8 02	-39 52	2,25	-0,27	-1,11	-7	O5		33	700	-24	
	γ Vel	8 08	-47 11	1,83	-0,26	-0,92	-4	DC7 +	O7	10	150	+35	пер., дв. 41"
	ε Car	8 21	-59 21	1,87	+1,30	+0,27	-3	K0	II + B	29	100	+12	пер.
Аль Сухайль	δ Vel	8 43	-54 31	1,95	+0,04	+0,04	+0,1	A0	V	87	23	+2	тр. 3", 69"
	λ Vel	9 06	-43 14	2,26	+1,69	+1,8	-4,5	K5	Ib	26	200	+18	пер.
	β Car	9 13	-69 31	1,68	0,00	+0,02	-0,4	A0	III	184	26	-5	
	ι Car	9 16	-59 04	2,24	+0,18	+0,11	-4,5	F0	Ib	20	200	+13	пер.
	κ Vel	9 21	-54 48	2,49	-0,20	-0,74	-3,0	B2	IV	12	130	+22	пер. сп.-дв. 117 сут
Альфард	α Hya	9 25	-8 26	1,99	+1,43	+1,73	-0,4	K4	III	34	30	-4	пер.
Регул	α Leo	10 06	+12 13	1,35	-0,11	-0,36	-0,6	B7	V	248	26	+4	пер., тр. 4", 217"
Альгеба	γ Leo	10 17	+20 06	2,1	+1,12	+0,99	-0,5	K0	III	346	33	-37	дв. 619 лет, 2"
Мерак	β UMa	10 59	+56 39	2,37	-0,02	-0,02	+0,5	A1	V	87	24	-12	пер.
Дубхе	α UMa	11 01	+62 01	1,79	+1,06	+0,90	-0,7	K0	III	138	32	-9	пер. пер., дв. 0,6", 44 года
Зосма	δ Leo	11 11	+20 48	2,55	+0,12	+0,10	+0,7	A4	V	202	24	-21	
Денебола	β Leo	11 47	+14 51	2,14	+0,09	+0,07	+1,58	A3	V	510	13	0	пер.
Фекда	γ UMa	11 51	+53 58	2,43	0,00	+0,01	+0,5	A0	V	94	25	-13	пер.
	γ Crv	12 13	-17 16	2,59	-0,11	-0,35	-2,0	B8	III	162	85	-4	пер.
Акрукс	α Cru	12 24	-62 49	0,9	-0,26	-0,96	-3,5	B2	IV	43	80	-7	пер. пер. дв. 5", каждая сп.-дв.
	γ Cru	12 28	-56 50	1,64	+1,60	+1,75	-2,5	M3	II	273	70	+21	пер.
	γ Cen	12 39	-48 41	2,16	-0,02	0,00	-0,5	A0	III	197	40	-8	пер. дв. 0,9", 85 лет
	β Cru	12 45	-59 25	1,26	-0,24	-1,00	-4,7	B0	III	49	150	+20	пер. пер. 0,25 сут
Алиот	ε UMa	12 52	+56 14	1,78	-0,02	+0,01	-0,2	A0p		114	25	-9	пер. сп. пер. 5 сут, 4 года
Мицар	ζ UMa	13 22	+55 11	2,09	+0,03		0,0	A2	V	128	27	-9	пер. тр., 14", сп.-дв. 20 сут
Спика	α Vir	13 23	-10 54	0,96	-0,23		-3,4	B1	V	52	80	+1	пер. пер. затм. сп.-дв. 4 сут
	ε Cen	13 37	-53 13	2,30	-0,23	-0,92	-3,6	B1	V	34	150	+6	
Алкайд	η UMa	13 46	+49 34	1,86	-0,19	-0,68	-1,6	B8	V	122	45	-11	пер.
	ζ Cen	13 52	-47 03	2,54	-0,24	-0,90	-3,5	B2	IV	76	160	+7	пер. сп.-дв. 8 сут
	β Cen	14 00	-60 08	0,60	-0,23	-0,98	-5,0	B1	II	35	120	-11	пер. дв. 1,2"
Арктур	θ Cen	14 04	-36 08	2,06	+1,02	+0,84	+1,0	K0	IV	738	17	+1	
	α Boo	14 13	+19 27	-0,06	+1,23	+1,26	-0,2	K2p	III	2285	11	-5	пер.

Продолжение

Звезда	1950		V	$B - V$	$U - V$	M_V	Sp		μ 0,001" за год	d , пс	v_r , км/с	Примечания	
	α	δ											
	η Cen	14 ^h 32 ^m	-41° 56'	2,34	-0,21	-0,80	-3,0	B2	V	49	120	0 пер.	пер. тр. 5,6", 0,1"
	α Cen	14 36	-60 38	-0,1	+0,7	+4,3	+4,3	G2	V	3675	1,33	-24 пер.	тр. 80 лет, 2,2"
	α Lup	14 39	-47 10	2,31	-0,22	-0,88	-2,5	B2		33	90	+7 пер.	
Ицар	ε Boo	14 43	+27 17	2,39	+0,96	+0,70	-0,2	K1	III, A	50	35	-17	тр. 3,6", 178". сп.-дв.
Кохаб	β UMi	14 51	+74 22	2,07	+1,46	+1,78	-0,5	K4	III	33	32	+17	пер.
Гемма	α CrB	15 33	+26 53	2,23	-0,02	+0,5	+0,5	A0	V	154	23	+2 пер.	пер. сп.-дв. 17,4 сут, 2,8 сут
Дшубба	δ Sco	15 57	-22 29	2,32	-0,11	-0,91	-4,0	B0	V	33	180	-14 пер.	
Акраб	β Sco	16 03	-19 40	2,52	-0,08	-0,83	-3,8	B0,5	V	27	180	-7 пер.	пер. тр. 14", 1", сп.-дв
Антарес	α Sco	16 26	-26 19	1,0	+1,81		-4,7	M1	Ib	30	130	-3 пер.	пер. 1733 сут, дв. 3"
	ζ Oph	16 34	-10 28	2,56	+0,02	-0,86	-3,8	O9,5	V	22	190	-19 пер.	
	α TrA	16 43	-68 56	1,93	+1,43	+1,50	-0,3	K4	III	43	28	-4	
	ε Sco	16 47	-34 12	2,29	+1,15	+1,16	+0,7	K2	III-IV	664	21	-3	пер.
	η Oph	17 08	-15 40	2,44	+0,05		+0,8	A2	V	96	21	-1	дв. 1", 88 лет
	λ Sco	17 30	-37 04	1,62	-0,22	-0,90	-3,4	B1	V	32	100	0 пер.	сп.-дв. 5,6 сут
	θ Sco	17 34	-42 58	1,87	+0,40	+0,15	-4,5	F0	Ib	12	160	+1	
Рас-Альхаг	α Oph	17 33	+12 36	2,07	+0,15	+0,09	+0,8	A5	III	261	18	+13	пер.
	κ Sco	17 39	-39 00	2,41	-0,22	-0,89	-3,3	B2	IV	30	140	-10 пер.	
Этамин	γ Dra	17 55	+51 30	2,22	+1,52	+1,87	-0,6	K5	III	26	36	-28	пер.
Каус Аустралис	ε Sgr	18 21	-34 25	1,83	-0,02	-0,10	-1,5	B9	IV	137	50	-11	
Вега	α Lyr	18 35	+38 44	0,04	0,00	0,00	+0,5	A0	V	345	8,1	-14	пер.
Нунки	σ Sgr	18 52	-26 22	2,08	-0,20	-0,74	-2,5	B2	V	60	80	-11	
Альтаир	α Aql	19 48	+8 44	0,77	+0,22	+0,07	+2,3	A7	V	658	5,0	-26	
	α Pav	20 22	-56 54	1,93	-0,20	-0,72	-2,9	B3	IV	87	90	+2 пер.	пер. сп.-дв 11,8 сут
Садр	γ Cyg	20 20	+40 06	2,23	+0,67	+0,53	-4,7	F8	Ib	1	250	-8	
Денеб	α Cyg	20 40	+45 06	1,25	+0,09	-0,23	-7,3	A2	Ia	3	500	-5 пер.	пер.
	ε Cyg	20 44	+33 47	2,46	+1,03	+0,86	+0,6	K0	III	482	23	-10 пер.	
Альдерамин	α Ser	21 17	+62 22	2,43	+0,23	+0,11	+1,5	A7	IV-V	157	16	-10 пер.	
	ε Peg	21 42	+9 39	2,41	+1,55	+1,66	-4,6	K2	Ib	26	250	+5	пер. дв. 144"
	α Gru	22 05	-47 12	1,74	-0,14	-0,46	+0,2	B5	V	195	21	+12	пер.
	β Gru	22 40	-47 09	2,2	+1,6		-2,5	M3	II	134	90	+2	пер.
Фомальгаут	α PsA	22 55	-29 53	1,16	+0,09	+0,08	+1,9	A3	V	367	7,0	+7	
Шеат	β Peg	22 01	+27 49	2,54	+1,66		-1,4	M2	II-III	234	60	+9	непр. пер.
Маркаб	α Peg	23 02	+14 56	2,49	-0,04	-0,04	-0,1	B9,5	III	71	33	-4 пер.	пер.

Типы звездных населений [1, 4]

	Население I типа		Население II типа		
	экстремальное	старое	старый	промежуточное	гало
Принадлежность	Новые системы		Старые системы		
Объекты	Газ (межзвездный) Пыль, частицы Диффузные туманности Отражательные туманности		Планетарные туманности		Шаровые скопления
	Рассеянные скопления		Галактические ядра		Эллиптические галактики
	Спиральные рукава		Неправильные рукава		
Звезды	Сверхгиганты	Солнце Гигант G ↔ M Звезды главной последовательности Ближайшие звезды		Звезды с высокими скоростями	
	Звезды с высоким содержанием металлов		Звезды с низким содержанием металлов		Звезды с очень низким содержанием металлов
		Звезды с сильными линиями в спектре	Звезды со слабыми линиями в спектре		
	Классические цефеиды		Переменные типа RR Лирь $P < 0,4$ сут		Переменные типа RR Лирь $P > 0,4$ сут
				Звезды типа w Девы	
	Звезды типа T		Долгопериодические переменные, $P < 250$ сут		
	Тельца		Переменные типа RV Тельца (низкие скорости) (высокие скорости)		
		Карлики типа Me	Новые		
			Белые карлики ?		
Физические характеристики					
\bar{z} , пс	120	160	400	700	2000
\bar{v}_z , км/с	8	10	16	25	75
Отношение осей пространственного распределения	100	50	20	5	2
Распределение	Очень неравномерное	Неравномерное	Равномерное		
Центральное ядро	Маленькое		Хорошо выраженное		
Возраст, 10^9 лет	< 0,1	0,1 ↔ 1,5	1,5 ↔ 5	5 ↔ 6	> 6
Полная масса, $10^9 M_{\odot}$	3	10	40	40	20
M_V наиболее ярких объектов		-8		-3	
Тяж. элементы/H	0,04	0,02	0,01	0,004	0,001

Зависимость N_m (pg) от галактической широты b [1–4]
 $\lg N_m$ (pg)

m_{pg}	Галактическая широта b									Среднее $0^\circ \leftrightarrow 90^\circ$
	0°	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 20^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 90^\circ$	
0,0		-4,0			-4,3			-4,4		-4,25
1,0		-3,4			-3,75			-3,9		-3,70
2,0		-2,83			-3,20			-3,3		-3,18
3,0		-2,32			-2,69			-2,8		-2,60
4,0	-1,75	-1,83	-1,88	-2,01	-2,16	-2,25	-2,30	-2,32	-2,40	-2,11
5,0	-1,28	-1,36	-1,43	-1,56	-1,69	-1,76	-1,80	-1,83	-1,89	-1,63
6,0	-0,82	-0,90	-0,97	-1,10	-1,22	-1,29	-1,34	-1,37	-1,42	-1,14
7,0	-0,39	-0,46	-0,53	-0,66	-0,77	-0,84	-0,89	-0,92	-0,97	-0,69
8,0	+0,05	-0,01	-0,09	-0,22	-0,32	-0,40	-0,45	-0,48	-0,54	-0,25
9,0	0,52	+0,43	+0,35	+0,22	+0,12	+0,04	-0,01	-0,06	-0,12	+0,19
10,0	+0,97	+0,88	+0,80	+0,66	+0,54	+0,46	+0,40	+0,35	+0,27	+0,62
11,0	1,43	1,33	1,23	1,08	0,96	0,87	+0,80	+0,75	+0,66	+1,05
12,0	1,88	1,77	1,65	1,50	1,37	1,26	+1,19	+1,12	+1,03	+1,46
13,0	2,30	2,19	2,07	1,90	1,76	1,64	+1,54	+1,47	+1,39	+1,87
14,0	2,72	2,61	2,48	2,28	2,12	1,98	+1,88	+1,79	+1,71	+2,26
15,0	+3,12	+3,00	+2,88	+2,65	+2,46	+2,31	+2,20	+2,10	+1,97	+2,62
16,0	3,48	3,41	3,24	3,00	2,77	2,61	2,48	2,38	2,24	+2,98
17,0	3,83	3,78	3,60	3,33	3,07	2,84	2,75	2,64	2,48	+3,33
18,0	4,20	4,10	3,93	3,63	3,35	3,14	2,99	2,87	2,72	+3,64
19,0	4,5	4,4	4,3	3,9	3,6	3,4	3,2	3,1	2,9	+3,90
20,0	+4,7	+4,7	+4,6	+4,2	+3,8	+3,6	+3,4	+3,3	+3,1	+4,17
21,0	5,0	4,9	4,8	4,5	4,0	3,7	3,6	3,4	3,2	+4,4

Зависимость N_m (vis) от галактической широты b [1–4]
 $\lg N_m$ (vis)

m_{vis}	Галактическая широта b									Среднее $0^\circ \leftrightarrow 90^\circ$
	0°	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 20^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 90^\circ$	
0,0		-3,9			-4,2			-4,3		-4,1
1,0		-3,3			-3,6			-3,7		-5,56
2,0		-2,7			-3,0			-3,1		-3,00
3,0		-2,14			-2,5			-2,6		-2,43
4,0	-1,55	-1,63	-1,68	-1,81	-1,96	-2,05	-2,10	-2,12	-2,20	-1,90
5,0	-1,08	-1,16	-1,23	-1,36	-1,49	-1,56	-1,60	-1,63	-1,69	-1,41
6,0	-0,60	-0,68	-0,75	-0,88	-1,00	-1,07	-1,12	-1,15	-1,20	-0,93
7,0	-0,16	-0,23	-0,30	-0,43	-0,54	-0,61	-0,66	-0,69	-0,74	-0,46
8,0	+0,29	+0,23	+0,15	+0,02	-0,08	-0,16	-0,21	-0,24	-0,30	+0,00
9,0	+0,78	+0,69	+0,61	+0,48	+0,38	+0,30	+0,25	+0,20	+0,14	+0,45
10,0	+1,25	+1,16	+1,08	+0,94	+0,82	+0,74	+0,68	+0,63	+0,55	+0,91
11,0	1,73	1,63	1,53	1,38	1,26	1,17	1,10	1,05	0,96	+1,34
12,0	2,18	2,07	1,93	1,80	1,67	1,67	1,49	1,42	1,33	+1,76
13,0	2,60	2,49	2,37	2,20	2,08	1,94	1,84	1,77	1,69	+2,17
14,0	3,02	2,91	2,78	2,60	2,44	2,28	2,18	2,09	2,01	+2,56
15,0	+3,42	+3,30	+3,18	+2,95	+2,78	+2,61	+2,50	+2,40	+2,27	+2,94
16,0	3,78	3,71	3,54	3,30	3,09	2,91	2,78	2,68	2,54	+3,29
17,0	4,13	4,08	3,90	3,60	3,37	3,19	3,05	2,94	2,78	+3,64
18,0	4,50	4,40	4,23	3,93	3,65	3,44	3,29	3,17	3,02	+3,95
19,0	4,8	4,7	4,6	4,2	3,9	3,7	3,5	3,4	3,2	+4,20
20,0	+5,0	+5,0	+4,9	+4,5	+4,1	+3,9	+3,7	+3,6	+3,4	+4,5
21,0	5,3	5,2	5,1	4,8	4,3	4,1	3,9	3,7	3,5	+4,7

Относительное число звезд в каждом спектральном классе
(для звезд до $V = 8,5$ в Каталоге HD) [1, 10]

Sp % звезд	O 1	B 10	A 22	F 19	G 14	K 31	M 3
-----------------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	--------

Распределение звезд по интервалам абсолютных звездных величин $M \pm \frac{1}{2}$
среди звезд до данной видимой звездной величины ($m \approx 6$) [1]
% звезд в каждом спектральном классе

	M	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Фотографические измерения, все звезды		1	1	3	7	10	14	18	21	15	6	3	1
Визуальные измерения, Sp	O	3	15	31	37	12	2	0	0	0	0	0	0
	B	3	8	14	22	23	22	7	1	0	0	0	0
	A	4	13	14	8	2	2	16	26	13	2	0	0
	F	1	8	11	7	9	5	2	16	18	18	5	0
	G	1	5	9	11	8	1	11	29	7	9	6	2
	K	0	1	4	12	10	13	31	19	5	2	1	2
	M	3	8	7	3	9	24	29	13	3	1	0	0

$10 + \lg A_m$ и свет звезд

m	Фотографические величины						Визуальные величины	
	$10 + \lg A_m$			свет звезд (в единицах света звезды $m_{pg} = 10$ на кв. град.)			среднее	
							$10 + \lg A_m$	свет звезд (в единицах с $m_v = 10$ на кв. град.)
	$b = 0^\circ$	$b = 90^\circ$	среднее	$b = 0^\circ$	$b = 90^\circ$	среднее		
0			5,7	0,7	0,3	0,5	5,9	0,8
1			6,3	1,3	0,6	0,8	6,5	1,3
2			6,9	2	0,8	1,3	7,14	2,2
3			7,43	3	1,0	1,7	7,69	3,0
4	8,2	7,68	7,92	4,0	1,2	2,1	8,25	4,5
5	8,72	8,18	8,40	5,2	1,5	2,5	8,70	5,0
6	9,19	8,64	8,90	6,1	1,7	3,2	9,15	5,6
7	9,63	9,08	9,33	6,7	1,9	3,4	9,60	6,3
8	10,10	9,50	9,75	7,9	2,0	3,5	10,03	6,8
9	10,58	9,92	10,19	9,6	2,1	3,9	10,47	7,4
10	11,04	10,28	10,62	11,0	1,9	4,1	10,94	8,7
11	11,50	10,63	11,05	12,6	1,7	4,6	11,34	8,7
12	11,94	10,98	11,46	13,8	1,5	4,6	11,77	9,3
13	12,35	11,29	11,86	14,1	1,2	4,6	12,15	8,9
14	12,75	11,57	12,24	14,4	0,9	4,4	12,53	8,5
15	13,15	11,80	12,59	14,1	0,6	3,9	12,91	8,1
16	13,46	12,06	12,94	11,5	0,5	3,5	13,24	6,9
17	13,84	12,28	13,26	11,0	0,3	2,9	13,54	5,5
18	14,2	12,50	13,53	10,0	0,2	2,1	13,84	4,4
19	14,5	12,7	13,71	7,9	0,1	1,3	14,02	2,6
20	14,7	12,8	14,00	5,0	0,1	1,0	14,25	1,8
21	14,9	12,9	14,2	3,1		0,6	14,5	1,2
> 21				5,0		0,8		1,5
Сумма				180	22	61		119

*Интегральный свет звезд (в единицах света звезды
10-й величины на кв. град.) в зависимости
от галактической широты b [1, 7]*

b	Свет звезд	
	pg	V
0°	180	372
5	123	247
10	88	176
15	69	138

b	Свет звезд	
	pg	V
20°	54	105
30	37	71
40	29	54
50	24	43

b	Свет звезд	
	pg	V
60°	21	38
70	19	35
80	18	34
90	18	34

*Средний вековой параллакс как функция видимой звездной величины [1, 8]
(секунды дуги в год)*

V	b		
	0°	30°	90°
4	0,092	0,098	0,113
5	0,064	0,068	0,082
6	0,045	0,048	0,061
7	0,032	0,035	0,047
8	0,023	0,025	0,036
9	0,016	0,020	0,028
10	0,012	0,015	0,023
11	0,009	0,013	0,019
12	0,007	0,011	0,016
13	0,005	0,009	0,013
14	0,004	0,007	0,011
15	0,003	0,006	0,009
16	0,002	0,004	0,007

*Поправочный коэффициент, на который умножается
вековой параллакс звезд различных спектральных классов [8]*

Sp		A	F	G	K
Поправочный коэффициент	$V \approx 6$	0,7	1,5	1,5	1,1
	$V \approx 12$	0,7	1,0	1,2	0,8

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 114; **2**, § 116.
2. *van Rhijn P. J.*, Groningen Publ., No. 43 (1929).
3. *Seares F. H. et al.*, Ap. J., **62**, 320 (1925).
4. *Seares F. H., Joyner M. C.*, Ap. J., **67**, 24 (1928).
5. *Wackerling L. R.*, Mem. R. A. S., **72**, 3, 153 (1970).
6. *Scheffler H., Elsässer H.*, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 601.
7. *Roach F. E., Megill L. R.*, Ap. J., **133**, 228 (1961).
8. *Heintz W. D.*, A. N., **282**, 221 (1955).
9. *Roach F. E., Smith L. L.*, Ap. J., **173**, 343 (1972).
10. Henry Draper Catalogue, Harv. Ann., **91–99**, 1918–1924.

§ 118. Звездная плотность в окрестностях Солнца

Общий предел плотности вещества в окрестностях Солнца (предел Оорта, выведенный из скоростей по координате z) [1–3]

$$= 0,13 \mathcal{M}_{\odot} \text{ пс}^{-3} \quad = 8,8 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3 \\ \approx 4,4 \text{ атом/см}^3$$

Составляющие плотности

Звезды (исключая белые карлики) [1, 4, 8, 13]

$$= 0,044 \mathcal{M}_{\odot} \text{ пс}^{-3} \quad = 3,0 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$$

Белые карлики [5, 6]

$$= 0,02 M_{\odot} \text{ пс}^{-3} \quad (\text{возможно больше}) \\ = 1,4 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$$

Газ (§ 126)

$$= 0,018 M_{\odot} \text{ пс}^{-3} \\ = 1,2 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3 \\ = 0,6 \text{ атом/см}^3$$

Пыль, частицы (§124)

$$= 0,0013 M_{\odot} \text{ пс}^{-3} \\ = 0,09 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$$

Полная известная плотность

$$= 0,083 M_{\odot} \text{ пс}^{-3} \\ = 5,6 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$$

Вклад в плотность неизвестных объектов (возможно, темных звезд)

$$\approx 0,05 M_{\odot} \text{ пс}^{-3} \\ \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$$

Звездные плотности для различных типов звезд [1, 9]

Звезды	Плотность, $10^{-3} M_{\odot} / \text{пс}^{-3}$
O, B	0,9
A	1
F	3

Звезды	Плотность, $10^{-3} M_{\odot} / \text{пс}^{-3}$
G V	4
K V	9
M V	25

Звезды	Плотность, $10^{-3} M_{\odot} / \text{пс}^{-3}$
G III	0,8
K III	0,1
M III	0,01

Функция светимости и спектральный класс

В таблице приводится функция светимости $\phi(M)$ для каждого спектрального класса [1]. Для удобства верхняя часть таблицы логарифмическая, а нижняя – линейная.

M_V	O	B	A	F	G	K	M
$10 + \lg \phi(M)$ (в пс ⁻³)							
-7	0,3	0,7	0,5	0,5	0,5		
-6	0,7	1,4	1	1	1	0,6	0,6
-5	1,0	2,4	2	1,8	1,9	1,6	2,0
-4	1,5	3,2	2	2,2	2,4	2,1	2,1
-3	2	3,7	2,7	2,9	2,9	3,0	2,8
-2	2	4,4	2,9	3,3	3,5	3,8	3,6
-1	2	5,1	4,0	4,2	4,0	4,4	4,5
0	1	5,3	5,3	4,3	4,9	5,4	5,0
10^{-4} звезд/пс ³							
0	0	0,2	0,2	0,02	0,08	0,25	0,1
1	0	0,3	1,0	0,3	0,3	1,2	0,1
2	0	0,2	2	1,6	0,5	1,1	0
3	0	0,1	0,8	7	1,5	1,0	0
4	0	0	0,3	12	7	1,0	0
5	0	0	0	6	20	3	0
6	0	0	0	2	15	15	0,1
7	0	0	0	1	8	30	1
8	0	0	0	0,1	4	25	10
9	0	0	0	0	2	15	30
10	0	6,1	0	0	0	4	80
11	0	1	0,3	0,1	0	2	90
12	0	2	4	1	0	1	100
13	0	4	6	3	1	4	100
14	0	8	10	10	6	8	100
15	0	15	20	10	15	12	80
16	0	30	50	30	30		60

Функция светимости, эмиссия и звездная плотность

Функция светимости $\varphi(M)$ – число звезд в единице объема, имеющих абсолютные звездные величины в интервале от $M + \frac{1}{2}$ до $M - \frac{1}{2}$. В таблице приведены также E – звездная эмиссия, т. е. излучение, выраженное числом звезд нулевой абсолютной звездной величины в единице объема, \mathcal{M}_d – общая масса звездного вещества в единице объема в каждом интервале звездных величин. Для столбца E (bol), в котором дается число звезд с $M_{\text{bol}} = 0$ в единице объема, используются интервалы визуальных звездных величин. Значения $\varphi(M)$, E и \mathcal{M}_d становятся ненадежными для $M = 17$.

M	$10 + \lg \varphi(M)$ (в pc^{-3})		$\varphi(M)$, 10^{-4}pc^{-3}		E , 10^{-3} звезд с $M=0$ на pc^3			\mathcal{M}_d V , $10^{-4} \mathcal{M}_{\odot} / \text{pc}^3$
	pg	V	pg	V	pg	V	bol	
	[1, 4, 7]							
< -6					3	1	20	
-6	2,4	2,1	0,0002	0,0001	6	3	30	0,005
-5	3,1	2,8	0,0012	0,0006	13	6	80	0,02
-4	3,63	3,46	0,0043	0,0029	17	11	110	0,06
-3	4,21	4,10	0,016	0,013	26	20	130	0,17
-2	4,77	4,72	0,06	0,05	37	33	150	0,5
-1	5,31	5,40	0,20	0,25	51	63	180	1,6
0	5,87	6,05	1	1	74	112	230	4
1	6,36	6,54	2	8	91	138	210	10
2	6,70	6,80	5	6	79	100	110	12
3	6,98	7,06	10	12	60	72	75	18
4	7,19	7,28	15	19	39	48	50	23
5	7,34	7,53	22	34	22	34	32	37
6	7,47	7,63	30	42	12	17	18	38
7	7,53	7,55	34	35	5	6	10	26
8	7,61	7,62	41	42	3	3	6	26
9	7,70	7,73	59	54	1	1	3	29
10	7,81	7,89	65	78	1	1	2	34
11	7,90	7,99	80	98			1	35
12	7,97	8,03	93	107				34
13	8,01	8,07	102	117				28
14	8,06	8,11	115	129				23
15	8,10	8,10	126	125				20
16	8,08	8,08	120	120				15
17	8,03	8,03	107	107				9
18	7,95	7,92	89	83				6
19	7,8	7,7	63	50				4
20	7,6	7,5	40	30				2
21	7,3	7,1	20	13				1
22	6,9	6,7	8	5				1
Сумма			1247	1310	540	669	1447	437

Звездная плотность для различных спектральных классов [1, 8]

В приведенной таблице сверхгиганты и субгиганты объединены с гигантами, все звезды ранних типов и субкарлики включены в главную последовательность. Исключены все слабые звезды с $M_V > 14,5$.

$10 + \lg$ (число звезд на pc^3)

Sp	O	B	A	F	G	K	M	Всего
Гиганты и т. п.				5,7	6,2	6,6	5,5	6,8
Звезды главной последовательности -	2,4	6,0	6,7	7,4	7,8	8,0	8,7	8,8
Белые карлики		7,1	7,3	7,1	6,8	7		7,7

Функция светимости в скоплениях и галактиках

Абсолютные значения подобраны так, чтобы они соответствовали окрестностям Солнца при $M_V = +5$. Данные для рассеянных скоплений получены из функции $\psi(M_V)$ [10] – начальной функции светимости для населения I типа. Для эллиптических галактик приведены теоретические значения [12].

M_V	Рассеянные скопления, население I типа [10]	Шаровые скопления, население II типа [10, 11]
	$10 + \lg \varphi(M)$ (в pc^{-3})	
-5	5,7	
-4	6,1	
-3	6,3	4,0
-2	6,6	5,4
-1	6,8	5,7
0	7,0	6,2
1	7,1	6,0
2	7,2	6,3
3	7,3	6,8
4	7,4	7,3

M_V	Рассеянные скопления, население I типа [10]	Шаровые скопления, население II типа [10, 11]	Эллиптические галактики, население II типа [12]
	$10 + \lg \varphi(M)$ (в pc^{-3})		
5	7,5	7,5	7,5
6	7,6	7,5	7,7
7	7,6	По-видимому, примерно те же значения, что и для населения, I типа	8,2
8	7,6		8,7
9	7,7		9,3
10	7,9		9,8
11	8,1		10,0
12	8,1		10,2
13	8,2		10,3

Полное излучение звезд

$$= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ звезд с } M_{\text{bol}} = 0 \text{ на } \text{pc}^3$$

$$= 4,3 \cdot 10^{25} \text{ Вт/pc}^3$$

$$= 1,5 \cdot 10^{-23} \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^3)$$

Излучение звезд в световых единицах

$$= 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ звезд с } M_V = 0 \text{ на } \text{pc}^3$$

$$= 5,6 \cdot 10^{-30} \text{ кд/см}^3.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 115; 2, § 117.
2. Woolley R., Stewart J. M., M. N., **136**, 329 (1967)
3. Lacarrieu C. T., Astron. Ap., **14**, 95 (1971).
4. Luyten W. J., M. N., **139**, 221 (1968).
5. Weidemann V., Z. Ap., **67**, 286 (1967).
6. Güttler J., Schielicke R., A. N., **290**, 113 (1968).
7. McCluskey S. W., Vistas in Astron., **7**, 141 (1966).
8. Gliese W., Z. Ap., **39**, 1 (1956).
9. Oort J. H., Stellar Populations, ed. O'Connell, Vatican, 1958, p. 145.
10. Sandage A., Ap. J., **125**, 422 (1957).
11. Hartwick F. D. A., Ap. J., **161**, 845 (1970).
12. Roberts M. S., A. J., **61**, 195 (1956).
13. Murray C. A., Sanduleak N., M. N., **157**, 273 (1972).

§ 119. Звездные плотности и плоскость Галактики

Распределение суммарной плотности звездного и прочего вещества $\rho(z)$ как функции расстояния z от галактической плоскости [1, 2, 5].

$$K(z) = \text{ускорение в направлении } z$$

$$\rho(0) = 0,13 \mathcal{M}_{\odot} \text{ pc}^{-3} = 8,8 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$$

z, pc	0	50	100	200	400	600	1000	2000	5000	10 000
$P(\zeta)/\rho(0)$	1,00	0,91	0,82	0,57	0,25	0,12	0,044	0,011		
$X(\zeta), \text{Ю}^{-9} \text{ см/с}^2$	0,0	1,3	2,4	4,0	6,0	6,9	7,8	8,4	7,5	5
Гало: $\rho(\zeta)/\rho(0)$	0,05			0,04	0,03	0,025	0,015	0,008	0,001	0,0001

Полная эквивалентная толщина Млечного Пути (соответствующая плотности в галактической плоскости)

$$= 660 \text{ pc} = 2,0 \cdot 10^{21} \text{ см}$$

Общая плотность на единицу площади в галактической плоскости вблизи Солнца

$$= 0,019 \text{ г/см}^2$$

Зависимость функции светимости от расстояния z

В таблицах приведены логарифмы отношения функции светимости $\varphi(z)$ к ее значению вблизи галактической плоскости $\varphi(0)$ (§ 118) как функции абсолютной звездной величины M_V и спектрального класса Sp .

Таблицы содержат также значения параметра β , в приближенной формуле $\varphi(z) = \varphi(0) \exp(z/\beta)$ и v_z – среднеквадратичной скорости в направлении z .

$\lg \varphi(z) - \lg \varphi(0)$ [1]

M_V	z , пс						β , пс
	0	100	200	500	1000	1500	
-4	0,0	-1,1	-1,9	-3			50
-2	0,0	-0,8	-1,2	-2,0	-2,9		80
0	0,0	-0,5	-0,8	-1,4	-2,2	-2,7	120
2	0,0	-0,27	-0,53	-1,1	-1,8	-2,3	160
4	0,0	-0,13	-0,30	-0,8	-1,4	-1,9	270
6	0,0	-0,07	-0,14	-0,5	-1,0	-1,4	450
8	0,0	-0,03	-0,09	-0,3	-0,6	-1,0	800?
10	0,0	-0,01	-0,04	-0,11	-0,3		2000?
12	0,0	0,00	-0,02	-0,04	-0,17		4000?

$\lg \varphi(z)$ для звезд гало – $\lg \varphi(0)$ [5]

M_V	z , кпс					β , пс
	0	2	5	10	15	
7	-0,8	-1,6	-2,4	-3,3	-3,9	1500

$\lg \varphi(z) - \lg \varphi(0)$ [1, 3]

Sp	z , кпс						β , пс	v_z , км/с
	0	100	200	500	1000	1530		
O	0,0	-1,0	-1,5				50	5
B	0,0	-0,8	-1,4	-2,2			60	5
A	0,0	-0,27	-0,73	-1,6	-2,5		115	8
F	0,0	-0,10	-0,37	-1,3	-2,3		190	11
dG	0,0	-0,05	-0,17	-0,7	-1,9		340	15
dK	0,0	-0,01	-0,14	-0,8	-2,0		350	15
dM	0,0						350	15
gG	0,0	-0,07	-0,17	-0,55	-1,1	-1,5	400	
gK	0,0	-0,15	-0,28	-0,8	-1,4	-1,8	270	15

Вклад в $\rho(0)$ и значения β и v_z для различных объектов [1, 8]

Объекты	$\lg \rho(0)$ (в $M_\odot/\text{пс}^3$)	β , пс	км/с
Белые карлики [8, 9]	-1,7	500	20
Субкарлики	-2,8	2000	60
Субгиганты			25
Сверхгиганты			13
Цефеиды	-6	45	5
Переменные типа RR Lyr	$P < 0,5$ сут $P > 0,5$ сут	900 2000	35 60
Переменные типа W Vir		2000	
Звезды типа U Gem		2000	
Долгопериодические переменные	M0e \leftrightarrow M4e M5e \leftrightarrow M8e	1000	36
		700	30
Планетарные туманности	-8,3	260	20
Новые		300	20
Повторные новые		500	
Шаровые скопления	-6,0	3000	70
Рассеянные скопления	-4,4	80	6
Межзвездный газ	-1,7	125	8
Все вещество	-0,9		

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 116; 2, § 118.
2. Hill E. R., Oort J. H., В. А. N., **16**, 1, 45 (1960).
3. Uppgren A. R., A. J., **68**, 475 (1963).
4. Bok B. J., Basinski J., Mem. Stromlo, **4**, 16 (1964).
5. Becker W., Z. Ap., **62**, 54 (1968); Astron. Ap., **9**, 204 (1970).
6. McCuskey S. W., Vistas in Astron., **7**, 141 (1966).
7. Schmidt K. H., A. N., **293**, 11 (1971).
8. Oort J. H., Stellar Populations, ed. O'Connell, Vatican, 1958, p. 415.
9. Cowsik R., Price P. B., Phys. Today, **24**, 30, 38 (1971).

§ 120. Движение Солнца и соседних звезд

Движение Солнца относительно ближайших звезд (которое входит в каталоги собственных движений и лучевых скоростей) [1,3].

Скорость Солнца

$$\begin{aligned} S &= 19,7 \text{ км/с,} \\ &= 2,02 \cdot 10^{-5} \text{ пс/год} \\ &= 4,15 \text{ а. е./год} \end{aligned}$$

Апекс Солнца

$$\begin{aligned} A &= 271^\circ & D &= +30^\circ & (1900) \\ L^{\text{II}} &= 57^\circ & B^{\text{II}} &= +22^\circ, \end{aligned}$$

где $A, D, L^{\text{II}}, B^{\text{II}}$ – координаты $\alpha, \delta, l^{\text{II}}, b^{\text{II}}$ апекса Солнца – точки, в направлении которой движется Солнце. Движение Солнца меняется в зависимости от выбора звезд сравнения.

Составляющие движения Солнца (относительно всех звезд каталога) [1, 3]

В направлении к галактическому центру, $l^{\text{II}} = 0^\circ, b^{\text{II}} = 0^\circ$

$$X = +10,2 \text{ км/с}$$

В плоскости Галактики в направлении $l^{\text{II}} = 90^\circ, b^{\text{II}} = 0^\circ$

$$Y = +15,1 \text{ км/с}$$

В направлении к полюсу Галактики, $b^{\text{II}} = 90^\circ$

$$Z = +7,4 \text{ км/с}$$

Составляющие основного движения Солнца (относительно близких звезд с учетом скоростей кругового движения вокруг центра Галактики) [2, 3, 8, 10]

$$\begin{aligned} X &= +9 \text{ км/с} \\ Y &= +12 \text{ км/с} \\ Z &= +7 \text{ км/с} \end{aligned}$$

Движение Солнца относительно звезд типа RR Лиры (звезды с большими скоростями) [1, 5, 6]

$$\begin{aligned} S &= 140 \text{ км/с} \\ L^{\text{II}} &= 88^\circ & B^{\text{II}} &= +12^\circ \end{aligned}$$

Движение Солнца относительно звезд различных спектральных классов [1–5]

Sp	S , км/с	A	D	L^{II}	B^{II}	K , км/с
B0	22	274°	+28°	56°	+19°	+5,1
A0	16	267	+23	48	+22	+1,4
F0	16	267	+22	48	+21	+0,3
G0	20	272	+28	55	+18	0,0
K0	22	275	+32	61	+18	0,0
M0	25	278	+38	66	+19	0,0

Член K – наблюдаемая скорость удаления (красное смещение) во всех направлениях. Она значительна для звезд ранних типов. Приведенные значения относятся к ярким звездам, для слабых звезд член K намного меньше и близок к гравитационному смещению

$$= 0,634 (M/M_\odot)/(R/R_\odot) \text{ км/с}$$

Движение близлежащих звезд относительно галактического центра [1], § 134.

$$\begin{aligned} \text{Скорость} &= 250 \text{ км/с} \\ \text{Направление} & l^{\text{II}} = 90^\circ \quad b^{\text{II}} = 0^\circ \end{aligned}$$

Движение близлежащих звезд относительно системы шаровых скоплений, субкарликов и звезд с высокими скоростями [1].

$$\begin{aligned} \text{Скорость} &= 180 \text{ км/с} \\ \text{Направление} & l^{\text{II}} = 94^\circ \quad b^{\text{II}} = +3^\circ \end{aligned}$$

Скорости и направления звездных потоков (видимые) [1, 7]

Поток	Доля звезд, %	Скорость, км/с	Апексы потоков			
			α	δ	l^{II}	b^{II}
Поток 1	55	31	91°	-10°	217°	-14°
Поток 2	45	16	290	-74	321	-28

Эллипсоид скоростей для близких звезд: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – дисперсии скоростей [1]. Динамическая ось составляет около 13° с направлением на галактический центр, но это расхождение уменьшается, если учесть более слабые и более удаленные звезды.

$$\begin{aligned} \text{Главная ось:} & \sigma_1 = 38 \text{ км/с} & l^{\text{II}} = 13^\circ & b^{\text{II}} = 0^\circ \\ \text{Вторая ось:} & \sigma_2 = 24 & l^{\text{II}} = 103^\circ & b^{\text{II}} = 0^\circ \\ \text{Третья ось:} & \sigma_3 = 18 & & b^{\text{II}} = 90^\circ \end{aligned}$$

Эллипсоид скоростей как функция спектрального класса [1–3, 5]

В таблице приведены также средние массы \bar{M} и величины $\sigma_3^2 \bar{M}$, характеризующие кинетические энергии звезд

S_p	l^{II}	$\sigma_1, \text{ км/с}$	$\sigma_2, \text{ км/с}$	$\sigma_3, \text{ км/с}$	\bar{M}, M_\odot	$\sigma_3^2 \bar{M}, M_\odot, (\text{км/с})^2$
B0	350°	11	9	5	17	420
A0	22	16	9	7	3,2	160
F0	16	23	13	12	1,7	230
dG0	10	30	18	19	1,1	400
dK0	10	36	22	17	0,8	230
dM0	10	40	24	19	0,5	180
gG0	10	25	16	14	3	600
gK0	10	29	18	16	4	1000
gM0	10	31	20	18	6	2000
Сверхгиганты		12	10	8		

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q., **1**, § 117; **2**, § 119.
2. Delhaye J., Galactic Structure, ed. Blaauw, Schmidt, Chicago, 1965, p. 61.
3. Mihalas D., Galactic Astronomy, Freeman, 1968, p. 99.
4. Павловская Е. Д., А. Ж., **40**, 1112 (1963).
5. Strassl H., Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965 p 628.
6. McLeod N. W., Ap. J., **103**, 134 (1946).
7. Tannahill S. R., Ewart D. O., M. N., **114**, 460, 467 (1954).
8. Woolley R. et al., Royal Obs. Bull., No. 166, Herstmonceux. 1971.
9. Crampton D., Fernie J. D., A. J., **74**, 53 (1969).
10. Craft R. P., Schmidt M., Ap. J., **137**, 249 (1963).

Туманности, источники неоптического излучения и межзвездное пространство

§ 121. Планетарные туманности

Планетарные туманности легко узнать по их сложной дискообразной структуре [2]. Известно около 700 планетарных туманностей [3].

Эффективная длина волны для фотографических звездных величин туманностей

$$\lambda = 4800 \text{ \AA}$$

Медианная галактическая широта

$$= 8^\circ$$

Абсолютная звездная величина планетарных туманностей [4]

$$M_n \approx -1,5 + 0,8 \delta,$$

где $\delta = m_* - m_n$ – разность звездных величин туманности и звезды, вызывающей свечение туманности (обычно положительная).

Связь между температурой возбуждающей звезды T_* и δ [5, 6]

$T_*, \text{ K}$	30 000	40 000	50 000	60 000	80 000	100 000
$\delta (m_{pg})$	0,4	1,6	2,6	3,5	5,0	6,3

В таблице спектров приведены для удобства сравнения и планетарные, и диффузные туманности. Даны только наиболее сильные линии, а их интенсивности определены относительно линии H β , интенсивность которой принята за 100. Большие различия интенсивностей линий в спектрах планетарных туманностей связаны главным образом с различием температур T_* ,

t – линии, интенсивность которых увеличивается с T_* ,

~ – линии, интенсивность которых меняется беспорядочно

[] – запрещенные линии

Данные для диффузных туманностей относятся к туманности Ориона.

Энергия от спектральных линий планетарной туманности с фотографической звездной величиной $m_{pg} = 10$, регистрируемая на границе земной атмосферы,

$$= 6 \cdot 10^{-13} \times (\text{интенсивность}) \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}),$$

где «интенсивность» берется из таблицы, в которой интенсивность линии H β принята за 100 [1, 15].

Спектры планетарных и диффузных туманностей

$\lambda,$ Å	Элементы и компоненты линий [1, 7, 8]	Интенсивность	
		планетарные туманности [1, 7, 8]	туманность Ориона [9, 10]
		H β = 100	
3133	O III	25 t	
3203	He II	10 t	
3343	O III [Ne V] 3340–46	20 t	
3435	[Ne V] 3425; O III 3444	30 t	
3727	[OH] 3726,1; 3728,6	30~	100
3798	H I	4	9
3835	H I	6	13

3869	[Ne III]	50 t	23
3889	H I 3889,1; He I 3888,6	15	21
3968	[Ne III] 3967,4; H I 3970,1	25 t	20
4026	He I	2	3
4073	S II 4069, 4076	3	
4101	H I 4102; N III 4097, 4103	25	28
4340	H I	40	44
4363	[O III]	10 t	2
4471	He I	5	5
4542	He II	2 t	
4638	N III 4634, 4641	5	
4686	He II	40 t	
4725	[Ar IV] 4712,40; [Ne IV]	6 t	
4861	H I	100	100
4959	[O III]	300 t	112
5007	[O III]	800 t	340
5412	He II	6 t	
5755	[N II]	12~	15
5876	He I	25	28
6302	[O I] 6300; [S III] 6311	30~	22
6364	[O I]	10~	1
6548	[N II]	70~	15
6563	H I	400	300
6584	[N II]	150	50
6678	He I	12	18
6726	[S II] 6716, 6731	15	15
7065	He I	20	10
7136	[Ar III]	50 t	12
7325	[O II] 7319, 7330	50	12
9069	[S III]	180	50
9532	[S III]	550	100
10830	He I		40
10938	H I		11

В таблицах:

Диаметры приблизительно равны характерным (§ 6).

Межзвездное поглощение A выражено в звездных величинах для линии H β .

T_* – температура звезды, полученная усреднением температур, определенных разными методами.

T_n – температура туманности.

Плотность туманности можно определить по электронной плотности, полагая $N_n \approx N_e$.

Поток радиоизлучения f определен на частоте 1 Гц и выражен в обычных единицах потока: 10^{-26} Вт/(м² · Гц).

Радиоиндекс вблизи частоты 1 Гц выражается формулой

$$x = d(\lg f) / d(\lg \nu),$$

где ν – частота.

Поток излучения туманности в линии H β равен возле Земли 10^{-12} эрг/(см² · с) и будет больше, если учесть межзвездное поглощение.

v_{exp} – скорость расширения,

con – непрерывный спектр.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 110; **2**, § 121.
2. Curtis H. D., Publ. Lick Obs., **13**, 57 (1918).
3. Perek L., В. А. Czech., **14**, 201 (1963).
4. Шкловский И. С., А. Ж., **33**, 222 (1956).
5. Zanstra H., В. А. N., **15**, 237, 249 (1960).
6. Berman L., Lick Obs. Bull., **18**, 57 (1937).
7. Alter L. H., Kaler J. B., Ap. J., **139**, 1074 (1964).
8. Alter L. H., Landolt-Börnstein Tables, VI, **1**, Springer, 1965, p. 566.
9. Johnson H. M., Nebulae and Interstellar Matter, ed. Middlehurst Aller. Chicago, 1968, p. 65.

Избранные планетарные туманности

Туманность	1950		Расстояние, пс [1, 3, 8, 11]	Диаметр пс [1, 3, 8]		m_n	m_*	A H β [1, 14, 16]
	α	δ		[pg] [1, 13]				
NGC246	0 ^h 44 ^m	-12° 09'	390	230"	0,4	8,7	11,4	0,0 ^m
IC 418	5 25	-12 44	1500	12	0,09	12	10,7	0,9
NGC 2392	7 26	+21 01	1000	40	0,18	8,5	10,5	0,9
NGC 3132*)	10 05	-40 12	800	55	0,20	8,2		
NGC 3242	10 22	-18 23	800	28	0,10	9,1		0,7
NGC 3587 «Сова»	11 12	+55 17	600	180	0,5	11,7	14,3	0,4
NGC 3918	11 48	-56 54	1200	15	0,08	8,4	14	
NGC 6210	16 42	+23 54	1500	12	0,08	9,8	10	0,4
NGC 6543	17 59	+66 38	900	18	0,08	8,9	10,8	0,7
NGC 6572	18 10	+6 50	900	14	0,05	9,4	11	1,6
NGC 6720 «Кольцо»	18 52	+32 58	700	75	0,20	9,4	14,6	1,0
NGC 6826	19 44	+50 24	800	26	0,10	9,3	10,6	0,6
NGC 6853 «Гантель»	19 57	+22 35	220	330	0,3	7,8	13,5	0,2
NGC 7009 «Сатурн»	21 01	-11 34	700	24	0,08	8,5	11,7	0,4
NGC 7027	21 05	-42 02	1200	13	0,07	10,1	16	1,9
NGC 7293 «Улитка»	22 26	-21 06	140	800	0,5	6,8	13,4	0,1
NGC 7662	23 23	+42 14	900	18	0,06	9,0	12,6	0,9

*) На английском языке эта туманность называется eight-burst, что можно перевести, как «взрыв в форме восьмерки». –
Прим.ред.

Физические характеристики планетарных туманностей

NGC	H β поток, 10^{-12} эрг/(см ² · с) [8, 14, 15]	Sp^*	T_*	T_n	$\lg N_e$ [1, 8]	M_n M_\odot [1, 18]	v_{exp} , км/с [1, 19]	$f, 10^{-26}$ Вт/(м ² · Гц)	x
			10^3 К [1, 8, 12, 17, 21]					при 1 ГГц [20]	
246		O7	40			0,12			
1418	800	O7	36	12	4,1	0,04	0	0,66	+0,9
2392	100	O6	40	20	3,3	0,10	53		
3132	270			14	2	0,12			
3242	300	con	50	14	3,0	0,04	20	0,90	0,0
3587			50		2,3	0,10			
3918			80						
6210	140	O7	38	12	4,1	0,13	21		-
6543	500	O7	41	10	4,0	0,12	12		
6572	800	WN6	50	11	4,0	0,10	4	0,24	+2,0
6720	320	con	90	10	3,0	0,17	19	0,44	+0,1
6826	240	O6	35	11	3,5	0,08			
6853			80	11	2,3	0,17	30	1,4	+0,2
7009	280	con	50	12	4,0	0,09	19	0,52	+0,8
7027			70	15	3,9	0,2	18	0,7	+2,0
7293			100	17	3,6	0,19			
7662	250	con	60	14	3,9	0,07	25	0,7	0,0

10. Morgan L. A., M. N., **153**, 393 (1971).
11. Smith H., A. J., **76**, 193 (1971).
12. Cahn J. H., Kaler J. B., Ap. J. Supp., **22**, 319 (1970).
13. Костикова Е. Б. et al., p. 317; Liller, Shao, p. 321, Planetary Nebulae, I.A.U. Symp., **34** (1968).
14. Collins G. W., Daub, O'Dell, Ap. J., **133**, 471 (1961).
16. Воронцов-Вельяминов и др., А. Ж., **41**, 255 (1964).
15. Архипова В. П., Planetary Nebulae, I. A. U. Symp., **34**, 159 (1968).
17. Bohm K. H., Planetary Nebulae, I. A. U. Symp., **34**, 297 (1968).
18. Kohoutek L., B. A. Czech., **11**, 64 (1960); **12**, 213 (1961).
19. Bohuski T. J. et al., Ap. J., **162**, 27 (1970).
20. Terzian Y., Planetary Nebulae, I. A. U. Symp., **34**, 87 (1968).
21. Peimbert M., Peimbert S. T., Bol. Obs. Tonanzintla, **6**, No. 36, 21, 29 (1971).
22. Perek L., Kohoutek L., Catalogue of Galactic Planetary Nebulae, Academia, Prague, 1967.

§ 122. Яркие диффузные туманности

Различают следующие типы ярких диффузных туманностей:

- E Туманности с эмиссионными линиями в спектре. Они обычно возбуждаются звездой более раннего спектрального класса, чем В1. Очень слабые E-туманности можно назвать областями эмиссии H α (области H II).
- C Отражающие туманности. Они обычно освещаются звездой более позднего спектрального класса, чем В2, а отражающие туманности с высокими галактическими широтами могут освещаться Галактикой [2].
- S Остатки вспышек сверхновых. Они могут быть очень большими и довольно слабыми. Содержат необычные звездоподобные остатки.

Большинство туманностей очень неправильные, а некоторые состоят из нескольких частей. Многие из приведенных данных неточны и очень трудны для определения. В таблице приведены координаты, звездные величины m_V , поглощение A_V , расстояния, диаметры, массы, плотности $N_H \approx N_e$. Даются также сведения о главной возбуждающей или освещающей звезде, находящейся в туманности. Приведены значения поверхностной яркости областей H α и потока радиоизлучения, который имеет почти постоянное значение в диапазоне $\lambda = 10 \leftrightarrow 100$ см. В столбце NGC помещены данные, отражающие, насколько возможно, состав туманности. Диаметры приближаются к характерным, определенным в §6. Массы определены ненадежно. Таблица расположена на стр. 229.

Типичные размеры туманностей и их деталей:

Яркая диффузная туманность	5 пс
Яркое кольцо	0,02 пс
Отражающие волокна	0,005 пс
Волокна вуали в туманности Лебеда	0,001 пс

Связь между предельным радиусом туманности a и звездной величиной освещающей звезды m_V для С- и E-туманностей [8, 10]

$$2 \lg a = -0,4 m_V + 4,4 [a \text{ в мин. дуги}]$$

Средние галактические широты [1]

E-туманности	2,0°
C-туманности	9°

Электронная температура E-туманностей

$$\approx 7000 \text{ K}$$

Показатель цвета С-туманностей [1]

$$(B - V)_{\text{neb}} = (B - V)_* - 0,25 \approx 0,3$$

Плотность С-туманностей [7]

$$\approx 6 \cdot 10^{-23} \text{ г/см}^3$$

Концентрация частиц в С-туманностях

$$\approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ частиц/см}^3.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 118; 2, § 120.
2. Bergh S. v. d., A. J., **71**, 990 (1966).
3. Faulkner D. J., Publ. A. S. P., **75**, 269 (1963).
4. Шоломицкий Г. Б., А. Ж., **40**, 223 (1963).
5. Cederblad S., Lunds Obs. Medd., II, No. 119 (1946).
6. van de Hulst H. C., Rev. Mod. Phys., **30**, 913 (1958).
7. Schalén C., Centennial Symposia, Harv. Mon., **7**, 11 (1948).
8. Hubble E., Ap. J., **56**, 162 (1922).
9. Pottasch S. R., Vistas in Astronomy, **6**, 149 (1965).
10. Johnson H. M., Nebulae and Interstellar Matter, ed. Middlehurst, Aller, Chicago, 1968, p. 65.
11. Bok B. J., Sky and Telescope, **42**, 64 (1971).
12. Maran S. P. et al. (ed.), The Gum Nebula, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, X-683-71-375, 1971.
13. Dujour R. J., Lee P., Ap. J., **160**, 357 (1970).
14. Racine R., Obs. Handb., R. A. S. Canada, 1972, p. 94.
15. Ilovaisky S. A., Lequeux J., Astron. Ap., **18**, 169 (1972).

Диффузные туманности

Туманность	NGC или IC	Тип	Координаты				m_V	A_V	Расстояние, пс [1, 10, 15]	Диаметр пс [1, 9]		Масса M_{\odot} [1, 9]	Плотность N_H , N_e , см^{-3} , [9, 10]	Излучение в линии, $\text{H}\alpha$ 10^{-3} , $\text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{сп})$ [9]	Поток радиоизлучения, $\lambda = 20$ см 10^{-22} $\text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц})$ [9]	Возбуждающая звезда	
			α	δ	l''	b''				S_p	m_V						
Вблизи γ Кассиопеи	281	E	00 ^h 50 ^m	+56°	123°	-6°			1 700	12'	6	1 800	30	1,2	2	O6	8,3
	I 59	E	00 53	+60	124	-2			160	10	0,5	0,1	50			B0e	2,3
В Плеядах, Крабовидная,	I 1848	E	02 47	+60	137	+1			1 500	50	22	2 000	25	0,6	7	O7	7,1
	M 45 1432-5	C	03 44	+24	166	-23			126	40	1,5					B7	3,4
Ориона, Вблизи ζ Ориона, «Конская голова»	M 1 1952	S	05 31	+22	184	-6	8,6	1,5 ^m	2 200	5	3		1 000				16
M 42	1976-7	E	05 33	-05	209	-20	4	0,1	460	35	5	300	600	13	44	O8e	5,4
M 78	1 434	CE	05 38	-02	207	-17			350	30	3	0,6	25			B1	2,0
30 Золотой Рыбы, LMC, «Гарантул»	2068	C	05 44	-00	205	-14	8,3	0,1	500	4	0,6					B7	10,3
	2070	ES	05 40	-69	280	-32			60 000	10	170	10 ⁶					
	2174-5	E	06 06	+20	190	0		1,6	1 600	15	7	1000	20	1,2	3	O6e	7,4
«Розетка» [13]	2237-38-44-46	E	06 29	+04	206	-2		2	1 100	60	15	9 000	30			30	O6
Переменная туманность Хаббла	2261	CE	06 36	+08	204	+1			1 500	0,5	0,3					Bp	12
«Гум» [11, 12]		S	08 00	-07	258	-7			400	1 200	140	10 ⁵				O7	1,8
Вблизи η Киля	3372	E	10 43	-59	287	-1		1,0	1 300	70	26	1 000	200			pec	7
«Трехраздельная», M 20	6514	E	17 59	-23	7	0	8,5	1,0	1 000	15	4	150	100	6	3	O7	6,9
«Лагуна», M 8	6523	E	18 01	-24	6	-1	5,8	1,1	1 200	25	9	1 000	80			38	O5e
В Змее, M 16	6611	E	18 16	-14	17	+1	6,4	2,4	1 700	12	6	500	90	3,8	14	O5e	8,3
«Омега», M 17	6618	E	18 18	-16	15	-1	7	3	1 600	20	9	1 500	120			A0	8,9
«Петля», волокнистая туманность в Лебеде	6960-92-95	ES	20 49	+31	74	-8			500	150	22	1 500	120			B1	6,4
«Пеликан»	I 5067-68-70	CE	20 48	+43	84	0		2,5	600	60	10	150	30			A2e	1,3
«Северная Америка»	7000	CE	20 57	+44	86	-1		1,1	700	100	20	8 000	15	0,8	51	A2e	1,3
В Цефее	7023	C	21 03	+68	104	+14			290	8	1					B5e	7,2
«Кокон»	I 5146	C	21 51	+47	94	-5		1,4	1 600	4	2	7	70			B1	10,0

§ 123. Темные туманности

Типичные размеры темных туманностей различных типов [2, 4]

	Глобула I	Глобула II	Угольный мешок	Большое облако
Диаметр, пс	0,06	0,5	8	40
Полное поглощение, A_{pg}	5^m	$1,5^m$	$1,5^m$	$1,4^m$
A_{pg} на кпс	80 000	3 000	200	35
Плотность вещества, г/см ³	$> 10^{-21}$	$5 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-24}$	$5 \cdot 10^{-25}$
Масса поглощающего вещества	$> 0,002 M_{\odot}$	$0,05 M_{\odot}$	$15 M_{\odot}$	$300 M_{\odot}$

Некоторые большие комплексы облаков [1, 3, 6]

Область	l^{II}	Размер	Расстояние, пс	A_v	Масса поглощающего вещества, M_{\odot}
		$\Delta l \times \Delta b$			
Oph, Sco, Sgr	0°	25° × 12°	120	0,7 ^m	100
Scu, Ser	26	15 × 12		2	
Cyg	87	12 × 10	600	1	700
Tau, Ori, Aug (разбросанный)	180	50 × 20	150	1	80
Vela	270	8 × 15	600	1,6	500
Nor, Ara	337	15 × 20		1	

Избранные темные области [1, 3, 6]

Туманность	Координаты		Размер	Расстояние, пс	A_v
	l^{II}	b^{II}			
θ Змееносца	1°	+6°	2°	250	2 ^m
«Северная Америка»	84	-1	2	200 и 600	2
В Лебеде	92	+3	3	250 и 600	1 + 1
S Единорога	201	+3	2	600	1,5
В Орионе	204	-13	3		
В Орионе	206	-18	3	300	1
«Угольный мешок»	304	0	4	170	1,8
ρ Змееносца	353	+17	2	200	4

Площадь и распределение темных облаков в зависимости от b^{II}

Данные относятся к интервалу 260° по l^{II} , 350° ↔ 250°.

Непрозрачность каждого облака изменяется в пределах 1 ↔ 6.

Средняя непрозрачность = (общая площадь облака) × (непрозрачность) / (исследованная площадь неба).

Галактическое поглощение $\approx 0,4 \text{ sec } b^{\text{II}}$ показано для сравнения.

b^{II}	0°	±2°	±5°	±10°	±15°	±20°	±30°	±40°	±90°
Общая площадь облака, кв. град.	387	551	263	78	66	17	7	0	
Общая площадь × непрозрачность	1 015	1 240	510	194	205	56	17	0	
Исследованная площадь неба, кв. град.	1 040	1 560	2 600	2 500	2 500	4 700	4 300	10 800	
% площади облака	37	35	10	3	3	0,4	0,2	0,0	
Средняя непрозрачность	0,97	0,80	0,20	0,08	0,08	0,01	0,004	0,0	
Галактическое поглощение	20	8	3	2	1,4	1,0	0,7	0,4	

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, §119; 2, § 122.
2. Bok B. J., Centennial Symposia, Harv. Mon., 7, 53 (1948).
3. Lynds B. T., Ap. J. Supp., 7, 1 (1962).
4. Lynds B. T., Nebulae and Interstellar Matter, ed. Middlehurst and Aller, Chicago, 1968, p. 119.
5. Schoenberg E., Veröff. Sternw. München, 5, No. 21 (1964).
6. Becker W., Sterne und Sternsysteme, Steinkopff, 1950, p. 194.
- 7*. Хавтаси Дж. Ш., Атлас галактических туманностей, Изд-во АН Груз, ССР, Тбилиси, 1960

§ 124. Межзвездные облака

Облака имеют очень неправильную структуру и информация об их размерах, количестве, плотности и т. п. может быть только приближенной. Газ и пыль (частицы, пары) в облаках часто перемешаны, поэтому нельзя привести отдельные размеры для газовых и пылевых облаков.

$$\begin{aligned} \text{Диаметр облаков [1, 2, 4]} &= 8 \text{ пс} \\ \text{Плотность расположения облаков} &= 8 \cdot 10^{-5} \text{ пс}^{-3} \\ \text{Часть пространства вблизи плоскости Галактики, занятая облаками} &= 4\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Отсюда фактор неоднородности } x \text{ (из § 84)} \\ &\approx 25 \end{aligned}$$

Доля областей вблизи галактической плоскости, в которых излучение горячих звезд может ионизовать водород $= 7\%$

$$\begin{aligned} \text{Часть пространства вблизи галактической плоскости, занятая облаками ионизованного газа (области H II)} &= 0,3\% \\ \text{Расстояние между облаками} &= 25 \text{ пс} \\ \text{Число облаков на луче зрения в галактической плоскости} &= 5 \text{ на } 1 \text{ кпс} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Среднее поглощение в облаке в визуальных звездных величинах} \\ &= 0,3^m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Плотность облака} &= 1,6 \cdot 10^{-23} \text{ г/см}^3 = 0,24 \mathcal{M}_{\odot} \text{ пс}^{-3} \\ &= 8 \text{ атом/см}^3 \text{ для газовых облаков} \end{aligned}$$

Концентрация молекул H_2 достигает величины 1 молекула/см³ [3].

$$\begin{aligned} \text{Масса облака} &\approx 120 \mathcal{M}_{\odot} \\ \text{Плотность вещества в космическом пространстве, обусловленная облаками,} \\ &= 1,1 \cdot 10^{-2} \mathcal{M}_{\odot} \text{ пс}^{-3}, \end{aligned}$$

эта величина составляет, по-видимому, 90% общей плотности межзвездного вещества [4].

$$\begin{aligned} \text{Среднеквадратичная скорость случайного движения облаков вдоль луча зрения} \\ &= 9 \text{ км/с} \end{aligned}$$

Связь между плотностью и размером для газовых облаков (области H II) [5] (N – атомная плотность)

Диаметр облака, пс	0,1	1	10	100
$\lg N$ (в см ⁻³)	3,4	2,1	0,9	0,2

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 120; 2, § 123.
2. *Reddish V. C., Sloan C.*, Observatory, **91**, 70 (1971).
3. *Mendls D. A.*, Ap. Letters, **1**, 129 (1968).
4. *Scheffler H.*, Z. Ap., **65**, 60 (1967).
5. *Kodaira K.*, Publ. A. S. Japan, **22**, 157 (1970).

§ 125. Поглощение света звезд и межзвездная пыль

Поглощение света звезд вблизи галактической плоскости

Межзвездными поглощающими облаками § [124]	$A_V = 1,6 \text{ зв. вел./кпс}$
Частицами пыли между облаками [1, 2]	$A_V = 0,3 \text{ зв. вел./кпс}$
Общее [1, 3]	$A_V 1,9 \text{ зв. вел./кпс}$

$$\begin{aligned} \text{Наблюдаемое поглощение для звезд, подобранных по их видимости,} \\ &= 0,8 \text{ зв. вел./кпс} \end{aligned}$$

Шкала высот, определенная по поглощению над галактической плоскостью [1, 3] [§ 134],

$$\beta = 140 \text{ пс}$$

Зависимость межзвездного поглощения от длины волны [1, 4–10]

Область спектра	$1/\lambda$, мкм ⁻¹	λ , мкм	A_λ	$1/\lambda$, мкм ⁻¹	λ , мкм	A_λ
0	0,0	∞	0,00 ^m	3,0	0,333	1,69 ^m
	0,5	2,0	0,11	3,5	0,285	1,97
	1,0	1,0	0,38	4,0	0,250	2,30
I	1,11	0,90	0,46	4,5	0,222	2,9
	1,6	0,67	0,74	5,0	0,200	2,8
V	1,81	0,553	1,00	6	0,167	2,7
	2,0	0,50	1,13	7	0,143	3,0
B	2,28	0,44	1,32	8	0,125	3,3
	2,5	0,40	1,45	9	0,111	8,7
U	2,74	0,365	1,58	10	0,100	4,2

В таблице зависимости поглощения от длины волны приведены величины поглощения для основных фотометрических полос: U, B, V, I . Поглощение A_λ нормировано таким образом, что $A_V = 1,0, A_0 = 0,0$. Однако имеются указания на то, что существует добавочное поглощение, которое влияет в некоторых случаях на излучение на всех длинах волн, но обнаруживается только для $\lambda > 1$ мкм [5]. Для того чтобы эти данные согласовались с приведенной таблицей, A_0 должно быть отрицательно, тогда нормировка теряет свое значение. В предельных случаях $A_0 = -1$ [5].

Поглощение A_V, A_B и избыток цвета $E = E_{B-V} = A_B - A_V$

$$A_V = RE = 3,3 E_{B-V} [1, 5, 11]$$

Стандартное значение R равно 3,0; более высокие значения, приводимые в некоторых работах, подразумевают наличие необнаружимого общего поглощения.

Отношение покраснений [1, 3, 12, 19]

$$E_{U-B} / E_{B-V} = 0,75 + 0,05 E_{B-V} \approx 0,80$$

Поляризация (эффект Хильтнера – Холла) [1]

P – степень поляризации, p – поляризация в звездных величинах

$$P = 0,46p$$

Соотношение между максимумом поляризации и поглощением [1, 13, 14]

$$2,2P = p = 0,063A_V = 0,19E_{B-V}$$

$$A_V = 2,1E_{B-V} + 7p$$

Поглощение и рассеяние частицами (газ, пыль) в межзвездном пространстве

Диаметр частиц, эффективных в поглощении света звезд [1, 5]

$$= 0,3 \text{ мкм}$$

Возможно, существует также поглощение частицами с диаметром 3 мкм [5].

Масса частиц

$$= 2 \cdot 10^{-13} \text{ г}$$

Плотность вещества частиц

$$\approx 1 \text{ г/см}^3$$

Показатель преломления вещества частиц [1, 15–18]

$$= 1,3 - 0,02 i$$

Альbedo частиц [16, 17]

$$= 0,5$$

Асимметрия рассеяния ($g = 0$ для изотропного рассеяния, $g = 1$ при полном обратном отражении) [17]

$$g = 0,7$$

Эффективное сечение частицы для поглощения и рассеяния в сумме

$$= 1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$$

Число частиц в единице объема

$$= 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-3}$$

Плотность поглощающего вещества в межзвездном пространстве

$$= 10 \cdot 10^{-26} \text{ г/см}^3$$

$$= 0,0015 \mathcal{M}_{\odot} / \text{пс}^3$$

Доля межзвездного вещества, находящегося в форме пылевых частиц,

$$\approx 10\%$$

Температура частиц [1, 15]

$$\approx 12 \text{ К}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 121; **2**, § 124.
2. *Gottlieb D. M., Upton W. L.*, Ap. J., **157**, 611 (1969).
3. *Шаров А. С.*, А. Ж., **40**, 900 (1963).
4. *Stecher T. P.*, Ap. J., **142**, 1683 (1965); **157**, L125 (1969).
5. *Johnson H. L.*, Ap. J., **141**, 923 (1965); *Vistas in Astron.*, **8**, 133 (1966).
6. *Boggess A., Borgman J.*, Ap. J., **140**, 1636 (1964).
7. *Schalén C.*, Publ. A. S. P., **77**, 414 (1965).
8. *Graham W. R. M., Duley W. W.*, J. R. A. S. Canada, **65**, 63 (1971).
9. *Bless R. C et al.*, Ap. J., **153**, 561 (1968).
10. *Nandy K. et al.*, Ap. Space Sci., **12**, 151 (1971).
11. *Martin P. G.*, M. N., **153**, 251 (1971).
12. *Underhill A.*, Early Type Stars, Reidel, 1966, p. 58, 79.
13. *Hiltner W. A.*, Ap. J. Supp., **2**, 389 (1956).
14. *Wilson R.*, M. N., **120**, 51 (1960).
15. *Greenberg J. M.*, Astron. Ap., **12**, 240, 250 (1971).
16. *van de Hulst H. C., de Jong T.*, Physica, **41**, 151 (1969).
17. *Mattila K.*, Astron. Ap., **15**, 292 (1971).
18. *Greenberg J. M.*, Nebulae and Interstellar Matter, ed. Middlehurst, Aller, Chicago, 1968, p. 221. (Русский перевод: *Гринберг А.*, Межзвездная пыль, изд-во «Мир», М., 1970.)
19. *Steinlin U. W.*, Z. Ap., **69**, 276 (1968).

§ 126. Межзвездный газ

Средние плотности вблизи галактической плоскости [1, 18] [§ 12]

Между облаками $= 0,3 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3 = 0,1 \text{ атом Н/см}^3$

В облаках, усредненная $= 0,9 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3 = 0,5 \text{ атом Н/см}^3$

Полная $= 1,2 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3 = 0,6 \text{ атом Н/см}^3$

$$= 0,018 \mathcal{M}_{\odot} / \text{пс}^3$$

\bar{N}_e (электроны) [13] $= 0,04 \text{ электрон/см}^3$

\bar{N}_e^2 [16] $= 0,12 \text{ (электрон/см}^3)^2$

Плотности внутри облаков:

атомы водорода $= 8 \text{ атом/см}^3$

электроны (облака HI) $= 0,01 \text{ электрон/см}^3$

молекулы H_2 [3, 15] $= 1 \text{ молекула/см}^3$

N_e^2 (облака HII) $= 60 \text{ (электрон/см}^3)^2$

Возбуждение, ионизация и кинетическая температура

	Области HI	Области HII
Возбуждение	Атомы и молекулы на основном уровне	В основном ионизован
Ионизация H	В основном нейтральный	Полностью ионизованы
Ионизация металлов	В основном ионизованы	8 000 К [1, 2]
Кинетическая температура	40 ↔ 120 К	

Эффективное сечение фотоионизации σ и поглощение межзвездного газа
в рентгеновской и ультрафиолетовой областях спектра [11]

$\lambda, \text{Å}$	2	5	10	20	50	100
$\lg \sigma$ (в см^2)	-23,5	-22,7	-21,8	-21,1	-20,9	-19,5
Зв. вел./кпс для 1 атом/ см^3	0,01	0,07	0,5	2,5	24	100

Межзвездные линии (оптическая область спектра) [1, 9]

Области H I						Области H II	
Атомные линии поглощения			Молекулярные линии поглощения			Линии излучения	
атом	$\lambda, \text{Å}$	$W, \text{мÅ}$	молекула	$\lambda, \text{Å}$	$W, \text{мÅ}$	атом	$\lambda, \text{Å}$
Na I [1]	3302,2	240 190	H ₂ [3]	1077		H I [1]	4340,5
	3303,0			1092			4861,5
	5890,0			1108			6562,8
	5895,9						
K I	7664,9		CH [1, 17]	3137,5	4 7 5	O II	3726,1
	7699,0			3143,2			3728,9
				3146,0			
Ca I	4226,7			3878,8	3 6	O III	4958,9
				3886,4			5006,8
Ca II	3933,7	34 21		3890,2	6 20	N II	6548,1
	3968,5			4300,3			6583,6
Ti II	3073,0		CN [1, 4]	3874,0	3 9 1		
	3229,0			3874,6			
	3242,0			3875,8			
	3383,8			3876,3			
Fe I	3720,0		CH ⁺ [1, 17]	3876,8	1 4 7 13 27		
	3859,9			3447			
				3579,0			
				3745,3			
				3957,7			
				4232,4			
	4232,0						
		C ¹³ H ⁺ [5]	4232,0				

Эквивалентные ширины W относятся к спектру ζ Орн [17].

Интенсивности межзвездных линий поглощения в зависимости от расстояния [1]

$$r = 3,1K,$$

$$r = 2,0D,$$

где r – расстояние в кпс

K – эквивалентная ширина линии K Ca II в Å

D – средняя эквивалентная ширина двойной линии D Na в Å

Мера эмиссии ME, определяющая протяженность области H II:

$$ME = \int N_e^2 dl = \int N_H^2 dl$$

где l – длина пути луча света внутри области H II в пс

N_e – электронная концентрация в см^{-3}

$= N_H$ – число атомов водорода в 1 см^3

Эмиссия областей H II в линии Ha

$$= 3 \cdot 10^{-8} ME \text{ эрг}/(\text{ср} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с})$$

Соотношение между мерой эмиссии ME и населенностью третьего уровня атомов водорода

$$ME = 400 N_3,$$

где N_3 – число атомов водорода с возбужденным третьим уровнем на 1 см^2 вдоль луча зрения.

Для отдельного облака H II

$$ME \approx 800$$

Для слабых протяженных областей эмиссии

$$ME \approx 1000$$

Сферы Стрёмгрена

Зависимость радиуса R области Н II от типа возбуждающей звезды [1, 12–14, 19]

$$R = S_0 N^{-2/3} \quad [R \text{ и } S_0 \text{ в пс, } N \text{ в см}^{-3}]$$

Спектральный класс звезды	O6	O8	B0	B2	B5	A0
S_0 , пс	100	65	35	15	3	1

Молекулярные спектры в микроволновом диапазоне

В микроволновом радиодиапазоне регистрируются как линии излучения (em), так и линии поглощения (abs) [8]. Приведенные значения распространенности относятся к областям неба, наиболее богатым этими молекулами.

Межзвездные молекулярные линии (микроволновое радиоизлучение)

Молекула [1, 8]	Спектр	Частоты линий, МГц	lg (распространенность в см ⁻²) [20]	
Двухатомные				
ОН [6]	em, abs	1 612, 1 665, 1 667, 1 720	15,0 19,5 12 ↔ 13 15,6 12 ↔ 15 15,5	
	em	4 660, 4 765, 6 031, 6 035, 13 441		
O ¹⁸ H	em	1 637, 1 639		
CN	em	113 501, 113 492		
CO	em	115 267		
Линейные многоатомные				
HCN	em	88 671		
HCO ⁺		89 190		
HC ₃ N	em	9 098		
Симметричный волчок				
NH ₃ [7]	em	23 694, 23 722, 23 870, 24 139, 25 056		
Асимметричный волчок				
H ₂ O	em	22 235		
HCHO	abs	4 830, 14 489		
HC ¹³ HO	abs	4 593		
HCOOH	em	1 639		
CH ₃ OH	em	834		

Межзвездные размытые полосы поглощения

Связь между эквивалентной шириной W размытой детали спектра около $\lambda = 4430 \text{ \AA}$ и избытком цвета E [1]

$$W(4430) = 5E \quad [W \text{ в } \text{\AA}]$$

Межзвездные диффузные полосы поглощения [1, 9, 10, 17]

$\Delta\lambda$ – полная полуширина

W – эквивалентная ширина в спектрах сильно покрасневших звезд, $E_{B-V} \approx 1,0$

λ , \AA	$\Delta\lambda$, \AA	W , \AA
4429,5	22	5
4501,2	3	0,4
4726,7	4	0,3
4762,3	4	0,5
4885	35	3
5362	5	0,2
5420	10	
5448	14	0,6
5487	5	0,3

λ , \AA	$\Delta\lambda$, \AA	W , \AA
5705,2	4	0,3
5778,0	17	1,0
5780,5	2,2	0,8
5797,1	1,4	0,4
5844	4	0,1
5849,8	1	0,1
6010,8	5	0,2
6177	30	2,5
6196,0	1	0,1

λ , \AA	$\Delta\lambda$, \AA	W , \AA
6203,0	3	0,4
6269,8	2,5	0,3
6283,9	5	1,8
6376,1	2	0,1
6379,2	1	0,2
6613,7	2	0,4
6660,6	1	0,1

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 122; **2**, § 125.
2. *Field C.*, M. N., **137**, 419 (1967).
3. *Carruthers G. C.*, Ap. J., **161**, L81 (1970).
4. *Munch G.*, Ap. J., **140**, 107 (1964).
5. *Bortolot V. J., Thaddeus P.*, Ap. J., **155**, L17 (1969).
6. *Robinson B. J., McGee R. X.*, Ann. Rev. Astron. Ap., **5**, 183 (1967).
7. *Cheung A. C. et al.*, Nature, **221**, 626 (1969).
8. *Somerville W. B.*, Rep. Prog. Phys., в печати.
9. *McNally D.*, Highlights in Astron., ed. de Jager, I. A. U., 1971, p. 339
10. *Seddon H.*, Nature, **214**, 257 (1967).
11. *Bell K. L., Kingston A. E.*, M. N., **136**, 241 (1967).
12. *Rubin R. H.*, Ap. J., **154**, 391 (1968).
13. *Prentice A. J., ter Haar D.*, M. N., **146**, 423 (1969).
14. *Lambrecht H.*, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 642.
15. *Mendis D. A.*, Ap. Letters, **1**, 129, (1968).
16. *Walmsley M., Grewing M.*, Ap. Letters, **9**, 185 (1971).
17. *Herbig G. H.*, Z. Ap., **68**, 243 (1968).
18. *McDonough T. R., Price N. M.*, Icarus, **15**, 505 (1971).
19. *Spitzer L.*, Diffuse Matter in Space, Interscience, 1968.
20. *Blades J. C.*, частное сообщение

§ 127. Излучение и поля в межзвездном пространстве

Плотность излучения в межзвездном пространстве (галактическая плоскость) [1–4]

Прямое и рассеянное излучение звезд

$$u_s = 7 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$$

Реликтовое излучение Вселенной (тепловое)

$$u_t = 4 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$$

Общая плотность излучения

$$u = 11 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$$

Эквивалентная температура [1, 2]

реликтового излучения = 2,7 К

всего излучения = 3,5 К

Полное излучение от звезд вблизи Солнца [§ 118]

$$= 1,45 \cdot 10^{-23} \text{ эрг/(см}^3 \cdot \text{с)}$$

Плотность ионизирующего излучения ($\lambda < 912 \text{ \AA}$) вблизи галактической плоскости (по-видимому, исключая области H I)

$$u_1 = 2 \cdot 10^{-15} \text{ эрг/см}^3$$

Полная мощность ионизирующего излучения от звезд вблизи галактической плоскости

$$\approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ эрг/(см}^3 \cdot \text{с)}$$

Спектральное распределение плотности излучения u_λ [1–4]

λ , мкм	u_λ , 10^{-14} эрг/(см ³ · мкм)
0,05	4 *
0,1	35
0,2	52
0,3	58

λ , мкм	u_λ , 10^{-14} эрг/(см ³ · мкм)
0,4	62
0,5	64
0,6	62
0,8	52

λ , мкм	u_λ , 10^{-14} эрг/(см ³ · мкм)
1,0	40
2	7
4	1
8	0,1

* По-видимому, исключая области H I.

Напряженность межзвездного магнитного поля

$$= 7 \cdot 10^{-6} \text{ Гс[6]}$$

Сравнение межзвездных плотностей энергии [1, 5]

Полное излучение от звезд	$0,7 \cdot 10^{-12}$ эрг/см ³
Турбулентное движение газа	$0,5 \cdot 10^{-12}$
Реликтовое излучение	$0,4 \cdot 10^{-12}$
Космические лучи	$1,6 \cdot 10^{-12}$
Магнитное поле	$1,5 \cdot 10^{-12}$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 123; 2, § 126.
2. Greenberg J. M., Astron. Ap., 12, 240 (1971).
3. Habing H. J., B. A. N., 19, 421 (1968).
4. Zimmermann H., A. N., 288, 99 (1964).
5. van de Hulst H. C., p. 9; Verschuur G. L., p. 150, in Interstellar Gas Dynamics, I. A. U. Symp., 39, 1970.
6. Davies R. D. et al., M. N., 126, 353 (1963).

§ 128. Космическое радиоизлучение

Частоту ν выражают в герцах, мегагерцах (10^6 Гц), гигагерцах (10^9 Гц). Длину волны λ выражают в метрах, сантиметрах.

$$\nu = 30\,000 \text{ МГц}/\lambda (\text{см}) = 300 \text{ МГц}/\lambda (\text{м})$$

S – плотность потока всего излучения
 S_ν – спектральная плотность потока излучения

Единица измерения величины S_ν – единица потока = 10^{-26} Вт/(м² · Гц)

Величины S , S_ν выражают мощность излучения на единицу площади около Земли. Они получаются интегрированием интенсивности излучения I по телесному углу ω :

$$S = \int I \cos \theta \, d\omega \approx \int I \, d\omega.$$

Однако интерферометрические измерения не всегда могут охватить внешние диффузные части источника.

Поверхностная интенсивность протяженного источника I связана с эквивалентной температурой T соотношением

$$I_\nu = 3,0715 \cdot 10^{-40} T_\nu \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{Гц}),$$

где T – температура в К, ν – частота в Гц. Интенсивности I и I_ν имеют две компоненты поляризации.

Распределение энергии по спектру можно представить с помощью спектрального индекса x :

$$\begin{aligned} \lg I_\nu \text{ или } \lg S_\nu &= x \lg \nu + \text{const} \\ I_\nu \text{ или } S_\nu &\propto \nu^x \propto \lambda^{-x} \\ T &\propto \nu^{x-2} \propto \lambda^{2-x} \end{aligned}$$

Замечание: спектральный индекс x иногда обозначается как $-a$ [4, №7], а иногда как $+a$ [4, № 10].

Звездная величина в радиодиапазоне m_ν (ν в мегагерцах) [5, 6]

$$\begin{aligned} m_\nu &= -53,45 - 2,5 \lg S_\nu \\ M_\nu &= m_\nu + 5 - 5 \lg d [d - \text{расстояние, пс}] \\ &= -48,45 - 2,5 \lg S_\nu - 5 \lg d \end{aligned}$$

Спектральный индекс x и ν_{\max} – частота, на которой величина S_ν достигает максимума [1]

	x	$\lg \nu_{\max}$
Средний галактический источник	около 100 МГц –0,71	1000 МГц
Средний внегалактический источник	–1,05	
Средний неотожествленный источник	–1,21	
Галактический экватор	–0,46	–0,48 7,0

Холодное небо, галактический полюс	-0,60	-0,58	6,5
Тепловое излучение оптически тонкого источника	0,00		
Тепловое излучение оптически толстого источника	+2,00		
Cas A	-0,80	-0,75	7,3
Cyg A	-0,70	-0,95	7,4
Tau A	-0,24	-0,25	
Туманность Ориона	+1,1	+0,47	9,7
Vir A	-0,83	-0,83	

Спектры хорошо наблюдаемых источников [8, 12, 17]

 $\lg S_\nu$ (S_ν в ед. потока)

Источник	$\lg \nu$ (ν в Гц)											
	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,3	9,7	10,0	10,3	10,7
Cas A	4,48	4,67	4,52	4,29	4,05	3,70	3,52	3,29	2,93	2,69	2,50	2,61
Cyg A	4,12	4,45	4,33	4,14	3,91	3,62	3,37	3,04	2,57	2,21		
Tau A			3,30	3,23	3,14	3,04	2,98	2,91	2,82	2,75	2,65	
Ori [12]					2,01	2,36	2,53	2,60	2,67	2,61	2,56	
Vir A [17]			3,50	3,26	3,01	2,68	2,42	2,19	1,83	1,60		

Избранные дискретные радиоисточники [1–4, 10, 13]

Источник	1950		S_ν , ед. потока			Размер	\lg (расстояние, пс)	Отождествление и примечания
	α	Δ	100	1000	10 000			
Cas B	00 ^h 23 ^m	+63° 52'	250	56		7'	3,5	Сверхновая Тихо Браге, SN I, 1572
And A	00 40	+41 00	190	60		140	5,8	Туманность Андромеды, M 31
	00 54	-73	400	100				Множественные области H II с эмиссией OH
	02 22	+61 51	100	100				
Per A	03 16	+41 19	130	20		2	7,9	Сейфертовская галактика NGC 1275
For A	03 20	-37 22	400	120		большой		Пекулярная галактика NGC 1316?
Per 3C 123	04 34	+29 34	280	70		1		Галактическая туманность, SNII
	04 58	+46 26	120	150		60 + h		
Pic A	05 18	-45 49	400	80		большой		
	05 21	-69	3 000	700				
Tau A	05 32	+21 59	1700	955	560	5	3,3	Крабовидная туманность, SN I. 1054
Туманность Ориона	05 33	-05 24	40	340	400	10	2,7	Туманность Ориона, M 42
Gem 3C 157	06 15	+22 38	400	180		30 + h	3,1	IC 443, SN II
Mon	06 29	+04 54	400	250		70	3,0	Туманность «Розетка»
Pup A	08 21	-42 58	600	150		40 + h	2,7	
	08 32	-45 37	500	200				Паруса X?
Hyа A	09 16	-11 53	400	60	10	1	8,4	
Car	10 43	-59 30	500	800			3,1	Туманность η Car
3C 273	12 27	+02 19	140	50		1		Ближайший квазар
Vir A	12 28	+12 40	1800	263	40	5	7,1	Пекулярная галактика с выбросом, M 87

Cen A	13 22	-42 46	3 000	2 000		5 + h	6,8	Пекулярная галактика NGC 5128
Cen B	13 30	-60	600	80				
Boo 3C 295	14 10	+52 26	100	30		1		Далекая галактика
TrA	16 10	-60 47	800	80				
3C 338	16 27	+39 39	80	7		1		4 галактики, NGC 6161
Her A	16 48	+05 04	700	70	8	3	8,6	Пекулярная галактика
	17 11	-38 25	400	100				
2C 1473	17 16	-00 55	400	80	10	4		Галактика
	17 22	-34 14	400	400	500			
2C 1485	17 28	-21 20	80	20		1	2,9	Сверхновая Кеплера, SN I, 1604
Sgr A	17 43	-28 56	4 000	2 000	200	70	3,9	Галактический центр, молекулярный спектр
Туманность «Гройная»	17 58	-23 24	800	300			3,0	Галактическая туманность, M 20
Туманность «Лагуна»	18 01	-24 22	70	150			3,1	Галактическая туманность, M 8
	18 02	-21 30	200	150				
Туманность «Омега»	18 18	-16 10	200	800	500	10	3,2	Галактическая туманность, M 17
	18 45	-02 06	500	300	250			
3C 392	18 54	+01 16	500	210		16		Оболочка сверхновой
3C 398	19 08	+09 01	40	70		3		SNII, область эмиссии OH
3C 400	19 21	+14 20	400	400		60		
Cyg A	19 58	+40 35	13 800	2 340	163	1,2	8,5	Радиогалактика
	20 21	+40 12	200	400		60		
Cyg X	20 34	+41 40	150	500	50	40	3,1	Система вблизи γ Cyg?
2C 1725	20 44	+50	400	150		100		SN II
Петля в Лебеде	20 49	+30	400	200		150	2,7	Остаток сверхновой, SN II
Туманность «Америка»	20 52	+43 54	700	500		150	2,9	Галактическая туманность
3C 446	22 23	-05 12	30	6				Квазар
Cas A	23 21	+58 32	19 500	3 300	490	4	3,4	Галактическая туманность, SN II

Приведенные в таблице дискретные радиоисточники обозначаются различными названиями, каталожными номерами и координатами α и δ . Некоторые источники имеют центральное ядро и протяженное гало (+h в столбце «размер»). Обычно излучение от гало наблюдается только на высоких частотах. Среди отождествлений – несколько остатков сверхновых I и II типов, пекулярные галактики, галактические туманности.

Функция светимости радиогалактик [6, 7]

P_{408} – мощность радиоизлучения источника на частоте 408 МГц

P_{408} , Вт/(Гц · ср)	10^{20}	10^{21}	10^{22}	10^{23}	10^{24}	10^{25}
lg (число источников) в $1/(\text{Мпс}^3 \cdot 10^{+P})$	-2,3	-2,3	-3,6	-4,5	-5,1	-6,2

Интенсивность диффузного радиоизлучения [1, 9, 10, 14–16, 19]

- I_v – интенсивность, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср}$)
 Диск – плоскость Галактики, $b^{\text{II}} = 0$, $l^{\text{II}} = \pm 10^\circ$ (т. е. вне галактического центра)
 Полюс – область неба вблизи $b^{\text{II}} = \pm 90^\circ$
 $J_v = \bar{I}_v$ – интенсивность, усредненная по всему небу [20]

lg I_v [I_v в Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср}$)]

Область неба	lg v [v в Гц]											
	6,0	6,3	6,7	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,3	9,7
Диск	-19,6	-19,4	-19,2	-19,2	-19,2	-19,4	-19,5	-19,7	-19,9	-20,0	-20,2	-20,3
Полюс	-20,3	-20,1	-20,1	-20,2	-20,3	-20,5	-20,7	-20,9	-21,1	-21,3		
J_v	-20,2	-19,6		-19,8			-20,45			-21,25		

Распределение усредненной интенсивности радиоизлучения вдоль галактического экватора [1, 18]

Интенсивность галактического центра принята за 100

l^{II}	0° 360°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
I	100	70	31	24	20	18	14	13	13	19	31	77

Экспоненциальный коэффициент поглощения нейтрального водорода на частоте 1420 МГц равен $8,0 \cdot 10^3 (N/T\Delta\nu) \text{ пс}^{-1}$, где N – число атомов водорода в 1 см^3 , T – температура, К, $\Delta\nu$ – ширина линии поглощения, Гц.

Экспоненциальный коэффициент непрерывного поглощения в плазме (при межзвездных плотностях)

$$= 5,4 \cdot 10^{-4} \lambda^2 N_e^2 T^{-3/2} \text{ пс}^{-1}$$

[λ в см, N_e в см^{-3} , T в К]

Оптическая толщина области Н II

$$= 5,4 \cdot 10^{-4} \lambda^2 T^{-3/2} \times \text{ME}$$

Звезды и рентгеновские источники, имеющие радиокомпоненты [11]:

α Sco, Cyg X – 1, β Per, β Lyr.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 124; **2**, § 127.
2. Dickson R. S., Ap. J. Supp., **20**, 1 (1970).
3. Gait J., Observers Handb., R. A. S. Canada, 1972, p. 95.
4. Parks Catalogue, Aust. J. Phys., Nos. **7**, 10 (1969).
5. Hanbury Brown R., Hazard C., M. N., **122**, 479 (1961).
6. Cameron M. J., M. N., **152**, 403, 429 (1971).
7. Wilson M. A. G., M. N., **151**, 1 (1970).
8. Parker E. A., M. N., **138**, 407 (1968).
9. Bundle A. H., M. N., **136**, 219 (1967).
10. Yates K. W., Wielebinski R., Ap. J., **149**, 439 (1967).
11. Wade C. M., Hjellming R. M., Ap. J., **163**, L105 (1971); Nature, **253**, 247 (1972).
12. Baars J. W. M. et al., Z. Ap., **61**, 134 (1965).
13. Bennett A. S., 3C cat., Mem. R. A. S., **67**, 163 (1962).
14. Smith F. G., M. N., **131**, 145 (1965).
15. Purton C. R., M. N., **133**, 463 (1966).
16. Huguenin G. R. et al., Planet Space Sci., **12**, 1157 (1964).
17. Conway R. G. et al., M. N., **125**, 261 (1963).
18. Paulini-Toth I. I. K., Shakeshaft J. R., M. N., **124**, 61 (1962).
19. Daniel R. R., Stephens S. A., Space Sci. Rev., **10**, 599 (1970).
20. Lequeux J., Ann. d'Ap., **26**, 429 (1963).

§ 129. Космическое рентгеновское излучение

Кванту рентгеновского излучения с энергией 1 кэВ соответствуют

энергия	$\epsilon_0 = 1,602 \cdot 10^{-9}$ эрг
частота	$\nu = 2,418 \cdot 10^{17}$ Гц
	$1/\lambda = 8,066 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$
длина волны	$\lambda = 12,398 \text{ \AA}$

Интенсивность диффузного рентгеновского излучения [5–8]

$I(\epsilon)$ – интенсивность излучения в кэВ/($\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с} \cdot \text{кэВ}$)

$P(\epsilon)$ – интенсивность излучения в фотон/($\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с} \cdot \text{кэВ}$)

$\lg \epsilon$ (в кэВ)	-1	0	1	2	3	4	5	6
$\lg I(\epsilon)$	+2,0	+1,2	+0,5	-0,6	-1,8	-2,7	-4	-5
$\lg P(\epsilon)$	+3,0	+1,2	-0,5	-2,6	-4,8	-6,7	-9	-11

О поглощении рентгеновского излучения нейтральным межзвездным газом см. в § 126.

Поток излучения от источника $f(\epsilon)$ выражают в кэВ/($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кэВ}$).

Избранные источники рентгеновского излучения [1–4]

Название		1950		l''	b''	$\lg f(\epsilon)$ вблизи 10 кэВ [в $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$]	Объект
		α	δ				
Tau	X-1	$5^{\text{h}} 31^{\text{m}}$	$+22,0^\circ$	184°	-6°	0,0	Крабоидная туманность SN I Радиогалактика. М 87
Vir A		12 31	$+12,5$	286	+74	-1,5	
Cen	X-1	13 15	$-62,0$	306	0	-0,4	Слабая голубая переменная
Sco	X-1	16 18	$-15,5$	359	+23	+0,9	
Sco	X-2	16 50	-39	346	+2	-0,1	
Ara	X-1	16 52	-46	340	-2	-0,6	
Sgr	X-1	17 58	-25	5	-1	0,0	
Sgr	X-2, X-3	18 05	-19	11	+1	-0,7	
Ser	X-2	18 13	$-13,8$	17	+2	-0,6	
Ser	X-1	18 45	$+5,3$	37	+3	-0,3	
Cyg	X-1	19 56	$+35,1$	71	+3	-0,3	
Cyg	X-3	20 31	$+40,9$	80	+1	-1,0	
Cyg	X-2	21 43	$+38,2$	87	-11	-0,8	Слабая голубая переменная Остаток сверхновой II типа
Cas A	X-1	23 21	$+58,5$	112	-2	-1,5	

Распределение потока $f(\epsilon)$ по спектру [1, 2, 4]

В таблице приведены значения $\lg f(\epsilon)$, где поток $f(\epsilon)$ выражен в кэВ (энергия) / $[\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кэВ}(\text{спектр})]$.

Источник	Спектральная область, кэВ									
	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Крабоидная туманность	+1,14	+0,88	+0,34	-0,03	-0,51	-1,03	-1,43	-1,86	-2,5	-3,0
Sco X-1	+1,8	+1,6	+1,3	+0,9	+0,1	-1				
Cen X-2	+0,1	+0,2	-0,1	-0,4	-0,8	-1,4	-1,8			
Vir A	-0,5	-0,8	-1,2	-1,5	-1,7	-1,9	-2,1			
Ara X-1	-1,3	-0,2	+0,1	-0,6						
Cyg X-1	+0,1	0,0	-0,2	-0,3	-0,5	-0,9	-1,3	-1,7	-2,2	
X-2	0,0	+0,1	-0,2	-0,8						
X-3	-1,1	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,4	-1,6			

ЛИТЕРАТУРА

1. Morrison P., Ann. Rev. Astron. Ap., **5**, 325 (1967).
2. Webber W. R., Proc. Astron. Soc. Australia, **1**, 160 (1968).
3. Kellogg E. M., Catalogue of X-ray sources, Am. Sci. and Eng., 1969, p. 2357.
4. Peterson, p. 59; Adams et al., p. 82; Rao et al., p. 88; Agrewal et al., p. 94; Hayakawa et al., p. 121; Woltjer, p. 208 in Non solar X and γ ray astronomy, I. A. U. Symp., **37**, 1970.
5. Oda M., p. 260; Clark et al., p. 269, in Non solar X and γ ray astronomy, I. A. U. Symp., **37**, 1970.
6. Silk J., Space Sci. Rev., **11**, 671 (1970).
7. Schwartz D. A. et al., Ap. J., **162**, 431 (1970).
8. Webster A. S., Longair S. M., M. N., **151**, 261 (1971).

§ 130. Космические лучи

Кинетическая энергия частиц космических лучей T часто выражается через жесткость R :

$$T = mc^2 [(1 - v^2/c^2)^{-1/2} - 1]$$

$$R = \frac{pc}{ze} = \frac{1}{ze} (T^2 + 2mc^2T)^{1/2},$$

где p – импульс $= mv (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, ze – заряд, v – скорость, mc^2 – энергия покоя.

Соотношения между различными потоками частиц [1, 2]

lg T (в эВ)	Геомагнитные частицы			Потоки полярных областей			Космические лучи		
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Протоны</i>									
lg R (в вольтах)	6,14	6,64	7,14	7,64	8,15	8,65	9,23	10,04	11,00
$v, 10^8$ см/с	0,44	1,4	4,4	14	44	133	255	300	300
Магнитная широта обрезания потока	85°	83°	80°	77°	72°	65°	54°	18°	0°
Высота проникновения, км		128	110	90	67	32	6	0	0
<i>Электроны</i>									
lg R (в вольтах)	4,50	5,00	5,52	6,15	7,02	8,01	9,00	10,00	11,00
$v, 10^8$ см/с	19	60	170	280	300	300	300	300	300
Магнитная широта обрезания потока		87°	86°	84°					
Высота проникновения, км	128	103	80	57					
<i>α-частицы</i>									
lg R (в вольтах)				7,64	8,15	8,7	9,4	10,1	11,0

Распределение частиц в первичных космических лучах по энергиям [1, 3, 8]

lg T (в ГэВ)	-1,7	-1,3	-1,0	-0,7	-0,3	0,0	+0,3	+0,7	+1,0
Частицы/м ² · с · ср · ГэВ)									
Космические	2,4	2,7	3,0	3,2	3,2	3,0	2,6	1,9	1,4
Вблизи Земли, при минимуме солнечных пятен					2,5	2,6	2,5	1,9	1,3
Вблизи Земли, при максимуме солнечных пятен					1,7	2,1	2,2	1,7	1,2
α -частицы, космические	2,2	2,3	2,4	2,4	2,2	1,9	1,5	0,9	0,4

Радиус кругового движения в магнитном поле

$$a = 3,34 \cdot 10^{-3} R/B \text{ см [R в вольтах, B в гауссах]}$$

Поток космических лучей, падающий на единицу поверхности вне влияния магнитного поля Земли [1]

При минимуме солнечных пятен

$$\begin{aligned} \text{число частиц} &= 0,6 \text{ первичных частиц / (см}^2 \cdot \text{с)} \\ \text{энергия} &= 5 \text{ ГэВ / (см}^2 \cdot \text{с)} = 0,007 \text{ эрг / (см}^2 \cdot \text{с)} \end{aligned}$$

При максимуме солнечных пятен

$$\begin{aligned} \text{число частиц} &= 0,3 \text{ первичных частиц / (см}^2 \cdot \text{с)} \\ \text{энергия} &= 3 \text{ ГэВ / (см}^2 \cdot \text{с)} = 0,004 \text{ эрг / (см}^2 \cdot \text{с)} \end{aligned}$$

Плотность первичных космических лучей в пространстве [1, 3]

$$\begin{aligned} \text{число частиц} &= 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ частиц/см} \\ \text{энергия} &= 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг/см}^3 \end{aligned}$$

Средняя энергия частиц космических лучей [1, 3]

$$= 10 \text{ ГэВ} = 0,016 \text{ эрг}$$

Частицы высоких энергий [1, 10]

В таблице приведен lg I, где I – поток (или интенсивность) на (м² · с · ср) частиц, имеющих энергию T > T₁

lg T ₁ (в эВ)	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
lg I (T > T ₁) [в 1/(м ² · с · ср)]	+3,3	+2,5	+1,1	-0,4	-1,9	-3,7	-5,5	-7,6	-9,8	-12

Интенсивности больших солнечных протонных вспышек [1]

Частицы с T > T₁

lg T ₁ (в эВ)	6	7	8	9
lg I (T > T ₁) [в 1/(м ² · с · ср)]	8,2	7,5	5,7	2

Интенсивность потока электронов в космических лучах [3, 6]

 I_e – интенсивность потока электронов с $T > T_1$

$\lg T$ (в ГэВ)	-3,0	-2,7	-2,3	-2,0	-1,7	-1,3
$\lg I_e$ [в $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ})$]	4,8	4,6	4,1	3,5	2,9	2,3

$\lg T$ (в ГэВ)	-1,0	-0,7	-0,3	0,0	+0,3	+0,7
$\lg I_e$ [в $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ})$]	2,1	1,9	1,7	1,4	1,0	0,2

$\lg T$ (в ГэВ)	+1,0	+1,3	+1,7	+2,0	+2,3	+2,7
$\lg I_e$ [в $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ})$]	-0,5	-1,5	-2,5	-3,2	-4,0	-5,4

Распространенность A атомных ядер в космических лучах (CR)

Она дана в сравнении со стандартной распространенностью из § 14 и уравнена с ней для Si [3, 8, 9, 11]

Элемент	H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
$\lg A$ (CR)	10,8	10,0	7,6	7,4	7,8	8,3	7,8	8,2	6,7	7,4
(стандартная)	12,0	10,9	0,7	1,1	2,5	8,5	8,0	8,8	4,6	7,9

Элемент	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca
$\lg A$ (CR)	7,0	7,6	6,9	7,5	6,3	6,8	6,2	6,6	6,4	6,7
(стандартная)	6,3	7,4	6,4	7,5	5,5	7,2	5,6	6,8	5,0	6,3

Элемент	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
$\lg A$ (CR)	6,3	6,7	6,5	6,9	7	7,4	6	6	5	5
(стандартная)	3,2	5,1	4,4	5,9	5,4	7,6	5,1	6,3	4,5	4,2

Время, за которое космические лучи покидают Галактику [8]

$$= 2 \cdot 10^6 \text{ лет.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 125; **2**, § 128.
2. Carmichael H., Ann. I. Q. S. Y., **4**, 141 (1969).
3. Meyer P., Ann. Rev. Astron. Sp., **7**, 1 (1969).
4. Bailey D. K., Planet. Space Sci., **12**, 495 (1964).
5. Meyer P., Muller D., E. Fermi Inst. Preprint, 71–56 (1971).
6. Daniels R. R., Stephens S. A., Space Sci. Rev., **10**, 599 (1970).
7. Fanselow J. L. et al., Ap. Space Sci., **14**, 301 (1971).
8. Cowsik R., Price P. B., Phys. Today, **24**, 30 (1971).
9. Cartwright B. G. et al., E. Fermi Inst. Preprint, 71–62 (1971).
10. Parker E. N., Nebulae and Interstellar Matter, ed. Middlehurst, Aller, Chicago, 1968, p. 707.
11. Aller L. H., Sky and Telescope, **43**, 362 (1972).
- 12*. Гинзбург В. А., Сыроватский С. И., Происхождение космических лучей, Изд-во АН СССР, М., 1963.

Скопления и галактики

§ 131. Рассеянные скопления и звездные ассоциации

Звездные ассоциации, движущиеся скопления или группы звезд иногда связаны с рассеянными скоплениями в качестве их ядер. Различные группировки не всегда можно четко разделить. В настоящее время известно около 1000 рассеянных скоплений, .50 O-ассоциаций, 25 T-ассоциаций и 10 движущихся скоплений или групп [2, 3].

O-ассоциации [1, 16, 17]

Ассоциация [16]	l^{II}	b^{II}	Число звезд	Расстояние, пс [1, 17, 19]	Объекты, связанные с ассоциацией (номера NGC)
III + VII Cas	125°	-01°	30	2700	381, 366
I Per	135	-05	180	1900	h и χ Per
II Per	160	-18	100	350	ζ Per
I Aur	173	0	15	1100	χ Aur
I Ori	206	-18	1000	470	1976, ϵ Ori
II Mon	202	+01	50	510	2264
I Mon	205	0		1000	2244
I Car	288	-01	90	200	3293, I 2602
I Sco	343	+01	70	1300	6231
I + II Sgr	7	-01	60	1300	6514
IV Sgr	14	0	120	1700	6561
II Cyg	76	+02	200	1800	6871, I 4996, PCyg
I Cep	101	+05	80	800	ν Cep
I Lac	98	-15	70	520	10 Lac
III + IV Cep	108	+01	150	1000	7380
I + V Cas	111	0	160	2700	7510

T-ассоциации [1, 18, 19]

Ассоциация	l^{II}	b^{II}	Число звезд	Диаметр	Расстояние, пс	Объекты, связанные с ассоциацией
Tau T1	169°	-16°	12	3°	180	RY Tau
Tau T2	179	-20	10	5	190	T Tau
Aur T1	172	-07	13	7	170	RW Aur
Ori T1	192	-12	40	4	490	CO Ori
Ori T2	209	-19	400	4	430	T Ori
Mon T1	203	+02	140	3	800	S Mon, NGC 2264
Ori T3	206	-17	90	4	390	σ , ζ Ori, I 434
Sco T1	354	+20	30	9	220	α Sco, ρ Oph
Del T1	55	-09	25	15	200	V 536 Aql, WW Vul
Per T2	161	-18	16	0,5	350	I 348, ζ Per

Радянты движущихся скоплений [1, 18]

Скопление, ассоциация или группа	Радянты относительно Солнца				Скорость км/с	
	α	δ	l^{II}	b^{II}	относительно Солнца	исправленная
Персей	103°	-24°	234°	-09°	24	12
Плеяды	85	-43	248	-30	20	5
Гиады	93	+12	198	-02	42	30
Орион	85	-18	221	-23	21	6
Ясли	95	+4	207	0	41	28
Скорпион – Центавр	109	-47	258	-15	25	13
Волосы Вероники	121	-47	262	-08	8	14
Большая Медведица, группа Сириуса	305	-37	5	-31	19	28

Избранные рассеянные скопления

Угловые и линейные диаметры относятся к наиболее плотным частям скоплений

Числа звезд получены из каталогов и не учитывают более слабые звезды

Название или обозначение	NGC или IC	Координаты		Расстояние, пс	Диаметр		Число звезд	Интегральная звездная величина m_V	Поглощение A_V	lg (возраст в годах)
		l^{II}	b^{II}		угловой	линейный, пс				
					[1, 4, 5, 9, 15, 18]		[1, 10]	[1, 4, 11, 15]		[1, 4, 12–14]
M 103	188	123°	+22°	1400	14'	6		9,3	0,2	10,0
	581	128	-02	2300	7	5	30	6,9	1,3	7,2
	752	137	-23	380	45	5	60	6,2	0,1	9,0
h Персея	869	135	-04	2250	25	16	300	4,1	1,7	7,0
χ Персея	884	134	-04	2400	20	14	240	4,3	1,7	7
Stock 2		133	-02	320	50	5	120	7	1,3	8,1
M 34	1039	144	-16	440	30	4	60	5,6	0,2	8,1
Персей		147	-06	167	240	12	80	2,2	0,3	7,0
Плеяды		167	-23	127	120	4	120	1,3	0,2	7,7
Гиалды [6–8]		179	-24	42	400	5	100	0,6	0,0	8,8
M 38	1912	172	+01	1200	18	7	100	7,0	0,7	7,6
M 36	1960	174	+01	1260	16	6	50	6,3	0,7	7,5
M 37	2099	178	+03	1200	24	8	200	6,1	1,0	8,2
S Единорога	2264	203	+02	740	30	6	60	4,3	0,2	6,8
τ Большого Пса	2362	238	-06	1500	8	3	30	3,9	0,4	6,7
Ясли	2632	206	+32	159	90	4	100	3,7	0,0	8,6
o Парусов	I 2391	270	-07	157	45	2	15	2,6	0,1	7,4
M 67	2682	216	+32	830	18	4	80	6,5	0,2	9,6
θ Киля	I 2602	290	-05	155	65	3	25	1,7	0,1	7,1
	3532	290	+02	420	55	7	130	3,3	0,0	8,2
Скорпион–Центавр *)		330	+15	170	2000	100	110	-0,8		7
Волосы Вероники		221	+84	80	300	7	40	2,8	0,0	8,7
κ Южного Креста	4755	303	+02	1100	12	4	30	5,0	0,9	7
Большая Медведица		130	+60	21	1000	7	100	-0,2	0,0	8,2
M 21	6531	8	0	1250	12	4	40	6,8	0,9	7,1
M 16	6611	17	+01	2100	8	5	40	6,6	2,2	6,5
M 11	6705	27	-03	1710	12	6	80	6,3	1,1	7,9
M 39	7092	92	-02	255	30	2	20	5,1	0,2	8,0

*) В-звезды в Скорпионе–Центавре приведены в качестве скопления, так как они не вошли в список O-ассоциаций.

Возраст скопления можно определить из диаграмм цвет – звездная величина или спектр – звездная величина по положению начала отклонения главной последовательности скопления от начальной главной последовательности [20].

Связь между характеристиками главной последовательности скопления (MS) и его возрастом [1, 20]

lg (возраст в годах)	6	7	8	9	10
M_V наиболее яркой звезды на MS	-7	-4	-1	+2	+4
Самый ранний спектральный класс на MS	O6	B1	B7	A5	F2
Наименьшее значение $(B-V)_0$ на MS	-0,31	-0,23	-0,05	+0,30	+0,7

Медианная галактическая широта скоплений [1]

$$\bar{b} = 3,3^\circ$$

Среднее расстояние от галактической плоскости [1, 18]

$$\bar{z} = 70 \text{ пс}$$

Полное число скоплений в Галактике [1, 18]

$$\approx 18\,000$$

Пространственное распределение рассеянных скоплений [1]

Расстояние от галактической плоскости, кпс	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Число скоплений в 1 кпс ³	400	120	30	15	8	4

Число звезд $N (M_* < G)$ в скоплении радиуса R пс [21]

$$\lg N = 1,3 \lg R + 2,0$$

Предел плотности для устойчивого скопления [22]

$$\text{Средняя плотность скопления} > 0,09 \mathcal{M}_\odot / \text{пс}^3$$

Время распада скопления [23] = $2 \cdot 10^8 \rho$ года, где ρ – плотность скопления в $\mathcal{M}_\odot / \text{пс}^3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 127; 2, § 130.
2. Alter G., Ruprecht J., Vanysek V., Catalogue of Clusters and Associtiaons (+ supplements), Prague, 1958 [+].
3. 2nd edition of above, ed. Alter Q., Balazs B., Ruprecht J., Budapest, 1970.
4. Becker W., Fenkart R., Astron. Ap. Supp., 4, 241 (1971).
5. Hoag A. A., Applequist N. L., Ap. J. Supp., 12, 215 (1965).
6. Hodge P. W., Wallerstein G., Publ. A. S. P., 78, 411 (1966).
7. Wayman P. A., Publ. A. S. P., 79, 156 (1967).
8. Upton E. K. L., A. J., 75, 1097 (1970).
9. Lohmann W., A. N., 292, 193 (1971).
10. Collinder P., Lund. Ann., 2 (1931).
11. Hogg H. S., Handb. Phys., 53, 129 (1959).
12. Sears R. L., Brownlee R. R., in Stellar Structure, ed. Aller. McLaughlin, Chicago, 1965, p. 620. (Русский перевод: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Аллера, Д. Б. Мак-Лафлина, изд-во «Мир», М., 1970.)
13. Lindoff U., Ark. Astron., 5, 1, 45, 63 (1968).
14. van den Heuvel E. P. H., Publ. A. S. P., 81, 815 (1969).
15. Buscombe W., Mem. Stromlo, 6 (1963).
16. Schmidt K. H., A. N., 284, 76 (1958).
17. Blaauw A., Ann. Rev. Astron. Ap., 2, 213 (1964).
18. Beyer M., p. 558; Haffner H., p. 597; Strassl H., p. 630, in Landolt-Börnstein Tables, Grup VI, 1, Springer, 1965.
19. Lesh J. R., Ap. J. Supp., 17, 371 (1969).
20. Sandage A., Stellar Population, ed. O'Connell, Vatican, 1958, p. 41.
21. Cuffey J., Harv. Ann., 106, 39 (1939).
22. Trumpler R. J., Lick Obs. Bull., 18, No. 494, 167 (1938).
23. Spitzer L., Ap. J., 127, 17 (1958).
24. Kreminski W., Serkowski K., Ap. J., 147, 988 (1967).

§ 132. Шаровые скопления

Число известных шаровых скоплений, связанных с Галактикой

$$= 125$$

Оценка полного числа шаровых скоплений в Галактике [11]

$$\approx 500,$$

из них 160 принадлежат к типу плотных скоплений которые мы можем наблюдать.

Число звезд в шаровом скоплении от 10^5 до 10^7

Средний спектральный класс шаровых скоплений

$$F8$$

Средний показатель цвета, исправленный за межзвездное поглощение [2]

$$(B - V)_0 = + 0,65$$

Диаграммы цвет – звездная величина для разных шаровых скоплений сильно различаются.

Средние значения см. в § 98.

Медианное значение M_V для шаровых скоплений

$$\bar{M}_V = - 8,4$$

Медианная галактическая широта наблюдаемых скоплений

$$\bar{b} = 14^\circ$$

Шаровые скопления не наблюдаются в области $-2^\circ < b < +2^\circ$, из-за межзвездного поглощения.

Распределение шаровых скоплений [1, 4, 11]

Расстояние от галактического центра, кпс	1	2	5	10	20	50
Логарифм числа шаровых скоплений в 1 кпс ³	-0,4	-0,9	-1,6	-2,4	-3,7	-6

Избранные шаровые скопления

Приведенные угловые и линейные диаметры являются характерными (см. § 6). В таблице также даны: расстояние, интегральная визуальная звездная величина V_t , поглощение в визуальной области A_V , число наблюдаемых переменных (преобладают звезды типа RR Лиры), лучевая скорость и масса.

Скопление	NGC	Координаты		Диаметр		Расстояние, кпс	V_t	A_V	Число переменных	v_r , км/с	Масса, $10^4 M_\odot$
		l''	b''	угловой	линейный, пс						
		[1]		[1-3]		[1-3]		[1, 3, 8]	[1, 3, 4]	[1, 9]	
47 Tuc	104	306°	-45°	7,6'	10	5,1	4,0 ^m	0,2 ^m	11	-24	
	2419	180	+25	1,9	32	6,5	10,7	0,3	36	+14	
Δ 445	3201	277	+09	8	9	4,1	8,0	1,8	80	+490	
M 68	4590	300	+36	2,2	8	11,8	8,3	0,4	35	-116	
M 53	5024	333	+80	2,9	19	21	7,8	0,0	43	-112	
ω Cen	5139	309	+15	14,2	20	5,0	3,6	1,1	164	+230	
M 3	5272	42	+79	3,4	13	13	6,4	0,1	190	-150	21
M 5	5904	4	+47	4,5	12	8,5	5,9	0,0	98	+48	6
M 4	6121	351	+16	9,8	9	2,8	6,0	1,3	43	+65	6
M 13	6205	59	+41	4,8	11	7,7	5,9	0,2	10	-240	30
M 12	6218	16	+26	6,9	14	5	6,7	0,8	1	-10	
M 62	6266	354	+07	3,3	8	8	6,7	1,6	50	-80	
M 19	6273	357	+10	3,5	7	7	6,9	1,3	4	+100	
M 92	6341	68	+35	3,3	10	10	6,5	0,1	16	-120	14
Δ 366	6397	336	-11	10	7	2,4	6,1	1,2	3	+11	
M 22	6656	10	-08	10	9	3,0	5,1	1,3	24	-145	700
M 55	6809	9	-23	8,2	16	6	6,3	0,1	6	+170	
M 71 [12]	6838	57	-05	4,1	5	4,5	8,3		4	-80	
	7006	64	-19	1,2	17	50	10,7	0,3	45	-350	
M 15	7078	65	-27	2,8	11	14	6,4	0,3	100	-110	600

Средняя скорость вращения системы шаровых скоплений [11]

$$\approx 60 \text{ км/с (вращение прямое)}$$

Наблюдается нечеткая зависимость скорости вращения от расстояния до галактического центра.

Среднее значение отношения масса/светимость [1].

$$M/L = 0,8 M_{\odot} / L_{\odot}$$

Возраст шаровых скоплений

Логарифм возраста в годах	9,9	10,0	10,1	10,2
Примеры [5, 12]	M 71	47 Tuc M 15 M 13 M 5.	M 92 M 3 NGC 5466	ω Cen

Однако есть предположения, что конденсация Галактики и формирование всех шаровых скоплений произошли около 10^{10} лет назад [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 128; 2, § 131.
2. Kron G. E., Mayall N. U., A. J., 65, 581 (1960).
3. Haffner H., Landolt-Börnstein Tables, Group VI, 1, Springer, 1965, p. 582.
4. Schmidt-Kaler Th., Obs. Handb. R. A. S. Canada, 1972, p. 93.
5. Thanert W., A. N., 292, 251 (1971).
6. Arp. H. C., Hartwick F. D. A., Ap. J., 167, 499 (1971).
7. Sandage A., Ap. J., 162, 841 (1970).
8. Wallerstein G., Ap. J., 160, 345 (1970).
9. Kurth R., Z. Ap., 28, 1 (1950); 29, 26 (1951).
10. Alter, Ruprecht, Vanýsek, Catalogue of Star Clusters, 2nd ed., Budapest, 1970
11. Schmidt M., B. A. N., 13, 15 (1956).
12. Arp H. C., Hartwick F. D. A., Ap. J., 167, 499 (1971).
- 13*. Кукаркин Б. В., Исследование строения и развития звездных систем на основе изучения переменных звезд, Гостехиздат, М. – Л., 1949.

§ 133. Местная система (пояс Гулда)

Пояс Гулда представляет собой язык, отходящий от нижнего края рукава Галактики, расположенного в Орионе [2, 3].

Протяженность системы [3] = 700 пс

Толщина системы = 70 пс

Направление на северный полюс системы [3]

$$l^{\text{II}} = 202^{\circ} \quad b^{\text{II}} = 72^{\circ}$$

Расстояние Солнца от центра системы [1]

$$\approx 100 \text{ пс}$$

Расстояние Солнца от плоскости системы [1]

$$\approx 12 \text{ пс к северу от плоскости}$$

Направление на центр системы $l^{\text{II}} = 270^{\circ} \quad b^{\text{II}} = -3^{\circ}$

Время расширения [2, 4] = $40 \cdot 10^6$ лет

Масса системы [2, 6] = $2 \cdot 10^5 M_{\odot}$

Интегральная абсолютная звездная величина системы [1]

$$M_V = -13$$

Состав системы [1, 2]:

Яркие O-B5 звезды внутри 400 пс

A-звезды из каталога HD

Диффузные туманности, протяженные темные туманности, нейтральный водород

Звездные ассоциации: I Ori, II Per, Sco-Cen

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 129; **2**, § 132.
2. Clube S. V. M., Observatory, **86**, 183 (1966); M. N., **137**, 189 (1967).
3. Dewhirst D. W., Observatory, **86**, 182 (1966).
4. Lesh I. R., Ap. J. Supp., **17**, 371 (1968).
5. Mumford G. S., Sky and Telescope, **16**, 214 (1957).
6. Davies R. D., M. N., **120**, 483 (1960).

§ 134. Галактика

Диаметр	= 25 кпс
Диаметр протяженной сферической системы	= 30 кпс
Толщина	= 2 кпс
Полная масса [1–3]	= $1,4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$
Абсолютная звездная величина (если смотреть со стороны галактического полюса)	
	$M_V = -20,5$

Ольсоновский галактический полюс, определяющий старую систему галактических координат, которые теперь обозначаются l^I, b^I

$$\alpha = 12^{\text{h}} 40^{\text{m}} = 190,0^{\circ} \quad \delta = +28,0^{\circ} \quad (1900)$$

Восходящий узел на экваторе (при $\alpha = 280,00^{\circ} + 1,23^{\circ} T$) определяет $l^I = 0$ (T – число столетий от 1900 года).

Новая галактическая система координат, принятая МАС, l^{II}, b^{II} [4]

$$\begin{aligned} \alpha &= 12^{\text{h}} 46,6^{\text{m}} = 191^{\circ} 39' & \delta &= +27^{\circ} 40' & (1900) \\ \alpha &= 12^{\text{h}} 49,0^{\text{m}} = 192^{\circ} 15' & \delta &= +27^{\circ} 24,0' & (1950) \\ l^I &= 347^{\circ} 40' & b^I &= +88^{\circ} 31' \end{aligned}$$

Точка с нулевой широтой и долготой ($l^{II} = 0, b^{II} = 0$) [4]

Эта точка соответствует положению галактического центра.

$$\begin{aligned} \alpha &= 17^{\text{h}} 39,3^{\text{m}} = 264^{\circ} 50' & \delta &= -28^{\circ} 54' & (1900) \\ \alpha &= 17^{\text{h}} 42,4^{\text{m}} = 265^{\circ} 36' & \delta &= -28^{\circ} 55' & (1950) \\ l^I &= 347^{\circ} 41' & b^I &= -1^{\circ} 24' \\ & & &= -32^{\circ} 19' \end{aligned}$$

Галактическая долгота северного полюса (1950)

$$\theta = 123,00^{\circ}$$

Это направление определяет начало отсчета l^{II} .

Восходящий узел галактической плоскости на экваторе 1950 г.

$$\begin{aligned} \alpha &= 18^{\text{h}} 49,0^{\text{m}} = 282^{\circ} 15' \\ l^{II} &= 33,00^{\circ} \\ \text{наклонение} &= 62^{\circ} 36,0' \end{aligned}$$

Расстояние Солнца от галактического центра [2, 5–7]

$$R_0 = 10,0 \pm 0,8 \text{ кпс}$$

Расстояние Солнца от галактической плоскости [1, 4]

$$z_0 = 8 \pm 12 \text{ пс к северу от плоскости}$$

Постоянные Оорта в теории галактического вращения [1, 5, 6, 8]

$$\begin{aligned} A &= +15,0 \pm 0,8 \text{ км/(с} \cdot \text{кпс)} \rightarrow P = 0,32'' \text{ за столетие} \\ B &= -10,0 \pm 0,8 \text{ км/(с} \cdot \text{кпс)} \rightarrow Q = -0,21'' \text{ за столетие} \\ A - B &= 25 \pm 1 \text{ км/(с} \cdot \text{кпс)} \\ P - Q &= \omega = 0,53'' \text{ за столетие} \end{aligned}$$

Скорость вращения в окрестностях Солнца

$$v_c = R_0 (A - B) = 250 \text{ км/с}$$

Потенциальная энергия галактической системы [8]

$$= 1,5 \cdot 10^{59} \text{ эрг}$$

Скорость освобождения [1, 2, 9, 12]

для галактического центра	= 700 км/с
для окрестностей Солнца	= 360 км/с
для края Галактики	= 240 км/с

Средняя яркость неба в направлении на галактический полюс

$$= 43 \text{ звезды } (V = 10) \text{ на кв. град.}$$

$$m_V = 5,9 \text{ на кв. град.}$$

$$= 23,7 \text{ на кв. сек.}$$

Поверхностная яркость Галактики вблизи Солнца при наблюдении вне Галактики вдоль направления на полюс

$$m_V = 5,2 \text{ на кв. град.}$$

Оптическая толщина Галактики (от полюса до полюса вблизи Солнца) для случайного направления [1, 10, 11]

$$2\tau_0 = 0,72^m (V)$$

$$= 0,94^m (B)$$

Поглощение для случайно выбранных внегалактических объектов

$$= \tau_0 \operatorname{cosec} b$$

Эффективная толщина Галактики (от полюса до полюса вблизи Солнца), определяемая межзвездным поглощением

$$= 300 \text{ пс}$$

Расположение спиральных рукавов [1, 13].

Спиральные рукава определяются положением рассеянных скоплений, O-ассоциаций, областей H II и областей межзвездного поглощения.

Длина перпендикуляра между спиральными рукавами

$$\approx 1,6 \text{ кпс}$$

Толщина рукава

$$= 0,6 \text{ кпс}$$

Направление рукавов вблизи Солнца:

$$\text{от } l^{\text{I}} = 63^\circ \text{ к } l^{\text{II}} = 243^\circ$$

Рукава вблизи Солнца обрезают радиус, проведенный из центра Галактики на следующих расстояниях [13, 16]:

Рукав в Персее	12,3 кпс
Рукав в Орионе, Киле и Лебеде	10,4 кпс
Рукав в Стрельце	8,1 кпс

Время релаксации t_0 – время установления максвелловского распределения скоростей или время, за которое существенно меняется орбита звезды

$$t_0 \text{ вблизи Солнца} = 2,6 \cdot 10^6 v^3 \text{ лет } [v \text{ в км/с}]$$

где v – скорость звезды относительно соседних звезд и межзвездной материи.

Взраст Галактики [1, 15]

$$= 12 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

Зависимость скорости вращения Галактики v_{rot} от расстояния до галактического центра $\tilde{\omega}$ [1, 12, 16, 17]

$\tilde{\omega}$, кпс	0	1	2	3	5	7	9	10	15	20	40
v_{rot} , км/с	0	200	183	198	229	244	255	250	219	193	139

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 130; **2**, § 133.
2. *Innanen K. A.*, *Z. Ap.*, **64**, 158 (1966).
3. *Hodge P. W.*, *Publ. A. S. P.*, **78**, 72 (1966).
4. *Blaauw A.*, *Gum C S. et al.*, *M. N.*, **121**, 123, 132, 150, 164 (1960).
5. *Feast M. W.*, *Shuttleworth M.*, *M. N.*, **130**, 245 (1965).
6. *Howard W. E.*, *Kink J. G.*, *A. J.*, **70**, 434 (1965).
7. *Martin P. G.*, *M. N.*, **153**, 251 (1971).
8. *Kreiken E. A.*, *Indonesia O. S. R. Publ.*, **10** (1950).
9. *Schmidt M.*, *B. A. N.*, **13**, 15 (1956).
10. *Neckel H.*, *Z. Ap.*, **62**, 180 (1965).
11. *Vaucouleurs G. de*, *Malik G. M.*, *M. N.*, **142**, 387 (1969).
12. *Perek L.*, *B. A. Czech.*, **17**, 333 (1966).
13. *Becker W.*, *Galaxy and Mag. Clouds*, *I. A. U. Symp.*, **20**, p. 16, 1964.
14. *Osterbrock D. E.*, *Ap. J.*, **116**, 164 (1952).
15. *Sandage A.*, *Ap. J.*, **162**, 841 (1970).
16. *Sharpies S.*, p. 131; *Kerr*, *Westerhout*, p. 167; *Schmidt M.*, p. 513, in *Galactic Structure*, ed. Blaauw, Schmidt. Chicago, 1965.
17. *Shane W. W.*, *Bieger-Smith G. P.*, *B. A. N.*, **18**, 263 (1966).

Модели Галактики [2, 9, 12]

$\tilde{\omega}$ – радиальное расстояние от галактической оси

Z – расстояние от галактической плоскости

Kz – ускорение в направлении, перпендикулярном галактической плоскости

ρ , ρ_0 – плотность (ρ_0 – плотность в окрестностях Солнца, равная $0,13 \mathcal{M}_{\odot}/\text{пс}^3$)

$\lg(\rho/\rho_0)$

z , кпс	$\tilde{\omega}$, кпс						
	0	1	2	5	8	10	15
0,0	2,6	1,71	1,15	0,64	0,27	0,00	-1,1
0,2	1,21	0,91	0,60	0,24	-0,10	-0,41	-2,2
0,5	0,28	0,18	0,03	-0,25	-0,62	-1,1	-3,2
1,0	-0,26	-0,35	-0,50	-0,93	-1,29	-1,5	-3,2
2	-0,62	-0,66	-0,72	-1,02	-1,36	-1,7	-3,2
5	-1,3	-1,3	-1,3	-1,5	-1,9	-2,4	-3,3
10	-2,8	-2,8	-2,8	-2,9	-3,0	-3,2	-3,7

Потенциал, $1000 (\text{км/с})^2$

z , кпс	$\tilde{\omega}$, кпс						
	1	2	5	8	10	15	20
0,0	193	152	103	75	60	38	28
0,2	188	150	102	74	60	38	28
0,5	175	145	100	73	60	38	28
1,0	154	135	97	72	59	38	28
2	124	116	89	68	57	38	28
5	80	78	68	56	49	35	27
10	49	48	45	41	38	30	25
20	27	26	26	25	24	22	20

Заметим, что скорость освобождения = $(2 \times \text{потенциал})^{1/2}$.

$K_z, 10^{-9} \text{ см/с}^2$

z , кпс	$\tilde{\omega}$, кпс						
	1	2	5	8	10	15	20
0,0	95	30	10	4,3	2,5	0,2	0,03
0,2	132	45	15	7,2	4,1	0,3	0,06
0,5	146	62	22	10,6	5,8	0,6	0,14
1,0	120	65	25	11,5	6,4	1,0	0,27
2	74	55	25	12,1	7,3	1,7	0,55
5	31	29	19	11,2	8,0	2,9	1,15
10	13	12	10	7,7	6,1	3,6	1,72
20	4	4	4	3,2	2,9	2,2	1,57

§ 135. Галактики (внегалактические туманности)

Классификация галактик по схеме Хаббла [2]:

Эллиптические галактики, $E_0 \leftrightarrow E_7$,

т.е. E_n где $n/10$ – сжатие $\varepsilon = (a - b)/a$, a и b – наибольший и наименьший диаметры

Линзообразные галактики, SO

Нормальные спиральные галактики Sa, Sb, Sc по степени развития спиралей

Спиральные галактики с перемычкой SBa, SBb, SBc по степени развития спиралей

Неправильные галактики Ir I, Ir II с населением I и II типов соответственно

Промежуточный тип между Sc и Ir со слабо выраженными спиральями можно обозначить Sd. Индекс p означает пекулярность.

Существуют и более подробные классификации [3, 4].

Размеры и тип. Внутри каждого типа наблюдается большое разнообразие размеров и звездных величин. Неправильные галактики обычно маленькие и слабые [4].

Цвет, спектр и отношение масса/светимость для различных типов галактик [1]

Тип	$B - V$	S_p для центральной области	$(M/L)/(M_\odot/L_\odot)$
E	0,9	G4	80
SO	0,9	G3	50
Sa	0,9	G2	30
Sb	0,8	G0	20
Sc	0,6	F6	10
Ir	0,5		3

Функция светимости галактик [5] указывает на неограниченность, числа слабых галактик. Поэтому вместо произвольных средних значений мы используем средние, соответствующие предельной видимой звездной величине; эти видимые средние обозначаются чертой сверху. Видимая средняя абсолютная звездная величина и соответствующая ей дисперсия [5]

$$\bar{M}_V = -20,3 \quad \sigma = \pm 1,6^m$$

Функция светимости [5, 18]

$\varphi(M)$ – число галактик в единичном интервале абсолютных звездных величин на 1 Мпс^3

$\lambda(M)$ – световое излучение галактик в единичном интервале звездных величин, выраженное в $10^6 \mathcal{L}_\odot / (\text{Мпс})^3$

M	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14
$\lg \varphi(M)$	-5	-3,5	-2,3	-1,8	-1,6	-1,3	-1,0	-0,9	-0,8
$\lambda(M)$	1	10	50	60	50	40	30	20	10

Полное излучение от галактик [18, 19]

$$\lambda = 2,2 \cdot 10^{-10} \mathcal{L}_\odot / \text{пс}^3$$

Среднее число звезд в галактике $= 10^{11}$

Массы галактик и отношение масса/светимость [8]

Тип	Sb	Sc	Ir
$\lg(M/M_\odot)$	11,5	10,8	10,0
M_{HI}/M	0,01	0,08	0,16
$(M/L_{\text{pg}})/(M/L_{\text{pg}\odot})$	7	7	9

M_{HI} – масса нейтрального водорода

Средняя масса $\bar{M} = 8 \cdot 10^{10} M_\odot$

Пространственная плотность распределения галактик

$$= 0,02 \text{ видимых средних галактик на } \text{Мпс}^3$$

Плотность вещества галактик, равномерно распределенного по всему пространству (§ 138) [6]

$$\lg \rho = -30,7 [\rho \text{ в } \text{г}/\text{см}^3]$$

Местная группа галактик (исключая нашу Галактику) [1, 7–9]

Галактика	NGC IC	Тип	l^{II}	b^{II}	Диаметр		ε	Расстояние, кпс [11, 12]	V	$B-V$	M_V [11]	v_{rot} км/с [14, 15]	v_r км/с	$\lg M / M_{\odot}$ [11, 12]
					угловой	линей- ный, кпс								
Большое Магелланово Облако		Ir I	280°	-33°	460'	7	0,2	52	0,1	0,5	-18,7	95	+270	10,0
Малое Магелланово Облако		Ir I	330	-45	150	3	0,5	63	2,4	0,5	-16,7		+168	9,3
Туманность Андромеды	224	Sb	121	-22	100	16	0,7	670	3,5	0,8	-21,1	280	-275	11,5
М 32	221	E 2	121	-22	5	1	0,2	660	8,2	0,9	-16,3		-210	9,5
	205	E 5	121	-21	12	2	0,5	640	8,2	0,8	-16,3		-240	9,9
Туманность Треугольника М 33 [10]	598	Sc	134	-31	35	6	0,3	730	5,7	0,6	-18,8	104	-190	10,1
	147	Ep	120	-14	9	1	0,4	660	9,6	0,9	-14,8		-250	9
	185	Ep	121	-14	6	1	0,1	660	9,4	0,9	-15,2		-300	9
	IC 1613	Ir I	130	-61	12	1	0,1	740	9,6	0,5	-14,8	60	-240	8,4
	6822	Ir	25	-18	15	2	0,4	470	8,6	0,5	-15,6	110	-40	8,5
Система в Скульпторе [16]		E	285	-83	30	1	0,6	85	7	0,8	-12			6,5
Система в Печи [16]		E	237	-66	40	2	0,6	170	7	0,8	-13		+40	7,3
Лев I [16]		E 4	226	+49	10	1	0,4	230			-11			6,6
Лев II [16]		E 1	220	+67	8	1	0,1	230			-9,5			6,0
Система в Драконе [16]		E	86	+35	15		0,3	67			-8,5			5
Система Малой Медведицы [16]		E	104	+45	40		0,5	67			-9			5
ИК галактика Maffei	IC 1805	SO	136	-1	0,5			1000	11	3	-20			11,3

Избранные яркие галактики ($V < 9$)

Местная группа в эту таблицу не включена [1, 7, 8]

Галактика	NGC IC	Тип	l''	b''	Диаметр		ε	Расстояние, Мпс [11, 12]	V	$B-V$	M_V [11]	v_{rot} , км/с [14, 15]	v_{cor} , км/с	$\lg M / M_{\odot}$ [1, 8, 11, 13]
					угловой	линейный, кпс								
М 81	55	Sc	333°	-76°	25'	12	0,9	2,3	7,2		-19,9	75	+190	10,5
	253	Sc	75	-89	22	13	0,8	2,4	7		-20	265	-70	11
	2403	Sc	151	+28	18	11	0,4	3,2	8,4	0,5	-19,2	170	+190	10,1
	3031	Sb	142	+41	20	16	0,5	3,2	6,9	1,0	-20,9	260	+80	11,2
	М 82	3034	Ir II	141	+41	8	7	0,7	3	8,2	0,9	-19,6	180	+400
М 106	3115	E 7	247	+37	4	5	0,7	4	9,1	1,0	-19,3		+430	10,9
	4258	Sb	138	+69	15	17	0,6	4,0	8,2	0,8	-20,1	300	+480	11,0
М 87	4486	E 1	283	+75	4	13	0,2	13	8,7	1,0	-21,7		+1220	12,6
М 104 «Сомбреро»	4594	Sa	298	+51	6	8	0,3	12	8,1	1,0	-22		+1050	11,7
М 94	4736	Sb	123	+76	7	10	0,2	4,5	8,2	0,8	-20,4	180	+340	11,0
М 64	4826	Sb	316	+84	8	12	0,5	3,9	8,4	0,9	-19,7	185	+360	10,9
	4945	Sb	305	+13	12	14	0,8	4,0	7		-21			
М 63	5055	Sb	105	+74	10	15	0,5	4,6	8,4	0,9	-20,0	250		9
Центавр А	5128	E 0p	310	+19	14	15	0,2	4,4	7		-20		+260	11,3
М 51 «Водоворот»	5194	Sc	105	+69	9	9	0,4	3,8	8,2	0,6	-19,7	325	+550	10,9
М 83	5236	SBc	315	+32	10	12	0,2	3,2	7,2	0,7	-20,6	320	+320	
М 101 [10]	5457	Sc	102	+60	20	23	0,0	3,8	7,5	0,6	-20,3	285	+400	11,2
	7793	Sd	4	-77	6	4	0,4	2,6	8,8		-18,4		+290	

Число на кв. град, галактик ярче звездной величины m_V , N_m [1]

$$\lg N_m = 0,50 (m_V - 14,4) \\ = 0,60(m_V - \Delta m) - 8,4,$$

где Δm – поправка к наблюдаемой звездной величине за красное смещение и др.

Средняя яркость неба, создаваемая светом галактик [1]

$$= 1,4(m_V - 10) \text{ на кв. град.}$$

Излучение от галактик [6]

$$= 3 \cdot 10^8 \mathcal{L}_\odot / \text{Мпс}^3.$$

Медианная галактическая широта наблюдаемых галактик

$$\bar{b} = 49^\circ$$

Под *диаметрами*, приведенными в таблице, подразумеваются характерные (§ 6). Однако соответствующих измерений не существует и приведенные значения колеблются между максимальным диаметром и диаметром ядра.

В таблицах приведены следующие *скорости*:

v_r – наблюдаемая лучевая скорость (для местной системы)

v_{cor} – скорость, исправленная за вращение Галактики (для наиболее ярких галактик)

v_{rot} – наибольшая скорость вращения

Пекулярные скорости галактик [1] ≈ 100 км/с

Скорость удаления и расстояние, постоянная Хаббла (§ 138)

$$v = 60 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпс})$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 131; **2**, § 134.
2. Hubble E., Ap. J., **64**, 321 (1926).
3. Vaucouleurs G. de, Ap. J. Supp., **8**, 31 (1963).
4. Vaucouleurs G. de, Handb. Phys., **53**, 275 (1959).
5. Kiang T., M. N., **122**, 263 (1961).
6. van den Bergh S., Z. Ap., **53**, 219 (1961).
7. van den Bergh S., J. R. A. S. Canada, **62**, 145, 219 (1968); Observers Handb., 1972, p. 96.
8. Epstein E. E., A. J., **69**, 490 (1964).
9. Bergh S. van den, Landolt-Börnstein Tables, Group VI, **1**, Springer, 1965, p. 674.
10. Jacobsson S., Astron. Ap., **5**, 413 (1970).
11. Freeman K. C., Sandage, Stokes, Ap. J., **160**, 811, 831 (1970).
12. Sandage A., Tammann G. A., Ap. J., **167**, 293 (1971).
13. Fish R., Ap. J., **139**, 284 (1964).
14. Takase B., Kinoshita H., Publ. A. S. Japan, **19**, 409 (1967).
15. Brosche P., Z. Ap., **66**, 161 (1967).
16. Hodge P. W., Michie R. W., A. J., **74**, 587 (1969).
17. Lewis B. M., Astron. Ap., **16**, 165 (1972).
18. Shapiro S. L., A. J., **76**, 291 (1971).
19. Noonan T. W., A. S. P. Leaflet No. 495 (1970).
- 20*. Воронцов-Вельяминов Б. А., Внегалактические туманности, «Наука», М., 1972.

§ 136. Квазары и сейфертовские галактики

Квазары [1] – это звездоподобные объекты, красное смещение которых z намного больше красного смещения обычных звезд. Квазизвездными объектами, QSO, называются квазары, выделенные на основе оптических наблюдений, а квазизвездными источниками, QSS, – квазары, выделенные и по оптическим, и по радионаблюдениям.

$$z = \Delta\lambda / \lambda_0$$

Спектральные линии, по которым обычно определяют величину z :

H	H β \leftrightarrow He
Mg II	2796 \leftrightarrow 2803 Å
C IV	1549 Å
C III	1909 Å

Красное смещение, определенное по линиям поглощения, часто оказывается меньше, чем z , определенное по линиям излучения. Расстояние D (в космологической модели с постоянными $q_0 = 1$, $\Lambda = 0$)

$$D = (c/H) z = 5000z \text{ Мпс,}$$

где H – постоянная Хаббла.

Сейфертовские галактики, N -галактики, галактики Арно, некоторые компактные галактики Цвикки и квазизвездные источники – все эти объекты характеризуются концентрацией к центру и спектром, относительно богатым эмиссионными линиями [7].

В таблице избранных сейфертовских галактик M_H и M_T означают массу нейтрального водорода и полную массу соответственно.

Избранные сейфертовские галактики [7–9]

NGC	1950		Тип	Диаметр	Лучевая скорость, км/с	Расстояние, Мпс	Скорость вращения, км/с	Радиус максимальной скорости вращения	$\lg M_H / M_\odot$	$\lg M_T / M_\odot$
	α	δ								
1068	02 ^h 40 ^m	–0° 14'	Sb	5'	1100	11	290	2,0'	9,1	11,3
1275	03 16	+41 20				50				
3227	10 21	+20 07	Sa	3	1200	13	190	1,4	8,7	11,0
4051	12 01	+44 48	Sbc	4	670	7		1,7	8,9	11,0
4151	12 08	+39 41	Sab	3	980	11	140	1,2	9,0	10,5
7469	23 01	+08 36				50				

ЛИТЕРАТУРА

1. Schmidt M., Ap. J., **162**, 371 (1970).
2. Veny J. B. de, Osborn, Janes, Publ. A. S. P., **83**, 611 (1971).
3. Schmidt M., Ap. J., **151**, 393 (1968).
4. Schmidt M., Ann. Rev. Astron. Ap., **7**, 527 (1969).
5. Burbidge E. M., Ann. Rev. Astron. Ap., **5**, 399 (1967).
6. Lindsay E. M., Irish A. J., **7**, 257 (1966).
7. Anderson K. S., Ap. J., **162**, 743 (1970).
8. Allen R. J. et al., Astron. Ap., **10**, 198 (1971).
9. Wampler E. J., Ap. J., **164**, 1 (1971).
- 10*. Воронцов-Вельяминов Б. А., Внегалактические туманности, «Наука», М, 1972.

Типичные измеренные диаметры (по мерцанию) [6]

$$\approx 0,1'' - 0,02''$$

Типичные космологические диаметры [6]

$$y = 1000 \leftrightarrow 100 \text{ пс}$$

из выражения

$$y = cz \theta / H (1 + z)^2$$

для космологической модели с постоянными $q_0 = 1$ и $\Lambda = 0$,

θ – угловой диаметр

Типичная абсолютная звездная величина

$$M \approx -24 \leftrightarrow -25$$

Типичная мощность излучения [5] = 10^{47} эрг/с.

Квazarы, приведенные в таблице, взяты из разных каталогов с приближенными значениями координат α и δ . В таблице приведены данные B , V -фотометрии, красное смещение z и поток радиоизлучения на волне 500 МГц, $f(500)$.

Избранные квазары [1–3]

Квазар	1950		V	$B-V$	z	$\lg f(500)$ (в Вт/м ² · с · Гц)
	α	δ				
3C 2	00 04	0	19,35	+0,79	1,037	-25,18
3C 9	00 18	+15	18,21	+0,23	2,012	-25,21
PHL 957	01 01	+13	16,60		2,720	
3C 47	01 34	+21	18,10	+0,05	0,425	-25,00
3C 48	01 35	+33	16,20	+0,42	0,367	-24,54
PHL 1377	02 33	-04	16,46	+0,15	1,434	
3C 138	05 18	+17	18,84	+0,53	0,759	-24,99
3C 147	05 39	+50	17,80	+0,65	0,545	-24,48
3C 191	08 02	+10	18,40	+0,25	1,952	-25,37
4C 05,34	08 05	+05	18,00		2,877	
3C 215	09 04	+17	18,27	+0,21	0,411	-25,39
PKS 0957	09 58	0	17,57	+0,47	0,907	
3C 245	10 40	+12	17,27	+0,46	1,029	-25,34
3C 249,1	11 00	+77	15,72	-0,02	0,311	-25,29
PKS 1217	12 18	+02	16,53	-0,02	0,240	
3C 270,1	12 18	+34	18,61	+0,19	1,519	-25,29
3C 273	12 27	+02	12,80	+0,21	0,158	-24,27
3C 275,1	12 41	+17	19,00	+0,23	0,557	-25,16
3C 277,1	12 50	+57	17,93	-0,17	0,320	-25,29
3C 279	12 54	-06	17,75	+0,26	0,536	
3C 323,1	15 46	+21	16,69	+0,11	0,264	-25,32
3C 334	16 18	+18	16,41	+0,12	0,555	-25,32
3C 345	16 41	+40	15,96	+0,29	0,594	-25,21
3C 351	17 04	+61	15,28	+0,13	0,371	-25,22
3C 446	22 23	-05	18,39	+0,44	1,404	
3C 454,3	22 51	+16	16,10	+0,47	0,859	-25,06

§ 137. Скопления и группы галактик

Скопления галактик

Скопление	Число галактик [1]	l^{II}	b^{II}	Диаметр [6]	Расстояние, Мпс [5]	v_r , км/с [1, 6, 7]	Число галактик на 1 Мпс ³	$m_V(10)$ [1]	z
		[1]							
Дева	2500	284°	+74°	12°	19	+1 180	500	9,4	0,004
Пегас I	100	86	-48	1	65	3 700	1100	12,5	0,013
Рыбы	100	128	-29	10	66	5 000	250	13,0	0,017
Рак	150	202	+29	3	80	4 800	500	13,4	0,016
Персей	500	150	-14	4	97	5 400	300	13,6	0,018
Волосы Вероники	800	80	+88	4	113	6 700	40	13,5	0,022
Большая Медведица III	90	152	+64	0,7	132		200	14,5	
Геркулес	300	31	+44	0,1	175	10 300		14,5	0,034
Пегас II		84	-47			12 800		15,2	0,043
Скопление А	400	144	-78	0,9	240	15 800	200	16,0	0,053
Центавр	300	313	+31	2	250		10	15,6	
Большая Медведица I	300	140	+58	0,7	270	15 400	100	16,0	0,051
Лев	300	232	+53	0,6	310	19 500	200	16,3	0,065
Близнецы	200	182	+19	0,5	350	23 300	100	16,7	0,078
Северная Корона	400	41	+56	0,5	350	21 600	250	16,3	0,072
Скопление В	300	345	-55	0,6	330		200	16,3	
Волопас	150	50	+67	0,3	650	39 400	100	18,0	0,131
Большая Медведица II	200	149	+54	0,2	680	41 000	400	18,0	0,137
Гидра		226	+30		1000	60 600		18,6	0,201

Данные по возможности приведены в соответствие со значением постоянной Хаббла 60 км/(с · Мпс).

Средний диаметр скопления галактик [1, 2]

$$= 5 \text{ Мпс}$$

Среднее число галактик в скоплении [1, 2]

$$= 130$$

Полнос местной Сверхгалактики [3, 4]

$$l^{\text{II}} = 47^\circ \quad b^{\text{II}} = +6^\circ,$$

а центр системы находится в направлении скопления в Деве ($l^{\text{II}} = 283^\circ$, $b^{\text{II}} = +75^\circ$)
Красное смещение и лучевая скорость v

$$z = \Delta\lambda / \lambda_0 = v/c \text{ для малых } z$$

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. **1**, § 132; **2**, § 135.
2. Herzog E., Wild, Zwicky, Publ. A. S. P., **69**, 409 (1957).
3. Vaucouleurs G. de, A. J., **63**, 253 (1958).
4. van den Bergh S., J. R. A. S. Canada, **62**, 145, 219 (1968).
5. Sersic J. L., Z. Ap., **50**, 168 (1960).
6. Zwicky F., Handb. Phys., **53**, 373, 390 (1959).
7. Humason M. L., Mayall, Sandage, A. J., **61**, 97 (1956).
- 8*. Воронцов-Вельяминов Б. А., Внегалактические туманности, «Наука», М., 1972.

Близкие группы галактик [4, 5]

Группа	α	δ	Номера NGC галактик, входящих в группу	Расстояние, Мпс	v , км/с
Местная группа	—	—	§ 135	0,6	
М 81	09 ^h 50 ^m	+69°	3031, 2403, 4236, 2366, 2574, 2976	3,4	
В Скульпторе (южный полюс Галактики)	00 45	-26	55, 247, 253, 300, 7793	3,7	
М101, в Гончих Псах	12 50	+41	5194, 5457, 5204, 5474, 5585, 5907	7,0	500
Группы Большой Медведицы	11 10	+57	4736, 4258, 4395, 4656, 4449, 4214, 4051, 5055, 4631, 4490, 4459, 4618	7	550
М 66, М 96, в Льве	11	+12	3368, 3623, 3351, 3627, 3338, 3367, 3346, 3810, 3389, 3423	11	790

§ 138. Вселенная

Скорость разбегания далеких галактик (постоянная Хаббла) [2–5]

$$H = 60 \text{ (км/с) / Мпс } (\pm 0,13 \text{ dex}) \\ = 2,0 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1} = 6,2 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$$

Считается, что величина H лежит в интервале $45 \leftrightarrow 120$.

Время Хаббла

$$1/H = 5,1 \cdot 10^{17} \text{ с} = 16 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

Расстояние Хаббла

$$R = c/H = 5000 \text{ Мпс} = 1,5 \cdot 10^{28} \text{ см}$$

Постоянная объема

$$(4\pi / 3) R^3 = 15 \cdot 10^{84} \text{ см}^3 = 5,2 \cdot 10^{11} \text{ Мпс}^3$$

Плотность галактического вещества, равномерно распределенного по Вселенной [6, 8, 9],

$$= 2 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ атом/см}^3$$

$$= 3 \cdot 10^9 \mathcal{M}_\odot / \text{Мпс}^3$$

Плотность, необходимая для сдерживания расширения Вселенной [8],

$$= 1 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$$

Такая плотность может обеспечиваться межгалактическим веществом [7], однако надежных наблюдений, подтверждающих это, пока нет.

Скорость расширения Вселенной

$$v = cz,$$

где $z = \Delta\lambda / \lambda_0$ и малó.

Космологическая постоянная

$$\Delta \approx 0 [3]$$

Параметр замедления

$$q_0 = 1,0 \pm 0,8 [3]$$

Связь между фотометрическим расстоянием D и красным смещением z в некоторых космологических моделях [3, 10]

$$D = cz \left(1 + \frac{1}{2} z \right) / H \quad \text{Модель Милна}$$

$$D = cz / H \quad q_0 = 1 \quad \Lambda = 0$$

$$D = cz (1 + z) / H \quad \text{Стационарная модель де Ситтера}$$

Шкала времени [3]

образования химических элементов

$$7 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

жизни Галактики и шаровых скоплений

$$12 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

существования Вселенной в состоянии, близком к современному

$$16 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

развития звезды в сверхновую

$$1 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

Плотность излучения u во Вселенной [1, 11, 12]

Излучение можно довольно четко разделить на следующие четыре компоненты:

Радиоволны $\lg u = -19$ (в эрг/см³)

Микроволны $\lg u = -12,2$ »

Оптическое излучение $\lg u = -13,9$ »

Рентгеновское излучение $\lg u = -15,5$ »

Спектральное распределение спектральной плотности излучения u_{sp}

В таблице приведены значения $\lg u_{\text{sp}}$, где u_{sp} выражена в эрг/см³ на dex (ϵ или λ) [11, 12]. Энергия фотона в эргах $\epsilon = 1,99 \cdot 10^{-8} / \lambda$ [λ в Å]

Радиоизлучение			Микроволновое излучение			Оптическое излучение			Рентгеновское излучение		
$\lg \epsilon$	λ	$\lg u_{\text{sp}}$	$\lg \epsilon$	λ	$\lg u_{\text{sp}}$	$\lg \epsilon$	λ	$\lg u_{\text{sp}}$	$\lg \epsilon$	λ	$\lg u_{\text{sp}}$
-23	200 км	-23							-9	20 Å	-16,4
-22	20 км	-21	-17	20 см	-16,7	-13	20 мкм	-15,1	-8	2 Å	-15,7
-21	2 км	-19,8	-16	2 см	-13,6	-12	2 мкм	-13,8	-7	0,2 Å	-15,6
-20	200 м	-19,4	-15	2 мм	-12,2	-11	2000 Å	-14,2	-6	0,02 Å	-15,8
-19	20 м	-19,4	-14	200 мкм	-18	-10	200 Å	-20	-5	0,002 Å	-16
-18	2 м	-20									

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Q. 1, § 126 + § 133; 2, § 129 + § 136.
2. Sandage A., Ap. J., **152**, L149 (1968).
3. Sandage A., A. S. P. Leaflets, Nos. 477, 478 (1968); Phys. Today, **23**, 34 (1970).

4. *Vaucouleurs G. de*, *Ap. J.*, **159**, 435 (1970).
5. *Noerdlingen P. D.*, *Nature*, **232**, 393 (1971).
6. *Shapiro S. L.*, *A. J.*, **76**, 291 (1971).
7. *Oort J. H.*, *Astron. Ap.*, **7**, 405 (1970).
8. *Noonan T. W.*, *A. S. P. Leaflets*, No. 495 (1970).
9. *Hoyte F.*, *Observatory*, **86**, 217 (1966).
10. *McVittie C G.*, *Phys. Today*, p. 70, July 1964.
11. *Ogelman H.*, NASA (Goddard), N 69-29652-660, p. 13, 1969.
12. *Gould R. J.*, *Schreder G. P.*, *Phys. Rev.*, **155**, 1407 (1967).
13. *Sandage A.*, *Tammann G.*, *A.*, *Sky and Telescope*, **43**, 229 (1972).

Дополнительные таблицы

§ 139. Юлианские даты

J. D. – юлианские дни		
Полдень	1 января (по юлианскому календарю)	4713 г. до н. э. = 0,0 J.D.
»	1 января »	1 г. до н. э. =
		0 г. н. э. = 1 721 058,0 J.D.
»	1 января »	1 г. н. э. = 1 721 424,0 J.D.
»	1 января »	1770 г. н. э. = 2 367 551,0 J.D.
»	1 января (по григорианскому календарю)	1770 г. н. э. = 2 367 540,0 J.D.
»	1 марта »	1770 г. н. э. = 2 367 599,0 J.D.

Юлианские дни на средний гринвичский полдень 1 марта

1 марта	Юлианские дни
1770	2 367 599
1780	2 371 252
1790	2 374 904
1800	2 378 556
1810	2 382 208
1820	2 385 861

1 марта	Юлианские дни
1830	2 389 513
1840	2 393 166
1850	2396818
1860	2 400 471
1870	2 404 123
1880	2 407 776

1 марта	Юлианские дни
1890	2 411428
1900	2 415 080
1910	2 418 732
1920	2 422 385
1930	2 426 037
1940	2 429 690

1 марта	Юлианские дни
1950	2 433 342
1960	2 436 995
1970	2 440 647
1980	2 444 300
1990	2 447 952
2000	2 451 605

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 134; 2, § 137.

§ 140. Греческий алфавит

Альфа	Α	α
Бета	Β	β
Гамма	Γ	γ
Дельта	Δ	δ
Эпсилон	Ε	ε, ε
Дзета	Ζ	ζ
Эта	Η	η
Тэта	Θ	θ, θ

Йота	Ι	ι
Каппа	Κ	κ
Лямбда	Λ	λ
Мю	Μ	μ
Н	Ν	ν
Кси	Ξ	ξ
Омикрон	Ο	ο
Пи	Π	π,

Ро	Ρ	ρ
Сигма	Σ	σ, ζ
Тау	Τ	τ
Ипсилон	Υ	υ
Фи	Φ	φ, φ
Хи	Χ	χ
Пси	Ψ	ψ
Омега	Ω	ω

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 135; 2, § 138.

§ 141. Таблицы прецессии

См. таблицу на стр. 262.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 137; 2, § 139.

Прецессия по прямому восхождению за 10 лет

В минутах времени; знак «+» соответствует увеличению α

Склонение	Часы α для объектов северного полушария													Склонение
	6	7 5	8 4	9 3	10 2	11 1	12 0	13 23	14 22	15 21	16 20	17 19	18	
80°	+1,77 ^m	+1,73 ^m	+1,60 ^m	+1,40 ^m	+1,14 ^m	+0,84 ^m	+0,51 ^m	+0,19 ^m	-0,12 ^m	-0,38 ^m	-3,58 ^m	-0,70 ^m	-0,75 ^m	80°
70	1,12	1,10	1,04	0,94	0,82	0,67	0,51	0,35	+0,21	+0,08	-0,02	-0,08	-0,10	70
60	0,898	0,885	0,846	0,785	0,705	0,612	0,512	0,412	+0,319	+0,240	+0,178	+0,140	+0,126	60
50	0,778	0,768	0,742	0,700	0,645	0,581	0,512	0,444	+0,380	+0,324	+0,282	+0,256	+0,247	50
40	0,699	0,693	0,674	0,644	0,606	0,560	0,512	0,464	+0,419	+0,380	+0,350	+0,332	+0,325	40
30	0,641	0,636	0,624	0,603	0,576	0,546	0,512	0,479	+0,448	+0,421	+0,401	+0,388	+0,384	30
20	0,593	0,590	0,582	0,570	0,553	0,533	0,512	0,491	+0,472	+0,455	+0,442	+0,434	+0,431	20
10	0,552	0,550	0,546	0,540	0,532	0,522	0,512	0,502	+0,492	+0,484	+0,478	+0,476	+0,473	10
0	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	+0,512	0
	18	19 17	20 16	21 15	22 14	23 13	0 12	1 11	2 10	3 9	4 8	5 7	6	
	Часы α для объектов южного полушария													

Прецессия по склонению за 10 лет

В минутах дуги; знак + соответствует увеличению склонения и, следовательно, уменьшению абсолютной величины отрицательного склонения

Часы α												
0 24	1 23	2 22	3 21	4 20	5 19	6 18	7 17	8 16	9 15	10 14	11 13	12
+3,34'	+3,23'	+2,89'	+2,36'	+1,67'	+0,86'	0,0'	-0,86'	-1,67'	-2,36'	-2,89'	-3,23'	-3,34'

§ 142. Годичные изменения

Дата	Солнце				$E-12^h =$ уравнение времени: ис- тинное- среднее, мин	Прохождение точки весен- него равно- денствия	$R \approx \alpha$ в момент кульминации в местную полночь
	α	δ	долгота	расстояние а. е.			
Январь 1	18 ^h 44 ^m	-23,1°	280°	0,9833	-3,3	17 ^h 17 ^m	6 ^h 44 ^m
16	19 49	-21,1	295	0,9837	-9,6	16 18	7 43
Февраль 1	20 56	-17,3	312	0,9854	-13,5	15 15	8 46
16	21 56	-12,6	327	0,9879	-14,3	14 16	9 45
Март 1	22 46	-7,9	340	0,9909	-12,6	13 25	10 36
16	23 41	-2,0	355	0,9947	-8,9	12 26	11 36
Апрель 1	0 40	+4,3	11	0,9993	-4,2	11 23	12 39
16	1 34	+9,8	26	1,0035	0,0	10 24	13 38
Май 1	2 31	+14,9	40	1,0076	+2,8	9 25	14 37
16	3 29	+18,9	55	1,0111	+3,7	8 26	15 36
Июнь 1	4 34	+21,9	70	1,0141	+2,4	7 23	16 39
16	5 35	+23,3	84	1,0159	-0,4	6 24	17 38
Июль 1	6 38	+23,2	99	1,0167	-3,6	5 25	18 37
16	7 39	+21,5	113	1,0164	-5,9	4 26	19 37
Август 1	8 43	+18,2	128	1,0150	-6,3	3 23	20 40
16	9 40	+14,0	143	1,0126	-4,4	2 24	21 39
Сентябрь 1	10 39	+8,5	158	1,0092	-0,2	1 21	22 42
16	11 33	+2,9	173	1,0053	+4,8	0 22	23 41
Октябрь 1	12 27	-2,9	187	1,0012	+10,1	23 19	0 40
16	13 21	-8,6	202	0,9969	+14,2	22 20	1 39
Ноябрь 1	14 23	-14,2	218	0,9926	+16,3	21 17	2 42
16	15 23	-18,6	233	0,9889	+15,3	20 18	3 42
Декабрь 1	16 26	-21,7	248	0,9861	+11,2	19 20	4 40
16	17 32	-23,3	264	0,9841	+4,7	18 21	5 40

$$\text{Часовой угол } HA_* = TU + R - \alpha_* + \lambda_{\text{east}}$$

$$\gg \gg HA_{\odot} = TU + E + \lambda_{\text{east}}$$

Диск Солнца

P – позиционный угол оси вращения Солнца

B_0 – гелиографическая широта Земли или центральной точки диска

Дата	P	B_0
Январь 6	0,0°	-3,6°
Февраль 5	-13,7	-5,3
Март 6	-22,7	-7,25
Апрель 7	-26,35	-6,2
Май 7	-23,1	-3,5
Июнь 6	-13,7	0,0

Дата	P	B_0
Июль 7	0,0°	+3,5°
Август 8	+13,0	+6,2
Сентябрь 8	+22,7	+7,25
Октябрь 10	+26,35	+6,2
Ноябрь 9	+23,0	+3,5
Декабрь 8	+13,5	0,0

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 138; 2, § 140.
2. Star Almanac.
3. Astronomical Ephemeris.
- 4*. Астрономический Календарь.
- 5*. Астрономический Ежегодник, «Наука», М., ежегодно.

§ 143. Созвездия

В таблице на стр. 264–265 приведены латинские и русские названия созвездий, трехбуквенные сокращения, приблизительное положение на небе и площади.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Q. 1, § 139; 2, § 141.
2. В. А. А. Handb., 1961, p. 25.
3. Oravec E. G., Sky and Telescope, 17, 219 (1958).
4. Norton's Star Atlas, pp. XVI, 52, last page, Gall and Inglis, 1959.

Созвездие	Окончание родительного падежа	Русское название	Сокращение	α	δ	Площадь кв. град. [2]
Andromeda	-dae	Андромеда	And	1 ^h	+40°	722
Antlia	-nae	Насос	Ant	10	-35	239
Apus	-podis	Райская Птица	Aps	16	-75	206
Aquarius	-rii	Водолей	Aqr	23	-15	980
Aquila	-lae	Орел	Aql	20	+5	652
Ara	-rae	Жертвенник	Ara	17	-55	237
Aries	-ietis	Овен	Ari	3	+20	441
Auriga	-gae	Возничий	Aur	6	+40	657
Bootes	-tis	Волопас	Boo	15	+30	907
Caelum	-aeli	Резец	Caе	5	-40	125
Camelopardus	-datis или -di	Жираф	Cam	6	+70	757
Cancer	-cri	Рак	Cnc	9	+20	506
Canes Venatici	-num -corum	Гончие Псы	CVn	13	+40	465
Canis Major	-is -ris	Большой Пес	CMa	7	-20	380
Canis Minor	-is -ris	Малый Пес	CMi	8	+5	183
Capricornus	-ni	Козерог	Cap	21	-20	414
Carina	-nae	Киль	Car	9	-60	494
Cassiopeia	-peiae	Кассиопея	Cas	1	+60	598
Centaurus	-ri	Центавр	Cen	13	-50	1060
Cepheus	-phei	Цефей	Cep	22	+70	588
Cetus	-ti	Кит	Cet	2	-10	1231
Chamaeleon	-ntis	Хамелеон	Cha	11	-80	132
Circinus	-ni	Циркуль	Cir	15	-60	93
Columba	-bae	Голубь	Col	6	-35	270
Coma Berenices	-mae -cis	Волосы Вероники	Com	13	+20	386
Corona Australis	-nae -lis	Южная Корона	CrA	19	-40	128
Corona Borealis	-nae -lis	Северная Корона	CrB	16	+30	179
Corvus	-vi	Ворон	Crv	12	-20	184
Crater	-eris	Чаша	Crt	11	-15	282
Cruх	-ucis	Южный Крест	Cru	12	-60	68
Cygnus	-gni	Лебедь	Cyg	21	+40	804
Delphinus	-ni	Дельфин	Del	21	+10	189
Dorado	-dus	Золотая Рыба	Dor	5	-65	179
Draco	-onis	Дракон	Dra	17	+65	1083
Equuleus	-lei	Малый Конь	Equ	21	+10	72
Eridanus	-ni	Эридан	Eri	3	-20	1138
Fornax	-acis	Печь	For	3	-30	398
Gemini	-norum	Близнецы	Gem	7	+20	514
Grus	-ruis	Журавль	Gru	22	-45	366
Hercules	-lis	Геркулес	Her	17	+30	1225
Horologium	-gii	Часы	Hor	3	-60	249
Hydra	-drae	Гидра	Hya	10	-20	1303
Hydrus	-dri	Южный Змей	Hyi	2	-75	243
Indus	-di	Индеец	Ind	21	-55	294
Lacerta	-tae	Ящерица	Lac	22	+45	201
Leo	-onis	Лев	Leo	11	+15	947
Leo Minor	-onis -ris	Малый Лев	LMi	10	+35	232
Lepus	-poris	Заяц	Lep	6	-20	290
Libra	-rae	Весы	Lib	15	-15	538
Lupus	-pi	Волк	Lup	15	-45	334
Lynx	-ncis	Рысь	Lyn	8	+45	549
Lyra	-rae	Лира	Lyr	19	+40	286
Mensa	-sae	Столовая Гора	Men	5	-80	153
Microscopium	-pii	Микроскоп	Mic	21	-35	210
Monoceros	-rotis	Единорог	Mon	7	-5	482
Musca	-cae	Муха	Mus	12	-70	138
Norma	-mae	Наугольник	Nor	16	-50	165
Octans	-ntis	Октант	Oct	22	-85	291
Ophiuchus	-chi	Змееносец	Oph	17	0	948
Orion	-nis	Орион	Ori	5	+5	594
Pavo	-vonis	Павлин	Pav	20	-65	378

Продолжение

Созвездие	Окончание родительного падежа	Русское название	Сокращение	α	δ	Площадь кв. град. [2]
Pegasus	-si	Пегас	Peg	22 ^h	+20°	1121
Perseus	-sei	Персей	Per	3	+45	615
Phoenix	-nisis	Феникс	Phe	1	-50	469
Pictor	-ris	Живописен	Pic	6	-55	247
Pisces	-cium	Рыбы	Psc	1	+15	889
Piscis Austrinus	-is -ni	Южная Рыба	PsA	22	-30	245
Puppis	-ppis	Корма	Pup	8	-40	673
Pyxis (Malus)	-xidis	Компас	Pyx	9	-30	221
Reticulum	-li	Сетка	Ret	4	-60	114
Sagitta	-tae	Стрела	Sge	20	+10	80
Sagittarius	-rii	Стрелец	Sgr	19	-25	867
Scorpius	-pii	Скорпион	Sco	17	-40	497
Sculptor	-ris	Скульптор	Scl	0	-30	475
Scutum	-ti	Щит	Set	19	-10	109
Serpens (Caput, Cauda)	-ntis	Змея. Голова Хвост	Ser	16 18	+10 -5	429 +208
Sextans	-ntis	Секстант	Sex	10	0	314
Taurus	-ri	Телец	Tau	4	+15	797
Telescopium	-pii	Телескоп	Tel	19	-50	252
Triangulum	-li	Треугольник	Tri	2	+30	132
Triangulum Australe	-li -lis	Южный Треугольник	TrA	16	-65	110
Tucana	-nae	Тукан	Tuc	0	-65	295
Ursa Major	-sae -ris	Большая Медведица	UMa	11	+50	1280
Ursa Minor	-sae -ris	Малая Медведица	UMi	15	+70	256
Vela	-lorum	Паруса	Vel	9	-50	500
Virgo	-ginis	Дева	Vir	13	0	1294
Volans	-ntis	Летучая Рыба	Vol	8	-70	141
Vulpecula	-lae	Лисичка	Vul	20	+25	268

§ 144. Объекты Каталога Мессье

Рас. ск. – рассеянное скопление, шар. ск. – шаровое скопление, план. – планетарная туманность, тум. – диффузная туманность, гал. – галактика (указывается тип).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bečvar A.*, Atlas Coeli-II Catalogue 1950,0, Prague.
2. *Observer's Handbook*, R. A. S. Canada, 1972, p. 91.
3. *Sagot R., Texereau J.*, Revue des Constellations, Soc. Astron. de France, 1963, p. 126.
- 4*. *Астрономический календарь. Постоянная часть.*
- 5*. *Куликовский П. Г.*, Справочник любителя астрономии, 4-е изд., «Наука», М., 1971.

Мессье	NGC IC	Объект	Созвездие	1950		m_v	Название и др.
				α	δ		
M 1	1952	Краб	Tau	05 ^h 31,5 ^m	+21° 59'	8,4	Крабовидная туманность
2	7089	шар. ск.	Aqr	21 30,9	-01 03	6,3	
3	5272	шар. ск.	CVn	13 39,9	+28 38	6,2	
4	6121	шар. ск.	Sco	16 20,6	-26 24	6,1	
5	5904	шар. ск.	Ser	15 16,0	+02 16	6,0	
6	6405	рас. ск.	Sco	17 36,8	-32 11	5,5	Туманность «Лагуна»
7	6475	рас. ск.	Sco	17 50,7	-34 48	5	
8	6523	тум.	Sgr	18 01,6	-24 20	5,8	
9	6333	шар. ск.	Oph	17 16,2	-18 28	7,6	
10	6254	шар. ск.	Oph	16 54,5	-04 02	6,4	
11	6705	рас. ск.	Set	18 48,4	-06 20	6,5	
12	6218	шар. ск.	Oph	16 44,0	-01 52	6,7	
13	6205	шар. ск.	Her	16 39,9	+36 33	5,8	
14	6402	шар. ск.	Oph	17 35,0	-03 13	7,8	
15	7078	шар. ск.	Peg	21 27,6	+11 57	6,3	

Продолжение

Месяць	NGC IC	Объект	Созвездие	1950		m_V	Название и др.	
				α	δ			
М 16	6611	рас. ск.	Sgr	18 16,0	-13 48	6,5	Туманность «Омега»	
17	6618	тум.	Sgr	18 18,0	-16 12	7		
18	6613	рас. ск.	Sgr	18 17,0	-17 09	7,2	Туманность «Трираздельная»	
19	6273	шар. ск.	Oph	16 59,5	-26 11	6,9		
20	6514	тум.	Sgr	17 58,9	-23 02	8,5		
21	6531	рас. ск.	Sgr	18 01,8	-22 30	6,5		
22	6656	шар. ск.	Sgr	18 33,3	-23 58	5,3		
23	6494	рас. ск.	Sgr	17 54,0	-19 01	6,5		
24	6603	рас. ск.	Sgr	18 15,5	-18 27	5		
25	I 4725	рас. ск.	Sgr	18 28,8	-19 17	6		
26	6694	рас. ск.	Set	18 42,5	-09 27	9,1		Туманность «Гантель»
27	6853	план.	Vul	19 57,4	+22 35	8,1		
28	6626	шар. ск.	Sgr	18 21,5	-24 54	7,1		
29	6913	рас. ск.	Cyg	20 22,2	+38 21	7,2		
30	7099	шар. ск.	Cap	21 37,5	-23 25	7,7		
31	224	гал. Sb	And	00 40,0	+41 00	4,0	Туманность Андромеды	
32	221	гал. E	And	00 40,0	+40 36	8,5		
33	598	гал. Sc	Tri	01 31,1	+30 24	6,0		
34	1039	рас. ск.	Per	02 38,8	+42 34	5,7		
35	2168	рас. ск.	Gem	06 05,7	+24 20	5,6		
36	1960	рас. ск.	Aur	05 32,0	+34 07	6,0		
37	2099	рас. ск.	Aur	05 49,0	+32 23	6,0		
38	1912	рас. ск.	Aur	05 25,3	+35 48	7		
39	7092	рас. ск.	Cyg	21 30,4	+48 13	5		
40		2 звезды	UMa	12 33,0	+58 30			
41	2287	рас. ск.	CMa	06 44,9	-20 42	5	Туманность Ориона	
42	1976	тум.	Ori	05 32,9	-05 25	4		
43	1982	тум.	Ori	05 33,1	-05 18	9	»	
44	2632	рас. ск.	Cnc	08 37,5	+19 52	3,7	Ясли	
45		рас. ск.	Tau	03 43,9	+23 58	1,6	Плеяды	
46	2437	рас. ск.	Pup	07 39,6	-14 42	6	«Водоворот»	
47	2422	рас. ск.	Pup	07 34,3	-14 22	5		
48	2548	рас. ск.	Hya	08 11,3	-05 39	6		
49	4472	гал. E	Vir	12 27,3	+08 16	8,9		
50	2323	рас. ск.	Mon	07 00,5	-08 16	6,5		
51	5194	гал. Sc	CVn	13 27,8	+47 27	8,4		
52	7654	рас. ск.	Cas	23 22,0	+61 20	7,1		
53	5024	шар. ск.	Com	13 10,5	+18 26	7,7		
54	6715	шар. ск.	Sgr	18 52,0	-30 32	7,7		
55	6809	шар. ск.	Sgr	19 36,9	-31 03	6,1		
56	6779	шар. ск.	Lyr	19 14,6	+30 05	8,3	Туманность «Кольцо»	
57	6720	план.	Lyr	18 51,7	+32 58	9,0		
58	4579	гал. SBb	Vir	12 35,1	+12 05	9,9		
59	4621	гал. E	Vir	12 39,5	+11 55	10,2		
60	4649	гал. E	Vir	12 41,1	+11 48	9,2		
61	4303	гал. Sc	Vir	12 19,4	+04 45	9,8		
62	6266	шар. ск.	Oph	16 58,1	-30 03	7,1		
63	5055	гал. Sb	CVn	13 13,5	+42 17	8,9		
64	4826	гал. Sb	Com	12 54,3	+21 47	8,7		
65	3623	гал. Sa	Leo	11 16,3	+13 23	9,6		
66	3627	гал. Sb	Leo	11 17,6	+13 17	9,1		
67	2682	рас. ск.	Cnc	08 48,3	+12 00	6,3		
68	4590	шар. ск.	Hya	12 36,8	-26 29	8,0		
69	6637	шар. ск.	Sgr	18 28,1	-32 23	7,8		
70	6681	шар. ск.	Sgr	18 40,0	-32 21	8,3		

Продолжение

Меcсье	NGC IC	Объект	Созвездие	1950		m_v	Название и др.
				α	δ		
М 71	6838	шар. ск.	Sge	19 51,5	+18 39	7,5	
72	6981	шар. ск.	Aqr	20 50,7	-12 44	9,2	
73	6994	рас. ск.	Aqr	20 56,4	-12 50		
74	628	гал. Sc	Psc	01 34,0	+15 32	9,6	
75	6864	шар. ск.	Sgr	20 03,2	-22 04	8,3	
76	650	план.	Per	01 38,8	+51 19	11,5	
77	1068	гал. Sb	Cet	02 40,1	-00 14	9,1	
78	2068	тум.	Ori	05 44,2	+00 02		
79	1904	шар. ск.	Lep	05 22,2	-24 34	7,4	
80	6093	шар. ск.	Sco	16 14,1	-22 52	7,2	
81	3031	гал. Sb	UMa	09 51,5	+69 18	7,0	
82	3034	гал. Ir	UMa	09 51,9	+69 56	8,7	
83	5236	гал. Sc	Hya	13 34,3	-29 37	7,6	
84	4374	гал. E	Vir	12 22,6	+13 10	9,7	
85	4382	гал. So.	Com	12 22,8	+18 28	9,5	
86	4406	гал. E	Vir	12 23,7	+13 13	9,8	
87	4486	гал. Ep	Vir	12 28,3	+12 40	9,3	Радиогалактика
88	4501	гал. Ep	Com	12 29,5	+14 42	9,8	
89	4552	гал. E	Vir	12 33,1	+12 50	10,2	
90	4569	гал. Sb	Vir	12 34,3	+13 26	9,7	
91	4567	гал. S	Com	12 34,0	+11 32	10,3	[4]
92	6341	шар. ск.	Her	17 15,6	+43 12	6,3	
93	2447	рас. ск.	Pup	07 42,4	-23 45	6	
94	4736	гал. Sb	CVn	12 48,6	+41 23	8,1	
95	3351	гал. SBb	Leo	10 41,3	+11 58	9,9	
96	3368	гал. Sa	Leo	10 44,2	+12 05	9,4	
97	3587	план.	UMa	11 12,0	+55 18	11,2	Туманность «Сова»
98	4192	гал. Sb	Com	12 11,3	+15 11	10,4	
99	4254	гал. Sc	Com	12 16,3	+14 42	9,9	
100	4321	гал. Sc	Com	12 20,4	+16 06	9,8	
101	5457	гал. Sc	UMa	14 01,4	+54 35	8,2	
102	5866	гал. Sa	Dra	15 05,1	+55 57	10,5	
103	581	рас. ск.	Cas	01 29,9	+60 27	7	
104	4594	гал. Sa	Vir	12 37,3	-11 21	8	«Сомбреро»
105	3379	гал. E	Leo	10 45,2	+12 51	9,5	
106	4258	гал. Sb	CVn	12 16,5	+47 35	9	
107	6171	шар. ск.	Oph	16 29,7	-12 57	9	
108	3556	гал. Sb	UMa	11 08,7	+55 57	10,5	
109	3992	гал. SBc	UMa	11 55,0	+53 39	10,6	

**Краткий обзор системы
астрономических постоянных
МАС (1976) *)**

П. К. Зейдельман

Новая система астрономических постоянных, которая призвана заменить систему, принятую Международным астрономическим союзом (МАС) в Гамбурге (1964), представлена ниже в краткой форме. Полное сообщение, принятое в Гренобле, вместе с пояснительными замечаниями и литературными ссылками будет опубликовано в IAU Transactions, vol. XIVB. Новая система представляет в явном виде соотношения между единицами метр, килограмм, секунда Международной системы единиц СИ и астрономическими единицами длины, массы и времени. Определяющие постоянные (произвольные величины), первичные постоянные (величины, определяемые из наблюдений) и выводимые постоянные (вычисляемые из первичных и определяющих постоянных) изменяются в нескольких случаях по сравнению с системой 1964 г. Скорость света c не дается как определяющая постоянная, поскольку это по существу было бы переопределением метра. Однако заслуживает особого внимания понимание того обстоятельства, что эта величина не будет изменяться, если изменяется определение метра. Астрономическая единица времени (сутки) в настоящее время основывается на атомной секунде, а не на продолжительности тропического года. Таким образом, новая шкала времени для использования в видимых геоцентрических эфемеридах опирается на эту единицу и отвечает от шкалы Международного атомного времени (ТАИ), так что эта последняя может непрерывно протекать вместе со шкалой эфемеридного времени для всех практических целей.

Новая шкала времени определяется точно и однозначно и будет пригодна для использования в релятивистской теории. Новая система постоянных также охватывает величины, определяющие размеры, гравитационное поле и форму Земли, главные коэффициенты прецессии и нутации, а также массы Луны и планет. Указанные величины дополняются другими постоянными и коэффициентами, необходимыми для редукции видимых положений и вычисления эфемерид.

**Рекомендация 1.
Система астрономических постоянных МАС (1976)**

Единицы

Метр (м), килограмм (кг) и секунда (с) являются соответственно единицами длины, массы и времени в Международной системе единиц (СИ).

Астрономическая единица времени – это промежуток времени в 1 сутки (сут), что составляет 86 400 с. Интервал в 36 525 суток составляет юлианское столетие. Астрономическая единица массы – это масса Солнца (\mathcal{M}_S). Астрономическая единица длины – это длина (а.е.), при которой гауссова гравитационная постоянная k принимает значение 0,017 202 098 95, причем за единицы измерения принимаются астрономические единицы длины, массы и времени. Размерность k^2 такая же, как и постоянной тяготения G , т. е. $L^3 M^{-1} T^{-2}$. Для 1 а. е. также используется термин «единичное расстояние».

Определяющие постоянные

1. Гауссова гравитационная постоянная

$$= 0,017\ 202\ 098\ 95$$

Первичные постоянные

2. Скорость света

$$c = 299\ 792\ 458\ \text{м/с}$$

*) International Astronomical Union, Information Bulletin No. 37, January 1977, pp. 37–40.

3. Световое время, соответствующее 1 а. е.,
 $\tau_A = 499,004\,782\text{ с}$
4. Экваториальный радиус Земли
 $a_e = 6\,378\,140\text{ м}$
5. Динамический форм-фактор для Земли
 $J_2 = 0,001\,082\,63$
6. Геоцентрическая гравитационная постоянная
 $GE = 3,986\,005 \cdot 10^{14}\text{ м}^3/\text{м}^2$
7. Постоянная тяготения
 $G = 6,672 \cdot 10^{-11}\text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}$
8. Отношение масс Луны и Земли
 $\mu = 0,012\,300\,02$
9. Общая прецессия в долготе за юлианское столетие (стандартная эпоха 2000)
 $p = 5\,029'',0966$
10. Наклон эклиптики (стандартная эпоха 2000)
 $\varepsilon = 23^\circ\,26'\,21'',448$
11. Постоянная нутации (стандартная эпоха 2000)
 $N = 9'',2109$

Выводимые постоянные

12. Единичное расстояние
 $c\tau_A = 1\text{ а. е.} = 1,495\,978\,70 \cdot 10^{11}\text{ м}$
13. Параллакс Солнца $\arcsin(a_e / 1\text{ а. е.}) = 8'',794\,148$
14. Постоянная аберрации (стандартная эпоха 2000)
 $\kappa = 20'',495\,52$
15. Сжатие Земли
 $f = 0,003\,352\,81 = 1/298,257$
16. Гелиоцентрическая гравитационная постоянная
 $(\text{а. е.})^3 k^2/(\text{сут}) = GS = 1,327\,124\,38 \cdot 10^{20}\text{ м}^3/\text{с}^2$
17. Отношение масс Солнца и Земли
 $(GS)/(GE) = \mathcal{M}_S / \mathcal{M}_E = 332\,946,0$
18. Отношение масс Солнца и системы Земля + Луна
 $(\mathcal{M}_S / \mathcal{M}_E) / (1 + \mu) = 328\,900,5$
19. Масса Солнца
 $(GS)/G = \mathcal{M}_S = 1,9891 \cdot 10^{30}\text{ кг}$

Система масс и планет

20. Отношение массы Солнца к массам планет
- | | | | |
|--------------|-----------|--------|-----------|
| Меркурий | 6 023 600 | Юпитер | 1 047,355 |
| Венера | 408 523,5 | Сатурн | 3 498,5 |
| Земля + Луна | 328 900,5 | Уран | 22 869 |
| | | Нептун | 19 314 |
| Марс | 3 098 710 | Плутон | 3 000 000 |

Рекомендация 2.

Новая стандартная эпоха и равноденствие

Рекомендуется следующее:

а) новая стандартная эпоха (обозначение J 2000.0) будет 2000 янв. 1^d, 5, что соответствует JD 2 451 545.0; новое стандартное равноденствие будет соответствовать указанному моменту;

б) единица времени, используемая в фундаментальных формулах для прецессии, будет юлианское столетие, равное 36 525 сут;

в) эпоха для начала года будет отличаться от стандартной эпохи кратным числом юлианских годов по 365,25 сут.

Рекомендация 3. Фундаментальная система отсчета

Рекомендуется следующее:

а) фундаментальная система отсчета, определяемая положениями и вековыми вариациями в системе FK5, будет соответствовать как можно ближе динамической системе отсчета;

б) поправка к нулевой точке прямых восхождений системы FK4 (поправка равноденствия) и поправка к смещению равноденствия FK4 будут выведены из соответствующих новых наблюдений;

в) выражение для гринвичского среднего звездного времени в 0^h UT будет улучшено путем той же самой поправки равноденствия и смещения, которая принята для FK5, чтобы исключить разрывы непрерывности в UT.

Рекомендация 4. Процедуры для вычисления видимых мест и редукции наблюдений

Рекомендуется следующее:

а) звездная абберрация будет вычисляться из полной скорости Земли, отнесенной к барицентру солнечной системы, и средние места не будут содержать E -членов;

б) табулируемая нутация будет включать вынужденные периодические члены, приведенные Вулардом для оси фигуры, вместо данных для мгновенной оси вращения, причем две калибровки, осуществленные им, будут соответственным образом пересмотрены, принимая во внимание изменения в принятом значении прецессии;

в) когда требуется высокая точность, редукции к видимому месту будут вычисляться строго и прямым путем без промежуточного вычисления среднего места для начала года.

Рекомендация 5. Шкалы времени для динамических теорий и эфемерид

Рекомендуется следующее:

а) в момент 1977, января $01^d 00^h 00^m 00^s$ значение времени по новой шкале для видимых геоцентрических эфемерид будет 1977, января 1,000 372 5 точно;

б) единица времени для названной шкалы времени – сутки, составляющие 86 400 с СИ на среднем уровне моря;

в) шкала времени для уравнений движения, отнесенных к барицентру солнечной системы, будет такой, что между этой шкалой для видимых геоцентрических эфемерид будут иметь место лишь периодические вариации;

г) в Международное атомное время не будет вводиться никаких сдвигов по времени.

Рекомендация 6. Другие величины, используемые при подготовке эфемерид

Рекомендуется при подготовке новых эфемерид использовать, как правило, значения, приведенные ниже:

1. Массы малых планет

Малая планета	Масса, в M_S
(1) Церера	$5,9 \cdot 10^{-10}$
(2) Паллада	$1,1 \cdot 10^{-10}$
(4) Веста	$1,2 \cdot 10^{-10}$

2. Массы спутников

Планета	Спутник	Массы (спутник/планета)
Юпитер	Ио	$4,70 \cdot 10^{-5}$
	Европа	$2,56 \cdot 10^{-5}$
	Ганимед	$7,84 \cdot 10^{-5}$
	Каллисто	$5,6 \cdot 10^{-5}$
Сатурн	Титан	$2,41 \cdot 10^{-4}$
Нептун	Тритон	$2 \cdot 10^{-3}$

3. Экваториальный радиус в км

Меркурий	2 439	Юпитер	71 398	Луна	1 738
Венера	6 052	Сатурн	60 000	Солнце	696 000
Земля	6 378,140	Уран	25 400		
Марс	3397,2	Нептун	24 300		
		Плутон	2 500		

4. Гравитационные поля планет

	J_2	J_3	J_4
Земля	+0,001082 03	$-0,254 \cdot 10^{-5}$	$-0,161 \cdot 10^{-5}$
Марс	+0,001964	+0,000 036	-0,000 58
Юпитер	+0,014 75		-0,0010
Сатурн	+0,016 45		
Уран	+0,012		
Нептун	+0,004		
	C_{22}	S_{22}	S_{31}
Марс	-0,000055	+0,000 031	+0,000 026

5. Гравитационное поле Луны

$\gamma = (B - A)/C = 0,000 2278$	$C/MR^2 = 0,392$
$\beta = (C - A)/B = 0,000 6313$	$I = 5552'',7 = 1^\circ 32' 32'',7$
$C_{20} = -0,000 2027$	$C_{30} = -0,000 006$
$C_{22} = +0,000 0223$	$C_{31} = +0,000 029$
	$S_{31} = +0,000 004$
	$C_{32} = +0,000 0048$
	$S_{32} = +0,000 0017$
	$C_{33} = +0,000 0018$
	$S_{33} = -0,000 001$

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютная звездная величина 180, 183
 Абсолютно черного тела излучение 100–103
 Авогадро число 22
 Активные области AR 167, 169–170
 Альбедо 105, 133–134
 Альвена волны 54
 Ассоциации звездные 244–246
 Астероиды 140
 Астрономические единицы 25
 – обозначения 16
 – постоянные 25–26
 Атмосфера звезд 184
 – Земли 113–114
 – планет 139
 Атомные конфигурации 58
 – радиусы 50
 – рассеяние 91–92
 – рекомбинации 92–94
 – эффективные сечения 47–50
- Бальмера профиль линии 85
 – скачок 177
 – серия 74
 Барions 51
 Белые карлики 180, 200, 222
 Ближайшие звезды 209–211
 Боме закон 131
 Бозоны 51
 Больцмана постоянная 22
 – распределение 39
 Бонда альбедо 133
 Бора орбита 22
 Брэкета серия 74
- Ван-дер-Ваальса силы 87
 Вегарда – Каплана полосы 126
 Венера 131–134, 139
 Весовая функция 152
 Вигнера – Кирквуда правило 65
 Внегалактические туманности 252–255
 Внутреннее строение Земли 112
 – – Солнца 149–150
 Возраст Вселенной 258–259
 – Земли 109
 – скоплений 246
 – Солнца 149
 Вольфа – Райе звезды 199
 Время 26, 109–110
 – атомное 26
 – единицы 30
 – уравнение 263
 – шкалы 109, 259
 – эфемеридное 26
 Время жизни магнитного поля 56
 – – солнечных пятен 168
 – – частиц 51
 – – элементов грануляции 169
 Всплески радиоизлучения 174
 Вспышки солнечные 171
- Газ межзвездный 233
 Галактика
 – координаты 249
 – радиоизлучение 240
 – рассеянный свет 126
 – скорость вращения 250
 – число звезд 208
 Галактики, см. Внегалактические туманности 252
 Гаунта множитель 93–94, 99
 Гаусса распределение 85–86
 Геомагнетизм 127
 Геомагнитная активность 128
 Герцшпрунга – Рессела диаграмма 180
 Гирорадиус 54, 242
 Гирочастота 54, 123
 Год 26, 28, 30
 Годичные изменения 263
 Гравитационный потенциал 107
 Грануляция 170
 Гулда пояс 248
- Двойные звезды 201–205
 Дебаевский радиус 54
 Дейтерий 51
 Диаметр характерный 16
 Дискретные радиоисточники 238–239
 Длина 16
 – единицы 17–18
- Единицы 17, 29–36
- Заголовки таблиц 13
 Запрещенные линии 49, 79, 162–163, 255
 Затменные переменные звезды 204
 Зеемана расщепление 24
 Земля 107, 134
 – внутреннее строение 112
 – вращение 108
 Земная атмосфера 113
 – кора 110–112
 Знаки 16
 Зодиакальный свет 126, 146
- Излучение абсолютно черного тела 100
 – звезд 217
 – межзвездные линии 234
 – свободно-свободное 100
 – Солнца 161
 Инглиса – Теллера формула 83
 Индекс K_p 128
 Ионизация 39–41
 – молекул 52
 – потенциалы 41–46
 – степень 40
 – эффективное сечение 47
 Ионосфера 123–125
 Ионосферные слои 124

- Кварзары 255–257
 Квантовые числа 57, 81
 Кирхгофа закон 89
 Кометы 142–143
 Комптона длина волны 23
 Корона 159–163
 Космические лучи 241–243
 Космическое радиоизлучение 237–240
 Космическое рентгеновское излучение 240–241
 Крабовидная туманность 229, 238, 241
 Крамерса – Гаунта теория 93, 99
 Кратеры 129–130, 138
 Кривая видности дневного зрения 104
 – роста 152
 Критическая частота 123
 Куна – Томаса – Рейхе правило 64
- Лаймана полосы 81
 – серия 73
 Ламберта закон 133
 Ледниковые периоды 110
 Линия поглощения 156, 175
 Логарифмические величины 14
 Ломмеля – Зеелигера закон 133
 Лоренца затухание 85
 Луна 133, 137–138
LS-связь 57
- Магнитосфера 115
 Малые планеты 140
 Марс 131–136, 139
 Межзвездная пыль 231
 Межзвездное вещество 230
 Межзвездные облака 231
 – поля 236
 Меркурий 131–134, 139
 Мессье каталог 265–267
 Местная группа галактик 253, 258
 – система галактик 248
 Метеориты 129–130
 Метеоры 144–146
 Млечный Путь 126–127, 249–250
 Молекулы 52, 81, 143, 235
 Мохоровичича раздел 110–111
 Мультиплетность 57–58, 62, 65–72
- Наиболее яркие звезды 207, 212–214
 Неоднозначность 10
 Неоднородности фактор 160, 231
 Нептун 131–136, 139
 Нутация 25, 28
- Обозначения в литературных ссылках 18–20
 Озон в атмосфере 119, 120
 Океан 108
 Ольсона полюс 249
 Оорта постоянные 249
 – предел 218
 Оптическая толщина 89, 120
 Орбиты двойных систем 202
 – комет 142
 – Луны 137
 – планет 132, 141
 – спутников 136
 Основные уровни атомов 58
 Отношение масса/светимость 252
 Ошибки 11
- Параллакс вековой 208
 – Луны 25, 137
 – Солнца 25, 148
 Период комет 28
 – солнечной активности 164
 Плазма 53–56, 100
 Планетарные туманности 222, 225–227
 Планеты 131–141
 Планка постоянная 22
 – функция 101–103
 Плотность 24, 31
 – звездная 218
 – скоплений 221
 – фотографическая 105
 Плутон 131–134, 139
 Поглощение атомное 92
 – в атмосфере Земли 119–123
 – коэффициент 88
 – отрицательным ионом водорода 98
 – при свободно-свободных переходах 99–100
 – света звезд 231–233
 – частицами 91–92
 Пойнтинга – Робертсона эффект 144
 Показатель преломления 82, 89, 117
 Полосы межзвездные 179
 – поглощения 121–123
 – силы осцилляторов 81
 – спектра 81
 Поляризуемость 90
 Полярные сияния 126–127
 Постоянные астрономические 25–26
 – математические 21
 – физические 22–24
 Потемнение к краю диска Солнца 155–156
 Поток излучения 88, 177
 Правило *f*-сумм 64
 Преломление 89, 117–118
 Прецессия 28, 262
 Противосияние 146
 Протуберанцы 171–172
 Профили спектральных линий 85–86
 Пульсары 206
 Пыль в земной атмосфере 119
- Радианты скоплений 244
 Радиационные пояса 115
 Радиоактивность 34, 111
 Разрешение спектрографа 86
 – телескопа 201
 – фотографическое 106
 Рассеянные скопления 222, 244–246
 Распространенность элементов в космическом пространстве 37–39
 – в космических лучах 243
 Расширение спектральных линий 85–87
 Рекомбинация 92
 Релаксации коэффициент 124
 Росселандово среднее 96
 Ридберга постоянная 22
 Рэлеевское рассеяние 113, 119
 Рэля – Джинса распределение 101
- Сатурн 131–136, 139
 Саха уравнение 40, 41
 Сверхгиганты 179, 180
 Светимости класс 179
 – функция 219, 239, 252

- Свечение ночного неба 126–127
 Сейфертовские галактики 255
 Силы осцилляторов 62, 65–82
 Символы 13, 16–17, 37–39
 Система СИ 29
 Скопления 244–246
 – галактик 257
 – шаровые 247–248
 Скорость освобождения 132
 – в Галактике 250
 – на Солнце 148
 Согласованность 11
 Созвездия 263–265
 Солнечная активность 164
 – атмосфера 150
 – грануляция 170
 – постоянная 154
 – температура 149, 151, 157
 Солнечные пятна 164–169
 Солнечный ветер 147
 Спектрально-двойные звезды 202
 Состав атмосферы Земли 113, 117
 – планетных атмосфер 139
 Спикулы 171
 Спиральные рукава 250
 Стефана – Больцмана постоянная 24, 100
 Стрёмгрена сферы 235
 Субгиганты 179, 180, 222
 Субкарлики 179, 180, 200, 222
- Темные туманности 230
 Теплопроводность воздуха 113
 – земной коры 111
 – плазмы 56
 Типы звездного населения 116, 215
 Томпсона рассеяние 91
 Тормозное излучение 100
 Туманности 225–230, 252
- Уран 131–136, 139
- Факелы 169–170
 Фарадеевское вращение 124
 Физические постоянные 22–24
 Флоккулы 170
 Фойгта профили 85–86
 Фотометрия визуальная 104
 – звезд 177, 181
 Фотосфера 150–158
 Франка – Кондона множители 82
 Фраунгоферовы линии 151–154
 Функция источника 89
- Хаббла постоянная 258
 Характерные размеры 15
 Хёгля – Лондона множители 81
 Хильтнера – Холла эффект 232
 Хольцмарка расширение 84, 87
 Хромосфера 158–159, 150, 171
 Хунда связь 81
- Цвета показатель 177, 181, 183
 – звезд 181–182
 Цветовая температура 157
- Чепмена теория 124
 Чувствительность глаза 104
- Шаровые скопления 184, 222, 247
 Штарка эффект 83, 87
 Шумана – Рунге полосы 81
 Шумовые бури 173
- Эквивалентная ширина линий 151–153
 – – – корональных 162
 – – – межзвездных 235
 Эквивалентные электроны 58
 Экзосфера Земли 115
 Электрический квадруполь 64
 Электрическое сопротивление удельное 56
 Электронное сродство 46
 Электронные конфигурации 58, 60–62
 – столкновения 47–50
 Эпохи геологические 110
- Юлианский день 261
 – год 28
 Юпитер 131–136, 139
- Яркость 105
 – звезд 217
 – зодиакального света 146
 – короны 160
 – ночного неба 126
 – полной Луны 127
 – Солнца 154, 157
 – чистого голубого неба 120

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к электронной версии книги	6
Предисловие ко второму русскому изданию	7
Предисловие к третьему изданию	8
Предисловие к первому изданию	9
Глава 1. Введение	10
§ 1. Цель книги и требования к включенному материалу	10
§ 2. Общий план	12
§ 3. Количественные значения символов	13
§ 4. Заголовки таблиц	13
§ 5. Логарифмические величины	14
§ 6. Характерные размеры	15
§ 7. Система обозначений	16
Глава 2. Основные постоянные и единицы.	21
§ 8. Математические постоянные	21
§ 9. Физические постоянные	22
§ 10. Основные астрономические постоянные	25
§ 11. Астрономические постоянные, включающие время	26
§ 12. Единицы	29
§ 13. Соотношения между электрическими и магнитными единицами	35
Глава 3. Атомы	37
§ 14. Элементы, их атомные веса и распространенность в космическом пространстве	37
§ 15. Возбуждение, ионизация и функция распределения	39
§ 16. Ионизационные потенциалы	46
§ 17. Электронное сродство	47
§ 18. Эффективное сечение атомов для электронных столкновений	48
§ 19. Атомные радиусы	50
§ 20. Частицы современной физики	51
§ 21. Молекулы	52
§ 22. Плазма	53
Глава 4. Спектры	57
23. Обозначения атомных состояний, уровней, термов и т. д.	57
24. Термы различных конфигураций	58
25. Электронные конфигурации	58
26. Интенсивности спектральных линий	62
27. Относительные силы линий в мультиплетах	65
28. Силы мультиплетов	68
29. Атомные силы осцилляторов для разрешенных переходов	73
30. Вероятности переходов, соответствующих запрещенным линиям	79
31. Силы осцилляторов спектральных полос	81
32. Стандарты длин волн	82
33. Эффект Штарка	83
34. Расширение линий	85
Глава 5. Излучение	88
35. Основные величины и соотношения	88
36. Показатель преломления и поляризуемость	90
37. Поглощение и рассеяние частицами	91
38. Непрерывное атомное поглощение и рекомбинация	92
39. Таблица коэффициентов атомного поглощения и рекомбинации	95
40. Поглощение веществом звездных недр	96
41. Поглощение веществом звездных атмосфер	97
42. Поглощение отрицательным ионом водорода	98
43. Поглощение и излучение при свободно-свободных переходах	99
44. Излучение абсолютно черного тела	100
45. Отражение от металлических зеркал	103
46. Визуальная фотометрия	104
47. Фотография	105

Глава 6. Земля	107
48. Размеры Земли	107
49. Геологическая шкала времени	109
50. Земная кора	110
51. Внутреннее строение Земли	112
52. Атмосфера	113
53. Изменение метеорологических величин с высотой	114
54. Протяженность земной атмосферы и распределение по высоте	115
55. Атмосферная рефракция и путь луча в воздухе	117
56. Непрерывное поглощение атмосферы	119
57. Поглощение атмосферных газов в ультрафиолетовой области спектра	120
58. Поглощение атмосферных газов в длинноволновой области спектра	121
59. Пропускание атмосферой солнечного излучения	123
60. Ионосфера	123
61. Ночное небо и полярные сияния	126
62. Геомагнетизм	127
63. Метеориты и кратеры	129
Глава 7. Планеты и спутники	131
64. Планетная система	131
65. Орбиты и физические характеристики планет	131
66. Фотометрия планет и спутников	133
67. Спутники планет	135
68. Луна	137
69. Физические условия на поверхности планет	139
70. Астероиды, или малые планеты	140
Глава 8. Межпланетная материя	142
71. Кометы	142
72. Метеоры и пылевые частицы	144
73. Зодиакальный свет	146
74. Солнечный ветер	147
Глава 9. Солнце	148
75. Размеры Солнца	148
76. Внутреннее строение Солнца	149
77. Модель фотосферы	150
78. Интенсивности фраунгоферовых линий	151
79. Сильные фраунгоферовы линии	153
80. Полное излучение Солнца	154
81. Потемнение к краю диска Солнца	155
82. Распределение энергии в спектре Солнца	156
83. Хромосфера	158
84. Корона	159
85. Линейчатый спектр короны	162
86. Вращение Солнца	163
87. Изменения солнечных пятен и солнечная активность	164
88. Солнечные пятна	167
89. Факелы и факельные поля	169
90. Грануляция, сетка, спикулы	170
91. Вспышки, протуберанцы	171
92. Радиоизлучение Солнца	173
93. Рентгеновское и ультрафиолетовое излучения Солнца	175
Глава 10. Нормальные звезды	177
94. Величины и соотношения	177
95. Спектральная классификация	179
96. Спектральный класс и абсолютная звездная величина	180
97. Цветовые системы звезд	181
98. Абсолютная звездная величина и показатель цвета	183
99. Излучение, температуры и цвета звезд	184
100. Массы, светимости, радиусы и плотности звезд	187
101. Вращение звезд	188
102. Внутреннее строение звезд	188
103. Атмосферы звезд	191
Глава 11. Звезды, имеющие особенности	192
104. Переменные звезды	192
105. Цефеиды	192

106.	Долгопериодические переменные (типа Миры Кита)	194
107.	Неправильные и полуправильные переменные	195
108.	Новые и сверхновые	196
109.	Звезды Вольфа – Райе и звезды ранних спектральных классов с эмиссионными линиями	198
110.	Пекулярные А-звезды и магнитные звезды	199
111.	Звезды пониженной светимости	200
112.	Двойные звезды	201
113.	Пульсары	206
Глава 12. Типы звездного населения и окрестности Солнца		207
114.	Ближайшие звезды	207
115.	Самые яркие звезды	207
116.	Типы звездного населения	208
117.	Числа звезд	208
118.	Звездная плотность в окрестностях Солнца	218
119.	Звездные плотности и плоскость Галактики	221
120.	Движение Солнца и соседних звезд	223
Глава 13. Туманности, источники неоптического излучения и межзвездное пространство		225
121.	Планетарные туманности	225
122.	Яркие диффузные туманности	228
123.	Темные туманности	230
124.	Межзвездные облака	231
125.	Поглощение света звезд и межзвездная пыль	231
126.	Межзвездный газ	233
127.	Излучение и поля в межзвездном пространстве	236
128.	Космическое радиоизлучение	237
129.	Космическое рентгеновское излучение	240
130.	Космические лучи	241
Глава 14. Скопления и галактики		244
131.	Рассеянные скопления и звездные ассоциации	244
132.	Шаровые скопления	247
133.	Местная система (пояс Гулда)	248
134.	Галактика	249
135.	Галактики (внегалактические туманности)	252
136.	Квезары и сейфертовские галактики	255
137.	Скопления и группы галактик	257
138.	Вселенная	258
Глава 15. Дополнительные таблицы		261
139.	Юлианские даты	261
140.	Греческий алфавит	261
141.	Таблицы прецессии	261
142.	Годичные изменения	263
143.	Созвездия	263
144.	Объекты Каталога Мессье	265
Приложение. Краткий обзор системы астрономических постоянных МАС (1976) (П. К.Зейдельман)		268
Предметный указатель		272

К. У. Аллен

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Редактор Э. Медушевская
Художник В. Суриков
Художественный редактор В. Бисенгалиев
Технический редактор Е. Потапенкова
Корректор В. Киселева

Сдано в набор 21/III 1977 г. Подписано к печати
3/XI 1977 г. Бумага тип. № 2 60×90¹/₁₆=14 бум. л.,
28 печ. л. Уч.-изд. л. 27,52. Изд. № 27/9179. Цена
3 р. 60 к. Заказ № 3136.

Издательство «Мир»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Отпечатано с матриц Ордена Трудового Красного
Знамени Ленинградской типографии № 2 имени
Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Го-
сударственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной тор-
говли, 198052, Ленинград, Л-52, Измайловский
проспект, 29 в Ленинградской типографии №4 Со-
юзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли, 196126, Ленин-
град, Ф-126,
Социалистическая ул., 14.