

В.А. Амбарцумян

Теоретическая астрофизика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
В11

В11 **В.А. Амбарцумян**
Теоретическая астрофизика / В.А. Амбарцумян – М.: Книга по Требованию, 2024. – 636 с.

ISBN 978-5-458-25889-0

Теоретическая астрофизика есть наука, которая изучает и объясняет физические явления, происходящие в небесных телах, на основе законов физики. При этом теоретическая астрофизика широко пользуется математическим аппаратом, который, однако, играет только вспомогательную роль. Теоретическая астрофизика является молодой и весьма быстро развивающейся наукой. Но ее успехи уже сейчас имеют большое значение для всех отраслей астрономии и для многих отраслей физики. Особенно широкое развитие получила теоретическая астрофизика в СССР. Первый на русском языке курс теоретической астрофизики вышел в 1939 г. и был написан редактором настоящего издания. За истекшие 12 лет эта молодая отрасль астрономии имела так много успехов и пережила такие глубокие изменения, что пришлось отказаться от мысли о простой переработке старого курса для нового издания и приступить коллективно к составлению совершенно новой книги.

ISBN 978-5-458-25889-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

§ 14.	Изменение контуров линий поглощения от центра солнечного диска к краю. Некогерентное рассеяние. Центральные остаточные интенсивности	214
	1. Изменение контуров линий поглощения от центра к краю. Эффект взаимосвязи (214). 2. Некогерентность процессов рассеяния (219). 3. Центральные остаточные интенсивности линий поглощения. Сравнение теории с наблюдениями (225). 4. Учет отклонений от термодинамического равновесия для Солнца. Звезды других спектральных классов (230).	
§ 15.	Методы изучения химического состава звезд. Результаты исследований	235
	1. Применение элементарной теории кривых роста к изучению химического состава звезд. Средняя электронная концентрация (235). 2. Распределение атомов по состояниям возбуждения (240). 3. Уточненные методы изучения химического состава звезд. Слабые линии (243). 4. Результаты исследований (247).	
§ 16.	Истолкование спектральной последовательности. Эффект абсолютной величины. Шкала эффективных температур	252
	1. Вводные замечания (252). 2. Изменение интенсивности линий с ростом температуры звезд (254). 3. Влияние ускорения силы тяжести (258). 4. Различие спектров карлика и гиганта. Эффект абсолютной величины (262). 5. Шкала эффективных температур (266).	
Глава III.	Физика солнечной оболочки	274
§ 17.	Строение солнечной фотосферы. Грануляция. Конвекция	274
	1. Строение солнечной фотосферы (274). 2. Конвективные процессы в солнечной фотосфере. Грануляция (279).	
§ 18.	Электродинамика солнечной атмосферы	284
	1. Вводные замечания (284). 2. Проводимость солнечной атмосферы в магнитном поле (286). 3. Взаимодействие электронов и ионов (290). 4. Электрические поля на Солнце (294). 5. Тепловые и механические действия токов (296). 6. Учет самоиндукции (299). 7. Распространение магнитного поля (302).	
§ 19.	Солнечные пятна и факелы	304
	1. Вводные замечания. Лучистое равновесие солнечных пятен (304). 2. Спектр пятна. Температура. Электронное давление (307). 3. Возможные причины понижения температуры в пятне. Магнитное поле пятен (312). 4. Солнечные факелы. Распределение температуры в факеле с глубиной (315). 5. Спектр факелов (320).	
§ 20.	Протуберанцы	322
	1. Классификация протуберанцев (322). 2. Движения вещества в протуберанцах (327). 3. Спектры протуберанцев (330). 4. Самопоглощение в протуберанцах (331). 5. Возбуждение атомов в протуберанцах (336). 6. Ионизация атомов. Электронное давление (340). 7. Кинетическая температура протуберанцев. Химический состав (343). 8. Возможное истолкование явлений, наблюдаемых в протуберанцах (346).	

§ 21.	Хромосфера. Флоккулы. Хромосферные вспышки	352
	1. Исследование распределения излучающих атомов с высотой на основании наблюдений (352). 2. Самопоглощение. Закон изменения плотности вещества с высотой (358). 3. Электронная концентрация. Электронная температура (360). 4. Ионизация атомов (362). 5. Механизм возбуждения атомов (366). 6. Равновесие хромосферы (367). 7. Физика флоккулов (370). 8. Хромосферные вспышки (377).	
§ 22.	Корона и радиоизлучение Солнца	381
	1. Общее описание и спектры (381). 2. Электронная концентрация (384). 3. Отождествление корональных линий (388). 4. Ионизация атомов в короне (390). 5. Химический состав короны (393). 6. Ультрафиолетовое излучение короны и хромосферы (395). 7. Радиоизлучение Солнца (398).	
Глава IV. Планетарные туманности		403
§ 23.	Механизм свечения туманностей. Температуры ядер	404
	1. Наблюдательные данные (404). 2. Причина свечения туманностей (406). 3. Определение температур ядер по линиям водорода (409). 4. Определение температур ядер по линиям «небулия» (414).	
§ 24.	Физическое состояние вещества в туманностях	417
	1. Необходимые условия для появления запрещенных линий (417). 2. Накопление атомов в метастабильных состояниях (419). 3. Определение температур туманностей (423). 4. Интенсивности бальмеровских линий (425). 5. Ионизация в туманностях (428). 6. Массы туманностей (432). 7. Химический состав туманностей (435).	
§ 25.	Лучистое равновесие планетарных туманностей	438
	1. Поле L_{γ} -излучения (438). 2. Поле L_{α} -излучения (442). 3. Световое давление в туманностях (446). 4. Проблема происхождения планетарных туманностей (449).	
Глава V. Новые звезды		451
§ 26.	Вспышки новых звезд и их истолкование	451
	1. Наблюдательные данные (451). 2. Объяснение вспышки (454). 3. Истолкование кривой блеска (457). 4. Истолкование спектра (460). 5. Новая Геркулеса 1934 г. (463).	
§ 27.	Роль выбрасываемых оболочек в развитии новой звезды . . .	468
	1. Массы оболочек (468). 2. Динамика оболочек (470). 3. Энергия, выделяемая при вспышке (474). 4. Роль вспышки в развитии звезды (476).	
Глава VI. Звезды с яркими спектральными линиями		479
§ 28.	Формирование эмиссионных линий	479
	1. Звезды типов Вольф-Райе, Р Лебеда и Ве (479). 2. Истечение вещества из звезд (481). 3. Контуры эмиссионных линий (484). 4. Интенсивности эмиссионных линий (491).	

§ 29. Проблемы физики звезд с яркими спектральными линиями	499
1. Температуры звезд (499). 2. Непрерывный спектр (505).	
3. Звезды поздних классов с яркими линиями (514). 4. Звездные ассоциации (517).	
Глава VII. Внутреннее строение звезд	521
§ 30. Основные сведения	521
1. Постановка проблемы (521). 2. Основные эмпирические соотношения (524).	
§ 31. Физические условия внутри звезд	528
1. Температура и плотность звездных недр (528). 2. Коэффициент поглощения звездного вещества (533). 3. Источники звездной энергии (536).	
§ 32. Внутреннее строение звезд	543
1. Строение звезд главной последовательности (543). 2. Теория строения белых карликов (546).	
Глава VIII. Рассеяние света в планетных атмосферах	553
§ 33. Теория переноса излучения в планетных атмосферах	553
1. Перенос излучения в планетных атмосферах. Индикатриса рассеяния (553). 2. Принцип инвариантности и его применение (558). 3. Обобщение на случай асферической индикатрисы рассеяния (565).	
§ 34. Сравнение теории с наблюдениями	568
1. Альbedo планетной атмосферы (568). 2. Сравнение с наблюдениями (570). 3. Полосы поглощения (574).	
Глава IX. Межзвездное вещество	577
§ 35. Пылевая составляющая межзвездного вещества	577
1. Некоторые основные факты (577). 2. Диффузные туманности (590). 3. Флуктуации в числах внегалактических туманностей (599).	
§ 36. Газовая составляющая межзвездного вещества	605
1. Межзвездный газ (605). 2. Образование межзвездных линий поглощения (608). 3. Ионизация межзвездного газа (613). 4. Поля H α -свечения (614). 5. Гигантские газовые туманности (616).	
Приложения	618
Литература	625
Предметный указатель	628

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Теоретическая астрофизика есть наука, которая изучает и объясняет физические явления, происходящие в небесных телах, на основе законов физики. При этом теоретическая астрофизика широко пользуется математическим аппаратом, который, однако, играет только вспомогательную роль.

Теоретическая астрофизика является молодой и весьма быстро развивающейся наукой. Но ее успехи уже сейчас имеют большое значение для всех отраслей астрономии и для многих отраслей физики. Особенно широкое развитие получила теоретическая астрофизика в СССР.

Первый на русском языке курс теоретической астрофизики вышел в 1939 г. и был написан редактором настоящего издания. За истекшие 12 лет эта молодая отрасль астрономии имела так много успехов и пережила такие глубокие изменения, что пришлось отказаться от мысли о простой переработке старого курса для нового издания и приступить коллективно к составлению совершенно новой книги.

Если в 1939 г. основное содержание теоретической астрофизики составляли проблемы лучистого переноса энергии и возбуждения атомов в атмосферах звезд и в туманностях, то теперь наряду со значительным углублением и уточнением проблем, связанных с полем излучения и лучистым равновесием, в теоретической астрофизике все большую роль начинают играть процессы, происходящие в существующих на звездах и на Солнце макроскопических электромагнитных полях. Понятно, почему эти вопросы стали разрабатываться значительно позже, чем вопросы теории лучистого равновесия. Наблюдая излучение звезд и туманностей, мы непосредственно получаем данные о поле излучения в виде значений интенсивностей излучений, выходящих с поверхности этих светил. Эти данные

являются материалом для обоснования и для проверки результатов теории лучистого равновесия. При изучении макроскопических электромагнитных полей мы находимся в более сложном положении, так как о них мы должны судить по вызываемым ими движениям заряженных частиц — движениям, наблюдение которых встречает значительные препятствия и осуществляется лишь благодаря применению новых методов изучения. Важная роль этих полей раскрывается полнее только в случае Солнца.

Литература по теоретической астрофизике, выходящая в западных странах, в огромной своей части посвящена созданию и разбору различных схематических моделей внутреннего строения звезд, подчас весьма далеких от действительности. Большинство этих работ оторвано от фактических данных, на которые должна опираться теоретическая астрофизика. Мы отвели для теории внутреннего строения звезд в настоящем курсе лишь то место, которое необходимо для изложения ее общих положений.

Не только в области проблем внутреннего строения звезд, но и в большинстве других отраслей теоретической астрофизики в капиталистических странах получили широкое распространение формальные методы исследования, сводящиеся иногда к чисто математическим упражнениям, не имеющим ничего общего с реальной действительностью, с наблюдениями над объектами, изучаемыми астрофизикой.

Советские ученые, работающие в области теоретической астрофизики, руководствуясь методом диалектического материализма, всегда связывают свои работы с реальной действительностью, используя математический и физический аппарат как важное и мощное средство изучения небесных светил.

В области теоретической астрофизики советские ученые сейчас занимают ведущее место в мире. Авторы этой книги своими исследованиями внесли значительный вклад в излагаемые ими разделы теоретической астрофизики. Поэтому изложение многих вопросов в настоящем курсе носит совершенно оригинальный характер и подчас резко отличается от всего, что опубликовано в научной литературе. Это следует иметь в виду при изучении курса.

Главы I, II, III курса написаны Э. Р. Мустелем, главы IV, V, VI — В. В. Соболевым, глава VII — А. Б. Северным, главы VIII и IX — В. А. Амбарцумяном.

Авторы выражают благодарность С. Б. Пикельнеру, написавшему параграфы 18 и 22, вошедшие в главу III.

Курс предназначен для студентов университетов, аспирантов и научных работников. В новой области науки неизбежны ошибки, но следует надеяться, что этот курс содержит их не так уж много.

Мы будем весьма благодарны всем читателям за указание недостатков и критические замечания.

В. Амбарцумян

ГЛАВА I

ТЕОРИЯ ЛУЧИСТОГО РАВНОВЕСИЯ ЗВЕЗДНЫХ ФОТОСФЕР И НЕПРЕРЫВНЫЙ СПЕКТР ЗВЕЗД

§ 1. Вводные замечания

В первой главе настоящего курса будут рассмотрены вопросы, связанные с физическим строением звездных фотосфер. Наблюдения над самой близкой к нам звездой — Солнцем, позволили установить, что его атмосферу можно разделить на ряд слоев, отличающихся друг от друга своими физическими характеристиками. Самую нижнюю и наиболее плотную часть солнечной атмосферы называют *фотосферой*. Фотосферные слои излучают практически всю ту световую энергию, которую Солнце посылает в пространство. Непрерывный спектр Солнца в основном является спектром фотосферного излучения.

Линии поглощения солнечного спектра (за исключением ядер сильных линий поглощения) образуются примерно в тех же слоях фотосферы, в которых образуется и непрерывный спектр. Производимое часто в литературе разделение нижних слоев солнечной оболочки на фотосферу и обращаящий слой имеет условный характер.

Над фотосферой Солнца расположены *хромосфера* (толщиной около 15 000 км) и *солнечная корона* (протяженность которой с учетом корональных лучей составляет несколько солнечных радиусов). Роль хромосферы и короны в образовании непрерывного спектра Солнца в видимой области спектра ничтожна и является значительной лишь в далекой ультрафиолетовой области спектра (за пределом серии Лаймана), а также в области очень длинных волн (включая и диапазон ультракоротких радиоволн).

О наличии хромосферы и короны у звезд, существенно отличающихся по своему спектральному типу от Солнца, мы знаем пока очень мало. Существование же фотосферных слоев является неотъемлемым свойством каждой звезды, ибо это те слои, которые определяют ее блеск. Что же касается взаимоотношения между фотосферными слоями и теми слоями, в которых создаются линии поглощения, то этот вопрос является более сложным. Ряд физических

соображений указывает, что для большинства звезд несолнечного типа эти слои являются более или менее общими.

Таким образом, общие теоретические положения, которые будут нами рассмотрены в первой главе курса, применимы не только к Солнцу, но и к весьма большой группе звезд. Однако при выборе объектов мы сделаем ряд ограничений. Во-первых, мы будем изучать лишь звезды, блеск которых не меняется со временем или меняется достаточно медленно. Во-вторых, мы ограничим исследование звездами, толщина фотосферных слоев которых весьма мала по сравнению с радиусом звезды. Наконец, мы исключим из рассмотрения звезды, характеризующиеся некоторыми особенностями спектра (звезды Вольф-Райе, звезды типа Р Лебеда и т. д.).

Рассмотрим эти ограничения более подробно. У звезд с постоянным блеском мы можем считать состояние фотосфер установившимся, не меняющимся со временем. При этом, конечно, такое предположение верно лишь в среднем. Действительно, как показывают наблюдения, отдельные области поверхности такой, например, «постоянной» звезды, как Солнце, испытывают временами значительные изменения (солнечные пятна, факелы и т. д.). Все же мы можем считать, что стационарность состояния фотосферных слоев Солнца в целом соблюдается. То же можно сказать и об остальных звездах с постоянным блеском.

Перейдем ко второму ограничению. Изучение Солнца показало, что толщина его фотосферы весьма невелика и составляет около 100—300 км. По сравнению с радиусом Солнца (695 300 км) это, конечно, чрезвычайно малая величина. Поэтому в наших задачах солнечную фотосферу можно рассматривать как состоящую из плоскопараллельных слоев. Теоретические подсчеты показывают, что это условие соблюдается и для большинства остальных стационарных звезд.

Наконец, звезды Вольф-Райе, звезды типа Р Лебеда и др. являются совершенно особой группой звезд; они будут рассмотрены позже.

Следует отметить, что введенные нами ограничения исключают из рассмотрения ничтожную в процентном отношении часть звезд. Поэтому наши теоретические построения будут справедливы для весьма широкой группы объектов.

Главные задачи, которые ставит перед собой теория звездных фотосфер, в основном таковы:

1) Установление закона изменения температуры, давления, плотности и других физических характеристик с глубиной в звездной (и солнечной) фотосфере.

2) Объяснение особенностей непрерывного спектра звезд и Солнца.

3) Выяснение закона изменения яркости на диске Солнца и звезд.

Первая из этих задач — главная; ее решение определяет решение и остальных двух.

§ 2. Основные понятия теории излучения. Уравнения переноса

1. Роль излучения в звездных фотосферах. Физическое состояние любого элемента вещества внутри звездной фотосферы определяется взаимодействием этого элемента с окружающей средой. Главный вопрос, который нас интересует, это вопрос о том, каким способом происходит перенос энергии в фотосферных слоях. При этом речь будет идти только о тепловой энергии. В тепловую энергию мы включаем внутреннюю кинетическую энергию теплового движения частиц, энергию возбуждения атомов и энергию ионизации (см. далее).

Остальные виды внутренней энергии в фотосферах обычных звезд являются несущественными. Например, ядерные процессы (с выделением энергии) в фотосферах звезд не играют заметной роли. Необходимо указать следующие процессы, которые могут осуществлять обмен тепловой энергией в звездной фотосфере.

- 1) Перенос тепловой энергии путем теплопроводности.
- 2) Перенос тепловой энергии путем конвекции, т. е. перенос тепла путем непосредственного передвижения масс газа.
- 3) Перенос тепловой энергии излучением. При этом подразумевается, что само излучение носит исключительно тепловой характер, т. е. определяется только температурой газа (меняющейся, конечно, от места к месту).

Многочисленные исследования показали, что первый процесс в звездных фотосферах не играет существенной роли [1, § 12]. Эти же исследования установили, что в подавляющем большинстве случаев, по крайней мере для тех звезд, которыми мы ограничиваемся, обмен тепловой энергией осуществляется в основном тепловым излучением; что это так, мы увидим из дальнейших рассуждений.

Поэтому мы сейчас обратим наше главное внимание на вопросы, связанные с тепловым излучением. При этом вначале мы напомним ряд основных определений теории теплового излучения.

2. Интенсивность и поток излучения. Рассмотрим полость, пронизываемую во всех направлениях излучением. В этой полости выберем произвольно ориентированную малую площадку $d\sigma$ и восставим к ней в точке P нормаль n (рис. 1). Далее, под углом ϑ к нормали проведем прямую L , которую примем за ось элементарного конуса с телесным углом $d\omega$. Если через каждую точку границы площадки $d\sigma$ мы проведем линию, параллельную ближайшей образующей конуса $d\omega$, то будет построен усеченный полубесконечный конус $d\Omega$, подобный

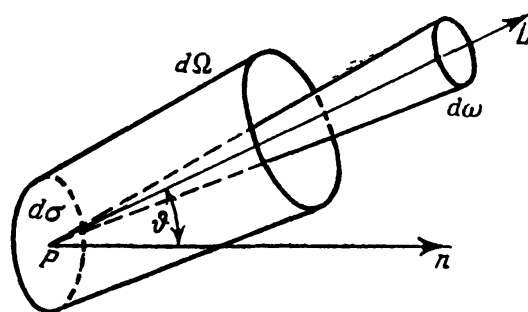


Рис. 1.

конусу $d\omega$. Площадь его сечения, перпендикулярного к L , при точке P будет равна $d\sigma \cos \vartheta$.

Пусть dE_ν — полное количество энергии, проходящей за время dt внутри *) конуса $d\Omega$ через площадку $d\sigma$, отнесенное к интервалу частот, заключенному между ν и $\nu + d\nu$. Тогда *удельной интенсивностью излучения*, или просто интенсивностью I_ν , называется следующий предел:

$$I_\nu = \lim_{d\sigma, dt, d\omega, d\nu \rightarrow 0} \frac{dE_\nu}{d\sigma \cos \vartheta dt d\omega d\nu}. \quad (2.1)$$

Этот предел в общем случае является функцией координат (т. е. местоположения) точки P , направления L , времени t и частоты ν .

Появление в (2.1) $\cos \vartheta$ объясняется тем, что мы рассматриваем пучок, идущий не в направлении нормали n , а в направлении L ; количество энергии, проходящей внутри телесного угла $d\Omega$, определяется не самой площадкой $d\sigma$, а ее проекцией на плоскость, перпендикулярную к направлению L .

На основании определения (2.1) мы можем вычислить количество энергии dE_ν , если знаем I_ν :

$$dE_\nu = I_\nu d\sigma \cos \vartheta dt d\omega d\nu. \quad (2.2)$$

Для величин dE и I , проинтегрированных по всему спектру, мы будем вместо (2.2) иметь:

$$dE = I d\sigma \cos \vartheta dt d\omega. \quad (2.3)$$

Количество лучистой энергии dE_ν в (2.2) относится к телесному углу $d\omega$. Полное же количество энергии излучения dE_ν^* , проходящего через площадку $d\sigma$ во всех направлениях, будет равно:

$$dE_\nu^* = d\sigma dt d\nu \int_{4\pi} I_\nu \cos \vartheta d\omega. \quad (2.4)$$

Поскольку при $\vartheta > \frac{\pi}{2}$ множитель $\cos \vartheta$ отрицателен, то dE_ν^* фактически представляет собой избыток энергии, проходящей за время dt в интервале частот $d\nu$ через площадку $d\sigma$ наружу по отношению к энергии, проходящей через ту же площадку внутрь. *Потоком излучения πH_ν* , называется величина этого избытка в единицу времени, отнесенная к площадке единичного сечения и к еди-

*) То-есть вдоль тех направлений, которые после пересечения площадки $d\sigma$ целиком остаются внутри $d\Omega$. Мы получим всю совокупность таких лучей, если в каждой точке площадки $d\sigma$ построим конус, содержащий совокупность направлений, параллельных всем тем, которые содержатся внутри $d\omega$. Понятно поэтому, что при малых $d\sigma$ и $d\omega$ энергия, проходящая через $d\sigma$ внутри $d\Omega$, будет пропорциональна $d\sigma d\omega$.