

В. В. СОБОЛЕВ

Курс ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ АСТРОФИЗИКИ

М

—

—

—

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■



В. В. СОБОЛЕВ

КУРС ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ АСТРОФИЗИКИ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности «Астрономия»*



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1985

22.632
С 54
УДК 523.03

Соболев В. В. **Курс теоретической астрофизики**, — 3-е изд., перераб.— М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985.—504 с.

В книге изложены основы теоретической астрофизики, изучающей строение небесных тел и происходящие в них физические процессы. Последовательно рассмотрены атмосферы звезд, Солнца и планет, а затем газовые туманности, нестационарные звезды и межзвездная среда. Значительное внимание уделено теории внутреннего строения звезд.

Табл. 56. Ил. 46. Библиогр. 85 назв.

Рецензент

доктор физико-математических наук *Ю. Н. Гнедин*

С $\frac{1705040000-069}{053(02)-85}$ 156—85

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1975,
с изменениями, 1985

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию	7
Предисловие ко второму изданию	7
Из предисловия к первому изданию	7
Глава I. Звездные фотосферы	9
§ 1. Лучистое равновесие звездной фотосферы	9
1. Поле излучения (9). 2. Уравнение переноса излучения (12). 3. Уравнение лучистого равновесия (14). 4. Геометрическая модель фотосферы (16).	
§ 2. Теория фотосфер при коэффициенте поглощения, не зависящем от частоты	17
1. Основные уравнения (17). 2. Приближенное решение уравнений (19). 3. Применение квадратурных формул (22). 4. Интегральное уравнение Милна (23). 5. Распределение яркости по диску звезды (26).	
3. Точное решение основных уравнений	27
1. Уравнение для резольвенты (27). 2. Вспомогательные уравнения (29). 3. Определение функции $\Phi(\tau)$ (30). 4. Решение однородного уравнения (32). 5. Интенсивность выходящего излучения (33). 6. Применение к звездным фотосферам (35).	
§ 4. Локальное термодинамическое равновесие	38
1. Поле излучения при термодинамическом равновесии (38). 2. Предположение о локальном термодинамическом равновесии звездной фотосферы (40). 3. Излучение, выходящее из фотосферы (42). 4. Зависимость температуры и плотности от глубины (45). 5. Световое давление в фотосфере (47).	
§ 5. Зависимость коэффициента поглощения от частоты	50
1. Излучение и поглощение в непрерывном спектре (50). 2. Поглощение атомами водорода (52). 3. Поглощение отрицательными ионами водорода (54). 4. Рассеяние света свободными электронами (56). 5. Средний коэффициент поглощения (57).	
§ 6. Теория фотосфер при коэффициенте поглощения, зависящем от частоты	60
1. Приближенная теория (60). 2. Случай поглощения атомами одного рода (63). 3. Модели фотосфер (67). 4. Горячие звезды (68). 5. Холодные звезды (69). 6. Белые карлики (71). 7. Фотосферы при отсутствии ЛТР (72).	
§ 7. Специальные вопросы теории фотосфер	74
1. Протяженные фотосферы (74). 2. Покровный эффект (75). 3. Эффект отражения в тесных парах (77). 4. Поляризация излучения горячих звезд (79).	
Глава II. Звездные атмосферы	83
§ 8. Коэффициент поглощения в спектральной линии	83
1. Эйнштейновские коэффициенты переходов (83). 2. Коэффициент поглощения, обусловленный затуханием излучения и тепловым движением атомов (87). 3. Эффекты давления (91). 4. Эффект Штарка (94).	
§ 9. Линии поглощения при локальном термодинамическом равновесии	98
1. Основные формулы (98). 2. Определение профилей линий (101). 3. Слабые линии и крылья сильных линий (103). 4. Отклонения от термодинамического равновесия (105).	

§ 10. Линии поглощения при когерентном рассеянии	107
1. Модель Шварцшильда—Шустера (107). 2. Модель Эддингтона (111). 3. Флуоресценция в звездных атмосферах (114). 4. Точное решение задачи (117).	
§ 11. Линии поглощения при некогерентном рассеянии	120
1. Перераспределение излучения по частотам внутри линии (129). 2. Уравнение переноса излучения и его решение (123). 3. Центральные интенсивности линий поглощения (126). 4. Изменение профилей линий на диске Солнца (129). 5. Многоуровневный атом (130).	
§ 12. Химический состав звездных атмосфер	131
1. Эквивалентные ширины линий (131). 2. Кривая роста для модели Шварцшильда—Шустера (133). 3. Кривая роста для модели Эддингтона (135). 4. Построение кривых роста по наблюдательным данным (137). 5. Содержание различных атомов в атмосферах (138).	
§ 13. Физические условия в атмосферах	141
1. Возбуждение и ионизация атомов (141). 2. Концентрация свободных электронов (144). 3. Турбулентность в атмосферах (146). 4. Вращение звезд (147). 5. Магнитные поля звезд (151).	
§ 14. Звезды разных спектральных классов	153
1. Зависимость спектра от температуры (153). 2. Влияние ускорения силы тяжести на спектр (156). 3. Звезды ранних спектральных классов (157). 4. Звезды поздних спектральных классов (160). 5. Белые карлики (162).	
Г л а в а III. Атмосфера Солнца	167
§ 15. Общие сведения	167
1. Фотосфера Солнца (167). 2. Конвекция и грануляция (170). 3. Солнечные пятна (172). 4. Солнечная активность (174).	
§ 16. Хромосфера	176
1. Интенсивности линий (176). 2. Самопоглощение в линиях (178). 3. Распределение атомов по высоте (181). 4. Возбуждение атомов в хромосфере (183). 5. Ультрафиолетовый спектр Солнца (184). 6. Линия L_{α} в спектре Солнца (186).	
§ 17. Корона	188
1. Излучение короны (188). 2. Происхождение непрерывного спектра (190). 3. Электронная концентрация (192). 4. Корональные линии (195). 5. Температура короны (197). 6. Ионизация и возбуждение атомов (200). 7. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения (204).	
§ 18. Радиоизлучение Солнца	205
1. Результаты наблюдений (205). 2. Радиоизлучение спокойного Солнца (207). 3. Распределение радиоизлучения по диску (210). 4. Распространение радиоволн в короне (215). 5. Спорадическое радиоизлучение (215). 6. Сверхкорона Солнца (216).	
Г л а в а IV. Атмосферы планет	219
§ 19. Рассеяние света в планетных атмосферах	219
1. Основные уравнения (219). 2. Полубесконечная атмосфера (222). 3. Атмосфера конечной оптической толщины (224). 4. Отражение света поверхностью планеты (228). 5. Альbedo планеты (230).	
§ 20. Оптические свойства планетных атмосфер	233
1. Атмосфера Венеры (233). 2. Атмосфера Марса (238). 3. Атмосфера Земли (240). 4. Интерпретация спектров планет (242).	
§ 21. Строение планетных атмосфер	246
1. Температуры планет (246). 2. Радиоизлучение планет (249). 3. Модели планетных атмосфер (250). 4. Верхние слои атмосферы (252).	

Глава V. Газовые туманности	
§ 22. Механизм свечения туманностей	251
1. Наблюдательные данные (257). 2. Причина свечения туманностей (259). 3. Теорема Росселанда (261). 4. Определение температур звезд по линиям водорода (263). 5. Излучение звезд в ультрафиолетовой области спектра (266). 6. Определение температур звезд по линиям «небулия» (269).	
§ 23. Ионизация атомов	271
1. Число рекомбинаций (271). 2. Степень ионизации в туманности (273). 3. Ионизация в туманности большой оптической толщины (275). 4. Энергетический баланс свободных электронов (278).	
§ 24. Возбуждение атомов	284
1. Возбуждение при фотоионизациях и рекомбинациях (284). 2. Интенсивности эмиссионных линий (287). 3. Роль столкновений (289). 4. Массы и плотности туманностей (290).	
§ 25. Запрещенные линии	293
1. Необходимые условия для появления запрещенных линий (293). 2. Вероятности столкновений (297). 3. Интенсивности запрещенных линий (298). 4. Электронные температуры и концентрации (301). 5. Химический состав туманностей (303).	
§ 26. Непрерывный спектр	305
1. Рекомбинация и свободно-свободные переходы (305). 2. Двухфотонное излучение (309). 3. Влияние столкновений (312). 4. Сравнение теории с наблюдениями (314). 5. Излучение в других областях спектра (315).	
§ 27. Диффузия излучения в туманностях	316
1. Поле L_c -излучения (316). 2. Поле L_α -излучения в неподвижной туманности (322). 3. Поле L_α -излучения в расширяющейся туманности (328). 4. Световое давление в туманностях (332).	
Глава VI. Нестационарные звезды	337
§ 28. Звезды с яркими спектральными линиями	337
1. Звезды ранних классов с яркими линиями (337). 2. Профили эмиссионных линий (340). 3. Интенсивности эмиссионных линий (343). 4. Звезды типа Be (348). 5. Звезды типа Вольфа — Райе (351). 6. Звезды поздних классов с яркими линиями (355). 7. Вспыхивающие звезды (358).	
§ 29. Новые звезды	361
1. Наблюдательные данные (361). 2. Объяснение вспышки (365). 3. Первый период вспышки (367). 4. Небулярная стадия (371). 5. Новая Геркулеса 1934 г. (373). 6. Новые звезды через много лет после вспышки (379).	
§ 30. Движение и свечение оболочек	380
1. Энергия, выделяемая при вспышке (380). 2. Интерпретация кривой блеска (383). 3. Выбрасывание вещества из звезды (387). 4. Движение оболочки в межзвездной среде (389).	
§ 31. Сверхновые звезды	391
1. Результаты наблюдений (391). 2. Синхротронное излучение (393). 3. Крабовидная туманность (396). 4. Сверхновые звезды и космические лучи (399). 5. Пульсары (400).	
Глава VII. Межзвездная среда	404
§ 32. Межзвездная пыль	404
1. Связь между звездами и туманностями (404). 2. Флуктуации яркости Млечного Пути (407). 3. Свечение пылевых туманностей (411). 4. Природа пылевых частиц (416). 5. Поляризация света звезд (418).	

§ 33. Межзвездный газ	420
1. Ионизация межзвездного водорода (420). 2. Ионизация других атомов (423). 3. Межзвездные линии поглощения (427). 4. Физическое состояние межзвездного газа (431). 5. Движение межзвездного газа (432).	
§ 34. Космическое радиоизлучение	435
1. Излучение зоны Н II (435). 2. Нетепловое излучение (437). 3. Монохроматическое радиоизлучение (439). 4. Линии поглощения в радиодиапазоне (442). 5. Космические мазеры (444). 6. Радиоизлучение Метагалактики (446). 7. Квazarы (448).	
Г л а в а VIII. Внутреннее строение звезд	452
§ 35. Уравнения равновесия звезды	453
1. Уравнение механического равновесия (453). 2. Плотность, давление и температура внутри звезды (455). 3. Гравитационная энергия звезды (457). 4. Уравнение энергетического равновесия (460). 5. Стандартная модель звезды (461).	
§ 36. Физические процессы внутри звезд	464
1. Уравнение состояния звездного вещества (464). 2. Вырождение газа (466). 3. Перенос энергии внутри звезды (470). 4. Ядерные реакции как источник звездной энергии (473).	
§ 37. Строение и эволюция звезд	476
1. Основные уравнения (476). 2. Методы расчета звездных моделей (478). 3. Модели звезд (481). 4. Уравнения развития звезды (483). 5. Строение белых карликов (485). 6. Нейтронные звезды (490). 7. Проблема эволюции звезд (498).	
Таблицы основных физических и астрономических постоянных	497
Предметный указатель	498

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Первое издание этой книги вышло в свет в 1967 г., а второе — в 1975 г. В течение последнего двадцатилетия теоретическая астрофизика развивалась чрезвычайно быстро, однако основы этой науки изменились в небольшой степени. Поэтому и третье издание книги не сильно отличается от предыдущих (хотя во многих местах текст сокращен, а в других существенно дополнен). Новейшие достижения астрофизики обычно излагаются в специальных курсах, читаемых для студентов после изучения ими «Курса теоретической астрофизики».

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Второе издание «Курса теоретической астрофизики» отличается от первого издания в основном рядом дополнений, отражающих наиболее важные достижения астрофизики последних лет. Кроме того, значительно обновлены приложенные к каждой главе списки литературы. Сделаны также небольшие изменения в тексте (исправлены замеченные опечатки, уточнены некоторые сведения и т. д.). Для более глубокого изучения вопросов, затронутых в учебнике, можно обратиться к монографиям из серии «Проблемы теоретической астрофизики», опубликованным издательством «Наука». Ссылки на них имеются в соответствующих местах учебника.

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Настоящая книга написана на основе лекций, читавшихся автором в Ленинградском университете в течение последних двадцати лет.

За прошедшие годы теоретическая астрофизика претерпела существенные изменения. Прежде всего чрезвычайно расширился круг наблюдательных данных, которые теоретическая астрофизика должна интерпретировать. В значительной мере это связано с появлением и быстрым развитием радиоастрономии и заатмосферной астрофизики. С другой стороны, в самой теоретической астрофизике возник ряд новых важных представлений: об огромной роли ядерных реакций в энергетике и эволюции звезд, о большом влиянии электромагнитных сил на состояние звездных атмосфер и межзвездной сре-

ды и т. д. Вместе с тем в этой науке были разработаны новые сильные методы (в частности, в теории переноса излучения), а также произведено усовершенствование известных методов с целью использования возможностей, даваемых электронными вычислительными машинами.

Предлагаемая книга состоит из восьми глав. В двух первых из них рассматриваются проблемы образования непрерывного и линейчатого спектров звезд. Подробно исследуются процессы поглощения и испускания лучистой энергии, происходящие в элементарном объеме, а также процессы переноса лучистой энергии через поверхностные слои звезд. Здесь же показывается как по наблюдаемым звездным спектрам определяются физические условия в поверхностных слоях звезд и их химический состав.

Глава III специально посвящена солнечной атмосфере. Близость к нам Солнца позволяет изучить детали на его диске, а также самые внешние слои солнечной атмосферы — хромосферу и корону. В гл. IV речь идет о планетных атмосферах, светящихся, как известно, вследствие рассеяния ими солнечного излучения.

В главе V изложена физика газовых туманностей, представляющая собой сравнительно простой и очень хорошо разработанный раздел астрофизики. Здесь много места уделено вопросам ионизации и возбуждения атомов, образования эмиссионных спектров и др. Результаты, полученные при изучении газовых туманностей, применяются затем при рассмотрении нестационарных звезд (в гл. VI) и межзвездной среды (в гл. VII). Книга заканчивается главой, посвященной теории внутреннего строения звезд.

При работе над книгой автор не ставил перед собой задачи положить в ней все разделы теоретической астрофизики с одинаковой полнотой. Если бы поступить иначе, то при заданном объеме книги она состояла бы из частей, очень далеких друг от друга, и по ней нельзя было бы учиться. В книге рассмотрены главным образом проблемы, связанные с полями излучения космических объектов и с образованием их спектров в разных диапазонах. Другие теоретические проблемы освещены менее подробно. Такой характер курса теоретической астрофизики следует считать вполне естественным, так как изучение спектров космических объектов составляет основу этой науки.

Рукопись настоящей книги была прочитана сотрудниками кафедры астрофизики Ленинградского университета В. В. Ивановым и И. Н. Мининым, сделавшими много ценных замечаний. Ряд важных предложений, направленных к улучшению книги, сделал С. А. Каплан. Автор выражает им за это искреннюю благодарность.

В. В. Соболев

Фотосферой звезды называется слои, от которого до наблюдателя излучение в непрерывном спектре. Выше фотосферы расположена атмосфера звезды, дающая линейчатый спектр. Разумеется, между фотосферой и атмосферой нет резкой границы, но все же спектральные линии возникают в среднем в более высоких слоях, чем непрерывный спектр. Под фотосферой находятся недоступные для наблюдений звездные недра. Мы увидим дальше, что для подавляющего большинства звезд фотосфера является сравнительно тонкой, т. е. толщина фотосферы гораздо меньше радиуса звезды.

Свечение фотосферы и определяет собой блеск звезды (отсюда и произошло название «фотосфера» — сфера света). Однако в самой фотосфере энергия не вырабатывается. Источники энергии находятся в более глубоких слоях звезды, а через фотосферу энергия лишь переносится наружу.

Уже в первых исследованиях по теории фотосфер было установлено, что перенос энергии в фотосфере осуществляется в основном лучеиспусканием. Перенос энергии теплопроводностью не играет существенной роли вследствие малости коэффициента теплопроводности газов. Перенос энергии конвекцией может иметь значение лишь для отдельных мест в фотосфере.

Изучение переноса лучистой энергии через фотосферу — основная задача теории фотосфер. Решение этой задачи связано с выяснением строения фотосферы, т. е. с нахождением зависимости плотности, температуры и других физических величин от глубины.

Одним из наиболее важных результатов теории фотосфер должно быть получение распределения энергии в непрерывном спектре звезды. Путем сравнения теоретического и наблюдаемого распределения энергии в звездном спектре можно сделать проверку правильности предположений, положенных в основу теории.

Последовательное развитие теории звездных фотосфер и атмосфер отражено в книгах Э. Милна [1], С. Росселанда [2], В. А. Амбарцумяна [3].

§ 1. Лучистое равновесие звездной фотосферы

1. Поле излучения. Поскольку наша ближайшая задача состоит в анализе поля излучения в фотосфере, то прежде всего мы должны ввести величины, характеризующие поле излучения.

Основной из таких величин является интенсивность излучения. Эта величина определяется так. Возьмем в данном месте пространства элементарную площадку, перпендикулярную к направлению излучения. Если величина площадки есть $d\sigma$, а излучение падает в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ в телесном угле $d\omega$ за время dt , то количество лучистой энергии dE_ν , падающее на площадку, будет пропорционально $d\sigma d\nu d\omega dt$, т. е. будет равно

$$dE_\nu = I_\nu d\sigma d\nu d\omega dt. \quad (1.1)$$

Коэффициент пропорциональности, входящий в эту формулу, и называется интенсивностью излучения. Можно сказать, что интенсивность излучения есть количество лучистой энергии, падающее в единичном интервале частот за единицу времени в единичном телесном угле на единичную площадку, расположенную перпендикулярно к направлению излучения. Вообще говоря, интенсивность излучения зависит от координат данной точки, от направления излучения и от частоты ν . Если интенсивность излучения задана, то легко могут быть определены и другие величины, характеризующие поле излучения. Одной из них является плотность излучения ρ_ν , представляющая собой количество лучистой энергии в единичном интервале частот, находящееся в единице объема.

Чтобы выразить ρ_ν через I_ν , поступим следующим образом. Допустим сначала, что излучение интенсивности I_ν падает на площадку $d\sigma$ перпендикулярно к ней в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ за время dt внутри малого телесного угла $\Delta\omega$. Тогда количество лучистой энергии, падающее на площадку, будет равно $I_\nu d\sigma d\nu dt \Delta\omega$. Очевидно, что эта энергия займет объем $d\sigma c dt$, где c — скорость света. Поэтому количество лучистой энергии, приходящееся на единицу объема, будет равно $I_\nu d\nu \Delta\omega / c$. С другой стороны, та же величина по определению равна $\rho_\nu d\nu$. Следовательно, в рассматриваемом случае

$$\rho_\nu = I_\nu \frac{\Delta\omega}{c}. \quad (1.2)$$

В общем же случае, когда на данный объем падает излучение со всех сторон, плотность излучения ρ_ν выразится формулой

$$\rho_\nu = \frac{1}{c} \int I_\nu d\omega, \quad (1.3)$$

где интегрирование производится по всем телесным углам.

Через интенсивность излучения легко также выразить поток излучения H_ν , представляющий собой количество лучистой энергии, протекающей во всех направлениях через единичную площадку в единичном интервале частот за единицу времени. Чтобы сделать это, рассмотрим сначала излучение, проходящее через площадку $d\sigma$ в направлении, составляющем угол ϑ с ее внешней нормалью.

(рис. 1). В данном случае площадь элементарной площадки, перпендикулярной к направлению излучения, равна $d\sigma \cos \vartheta$. Поэтому количество лучистой энергии, протекающее через площадку $d\sigma$ под углом ϑ к нормали внутри телесного угла $d\omega$ за время dt в интервале частот от ν до $\nu+dv$, будет равно $I_\nu d\sigma \cos \vartheta dv dt d\omega$. Если мы проинтегрируем это выражение по всем направлениям, то получим величину, которая, по определению, равна $H_\nu d\sigma dt dv$. Следовательно,

$$H_\nu = \int I_\nu \cos \vartheta d\omega. \quad (1.4)$$

В сферической системе координат с полярной осью, направленной по внешней нормали к площадке $d\sigma$, элемент телесного угла равен $d\omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$, где φ — азимут направления излучения. Поэтому выражение для потока излучения может быть переписано в виде

$$H_\nu = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_\nu \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta. \quad (1.5)$$

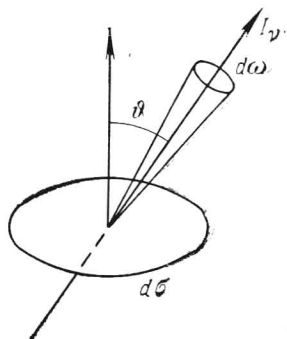


Рис. 1.

Так как $\cos \vartheta < 0$ при $\vartheta > \pi/2$, то из формулы (1.5) следует, что поток излучения H_ν является разностью двух положительных величин:

$$H_\nu = \mathcal{E}_\nu - \mathcal{E}'_\nu, \quad (1.6)$$

где

$$\mathcal{E}_\nu = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I_\nu \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta \quad (1.7)$$

и

$$\mathcal{E}'_\nu = - \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\pi/2}^\pi I_\nu \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta. \quad (1.8)$$

Величина $\mathcal{E}_\nu$ представляет собой освещенность площадки с одной стороны, а величина $\mathcal{E}'_\nu$ — освещенность площадки с другой стороны. Таким образом, поток излучения через какую-либо площадку есть разность освещенностей этой площадки.

Отметим важное свойство интенсивности излучения: в пустом пространстве (т. е. при отсутствии в нем поглощения и испускания лучистой энергии) интенсивность излучения не меняется вдоль луча.

Для доказательства этого свойства возьмем на луче две элементарные площадки, расположенные перпендикулярно к лучу на расстоянии s друг от друга. Пусть $d\sigma$ и $d\sigma'$ — площади этих площадок.

а $d\omega$ и $d\omega'$ — телесные углы, под которыми с одной площадки видна другая. Рассматривая лучистую энергию, проходящую через обе площадки, мы можем написать: $I_\nu d\sigma d\omega = I'_\nu d\sigma' d\omega'$, где I_ν и I'_ν — интенсивность излучения, падающего на одну и другую площадку соответственно. Но $d\omega = s^2 d\sigma'$ и $d\omega' = s^2 d\sigma$. Поэтому, как и утверждалось, имеем $I_\nu = I'_\nu$.

Из сказанного, в частности, следует, что интенсивность солнечного излучения на расстоянии от Солнца до Земли такая же, как и при выходе его из Солнца. Очевидно, однако, что плотность и поток излучения убывают по мере удаления от Солнца.

2. Уравнение переноса излучения. Выше уже было сказано, что в пустом пространстве интенсивность излучения не меняется вдоль луча. Теперь мы допустим, что пространство заполнено средой, способной поглощать и испускать лучистую энергию. В таком случае интенсивность излучения будет меняться вдоль луча, и мы сейчас выведем уравнение, описывающее это изменение. Однако предварительно введем в рассмотрение величины, характеризующие поглощательную и испускательную способность среды.

Пусть на площадку $d\sigma$, расположенную перпендикулярно к направлению излучения, падает излучение интенсивности I_ν внутри телесного угла $d\omega$ в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ в течение времени dt . Количество энергии, падающее на площадку, будет равно $I_\nu d\sigma d\omega d\nu dt$. Если среда способна поглощать излучение, то на пути ds из указанного количества энергии будет поглощена некоторая доля, пропорциональная ds . Мы обозначим эту долю через $\alpha_\nu ds$. Таким образом, количество поглощенной энергии на пути ds будет равно

$$\alpha_\nu ds I_\nu d\sigma d\omega d\nu dt. \quad (1.9)$$

Величина α_ν называется коэффициентом поглощения. Так как доля поглощенной энергии $\alpha_\nu ds$ есть величина безразмерная, то коэффициент поглощения α_ν имеет размерность, обратную длине. Заметим, что коэффициент поглощения зависит от частоты излучения и координат данной точки, но не зависит от направления излучения (в изотропной среде).

Если среда способна также излучать энергию, то количество энергии, излученное объемом dV внутри телесного угла $d\omega$ в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ в течение времени dt , будет пропорционально $dV d\omega d\nu dt$. Мы обозначим это количество энергии через

$$\epsilon_\nu dV d\omega d\nu dt \quad (1.10)$$

и назовем величину ϵ_ν коэффициентом излучения. Следовательно, коэффициент излучения есть количество энергии, излучаемое единичным объемом в единичном телесном угле в единичном интервале частот за единицу времени. Коэффициент излучения зависит от частоты ν , от координат данной точки и, вообще говоря, от направления излучения.

Считая величины α_v и ϵ_v заданными, найдем, как меняется интенсивность излучения вдоль луча. При этом будем предполагать, что поле излучения стационарно, т. е. не меняется с течением времени.

Возьмем элементарный цилиндр, ось которого направлена по данному лучу. Пусть площадь основания цилиндра равна $d\sigma$, а высота равна ds (причем высота мала по сравнению с линейными размерами основания). Рассмотрим излучение, входящее в цилиндр и выходящее из него внутри телесного угла $d\omega$ в интервале частот от ν до $\nu+dv$ за время dt . Если интенсивность излучения, входящего в цилиндр, есть I_ν , то количество входящей в цилиндр энергии будет равно

$$I_\nu d\sigma d\omega dv dt.$$

Обозначим интенсивность выходящего из цилиндра излучения через $I_\nu + dI_\nu$. Тогда количество выходящей из цилиндра энергии будет равно

$$(I_\nu + dI_\nu) d\sigma d\omega dv dt.$$

Разница между указанными количествами энергии возникает как за счет поглощения энергии в цилиндре, так и за счет испускания энергии цилиндром. Количество энергии, поглощаемой в цилиндре, определяется выражением (1.9). Что же касается энергии, испускаемой цилиндром, то она будет дана выражением (1.10), если мы положим в нем $dV = d\sigma ds$. Таким образом, получаем

$$\begin{aligned} (I_\nu + dI_\nu) d\sigma d\omega dv dt = \\ = I_\nu d\sigma d\omega dv dt - \alpha_\nu ds I_\nu d\sigma d\omega dv dt + \epsilon_\nu d\sigma ds d\omega dv dt, \end{aligned}$$

или, после необходимых сокращений,

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + \epsilon_\nu. \quad (1.11)$$

Это и есть искомое уравнение, определяющее изменение интенсивности излучения при прохождении его через поглощающую и излучающую среду. Оно называется уравнением переноса излучения.

В частном случае, когда в среде происходит поглощение лучистой энергии, но нет испускания (т. е. $\alpha_\nu \neq 0$, а $\epsilon_\nu = 0$), вместо уравнения (1.11) имеем

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu. \quad (1.12)$$

Интегрирование этого уравнения дает

$$I_\nu(s) = I_\nu(0) e^{-\int_0^s \alpha_\nu(s') ds'}, \quad (1.13)$$

где $I_v(0)$ — интенсивность излучения при $s=0$ (например, интенсивность излучения, входящего в среду).

Безразмерная величина

$$\int_0^s \alpha_v(s') ds'$$

называется оптическим расстоянием между двумя точками. При прохождении излучением единичного оптического расстояния интенсивность излучения уменьшается в e раз.

В общем случае (т. е. при $\alpha_v \neq 0$ и $\epsilon_v \neq 0$), решая уравнение (1.11) относительно I_v , получаем

$$I_v(s) = I_v(0) e^{-\int_0^s \alpha_v(s') ds'} + \int_0^s \epsilon_v(s') e^{-\int_{s'}^s \alpha_v(s'') ds''} ds'. \quad (1.14)$$

Соотношение (1.14) может быть названо уравнением переноса излучения в интегральной форме.

Мы видим, что в общем случае интенсивность излучения состоит из двух частей. Первая часть представляет собой интенсивность первоначального излучения (в точке $s=0$), ослабленного вследствие поглощения на пути от 0 до s . Вторая часть есть интенсивность излучения, обусловленного испусканием лучистой энергии на пути от 0 до s и соответствующим ослаблением его вследствие поглощения на пути от места испускания s' до рассматриваемого места s .

3. Уравнение лучистого равновесия. Полученное выше уравнение переноса излучения (1.11) позволяет находить интенсивность излучения I_v , если известны коэффициент излучения ϵ_v и коэффициент поглощения α_v . Однако обычно в задачах о переносе излучения коэффициент излучения ϵ_v не является заданным, а зависит от количества лучистой энергии, поглощенной в элементарном объеме, т. е. от величин α_v и I_v . Чтобы найти эту зависимость, надо рассмотреть энергетические процессы, происходящие в элементарном объеме данной среды.

Указанные процессы специфичны для каждой задачи. Мы сейчас рассмотрим энергетические процессы, происходящие в элементарном объеме звездной фотосферы.

Как уже было сказано во введении к этой главе, в фотосфере нет источников энергии и вырабатываемая внутри звезды энергия переносится через фотосферу лучеиспусканием. Поэтому излучение каждого элементарного объема фотосферы происходит за счет поглощаемой им лучистой энергии. Предполагая стационарность фотосферы, мы можем сказать, что каждый элементарный объем фотосферы излучает столько энергии, сколько он поглощает. Такое состояние фотосферы называется состоянием лучистого равновесия.

Разумеется, в состоянии лучистого равновесия находятся лишь фотосферы тех звезд, которые не претерпевают быстрых изменений с течением времени. Как известно, они составляют огромное большинство звезд. Именно об этих звездах и будет идти речь в настоящей главе. Звезды с быстро меняющимися блеском и спектром (например, новые звезды) будут рассмотрены позднее (см. гл. VI).

Дадим математическую формулировку условия лучистого равновесия. Для этого найдем количество лучистой энергии, поглощаемое элементарным объемом, и количество энергии, излучаемое этим объемом.

Возьмем элементарный объем с площадью основания $d\sigma$ и высотой dr . Пусть на этот объем падает излучение интенсивности I_ν внутри телесного угла $d\omega$ в направлении, образующем угол ϑ с нормалью к основанию. Количество энергии, падающее на объем в интервале частот от ν до $\nu+dv$ за время dt , будет равно $I_\nu d\sigma \cos \vartheta d\omega dv dt$. Так как путь, проходимый излучением в объеме, равен $dr \sec \vartheta$, то из общего количества падающей на объем энергии будет поглощаться в нем доля $\alpha_\nu dr \sec \vartheta$. Следовательно, количество поглощенной энергии будет равно

$$d\sigma dr dt \alpha_\nu I_\nu dv d\omega.$$

Чтобы получить полное количество поглощенной объемом энергии, надо проинтегрировать это выражение по всем частотам и по всем направлениям. В результате находим, что полное количество поглощенной объемом энергии дается выражением

$$d\sigma dr dt \int_0^\infty \alpha_\nu dv \int I_\nu d\omega. \quad (1.15)$$

На основании (1.10) количество энергии, излучаемое объемом $d\sigma dr$ внутри телесного угла $d\omega$ в интервале частот от ν до $\nu+dv$ за время dt , будет равно

$$\varepsilon_\nu d\sigma dr d\omega dv dt.$$

Так как энергия в непрерывном спектре излучается элементарным объемом с одинаковой вероятностью во все стороны, то для полного количества энергии, излучаемого этим объемом, получаем выражение

$$4\pi d\sigma dr dt \int_0^\infty \varepsilon_\nu dv. \quad (1.16)$$

Приравняв друг к другу выражения (1.15) и (1.16), находим

$$4\pi \int_0^\infty \varepsilon_\nu dv = \int_0^\infty \alpha_\nu dv \int I_\nu d\omega. \quad (1.17)$$

Уравнение (1.17) называется уравнением лучистого равновесия.

Уравнение переноса излучения (1.11) и уравнение лучистого равновесия (1.17) принадлежат к числу основных уравнений теории звездных фотосфер.

4. Геометрическая модель фотосферы. Уравнение (1.11) представляет собой самую общую форму уравнения переноса излучения. В конкретных случаях вид уравнения переноса излучения определяется принятой системой координат, а также тем, от каких аргументов зависит интенсивность излучения.

Мы можем считать, что звезда обладает сферической симметрией. В этом случае интенсивность излучения I_v зависит от двух аргументов: от расстояния r от центра звезды и от угла ϑ между направлением излучения и направлением радиуса-вектора. В данном случае мы имеем:

$$\frac{dI_v}{ds} = \frac{\partial I_v}{\partial r} \frac{dr}{ds} + \frac{\partial I_v}{\partial \vartheta} \frac{d\vartheta}{ds} \quad (1.18)$$

и

$$\frac{dr}{ds} = \cos \vartheta, \quad \frac{d\vartheta}{ds} = -\frac{\sin \vartheta}{r}. \quad (1.19)$$

Поэтому уравнение переноса излучения в случае сферически-симметричной фотосферы принимает вид

$$\cos \vartheta \frac{\partial I_v}{\partial r} - \frac{\sin \vartheta}{r} \frac{\partial I_v}{\partial \vartheta} = -\alpha_v I_v + \varepsilon_v. \quad (1.20)$$

В рассматриваемом случае уравнение лучистого равновесия (1.17) может быть заменено другим, более простым уравнением, имеющим тот же физический смысл. Проинтегрировав уравнение (1.20) по всем частотам и по всем направлениям, получаем

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \int_0^\infty H_v dv \right) = - \int_0^\infty \alpha_v dv \int I_v d\omega + 4\pi \int_0^\infty \varepsilon_v dv. \quad (1.21)$$

Из (1.21) видно, что если выполняется уравнение (1.17), то должно выполняться и уравнение

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \int_0^\infty H_v dv \right) = 0. \quad (1.22)$$

Из (1.22) следует

$$\int_0^\infty H_v dv = \frac{C}{r^2}, \quad (1.23)$$

где C — некоторая постоянная, определяемая источниками энергии звезды.