

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКБИБЛИОГРАФИЯ

Д. А. Франк-Каменецкий. Физические процессы внутри звезд. М., Физматгиз, 1959, 543 стр., ц. 15 р. 70 к.

За последние десять лет теория внутреннего строения звезд, бывшая до того почти классической областью, начала быстро развиваться и стала одним из наиболее важных разделов астрофизики. Быстрое развитие ее стало возможным благодаря прогрессу ядерной физики, как экспериментальному, так и теоретическому, что позволило уточнить вероятности реакций, служащих источником энергии. Другим важным фактором явилось применение электронных вычислительных машин, которые позволили рассчитывать модели десятками, выбирая лучшую, тогда как раньше расчет одной модели требовал нескольких лет работы и мог служить кандидатской диссертацией. Большое количество моделей позволило получить качественно новый результат — перейти к эволюции, т. е. к последовательности моделей с постепенно меняющимся вследствие ядерных реакций химическим составом ядра. В свете этих результатов сразу выявился физический и эволюционный смысл диаграммы Рессела — Герцшпрунга, изображающей зависимость между светимостью и эффективной температурой или же спектральным классом звезды. Обнаруженное в последние годы резкое различие химического состава атмосфер звезд плоских и сферических подсистем позволило понять — пока еще качественно — различие диаграмм для этих подсистем. Все это позволило вплотную подойти к проблеме эволюции Галактики и галактик, к пониманию физического смысла различия между галактиками разных типов.

Проблема строения и эволюции звезд не пользовалась у нас, особенно в последние годы, достаточным вниманием — в этой области работали считанные единицы. В связи с этим у нас не было руководств, достаточно современных и серьезных, чтобы служить не только учебником, но и пособием для работы. Рецензируемая книга заполняет, хотя и не целиком, этот пробел. Как показывает само название, основное внимание в ней уделяется не столько строению звезд, сколько процессам в них, т. е. физическим основам теории. Тем не менее само строение и эволюция звезд и связь эволюции с проблемой образования элементов изложены достаточно полно и могут служить хорошим введением для физиков и астрономов, не работавших ранее в этой области. Некоторым дополнением к рецензируемой монографии будет служить подготавливаемый сейчас Издательством иностранной литературы перевод книги М. Шварцшильда «Строение и эволюция звезд».

Рецензируемая книга начинается с краткого обзора наблюдаемых фактов и основных понятий, с которыми читатель встретится в дальнейшем изложении. Далее следует элементарная теория внутреннего строения звезд, по существу, краткий обзор основных идей этой теории, которые более глубоко развиваются в других главах. Автор подчеркивает, что структура стационарной звезды, выводимая как решение уравнений механического и теплового равновесия, определяется физическими процессами теплопередачи и тепловыделения. Первый сводится к диффузии излучения, т. е. к поглощению и излучению квантов, а также к конвективному переносу в определенных слоях звезды. Второй определяется главным образом реакциями ядерного синтеза, хотя на определенных стадиях развития может быть существенным выделение гравитационной энергии. Процессы теплопередачи определяют в основном наблюдаемое для гомогенных звезд главной последовательности соотношение масса — светимость, а процессы тепловыделения определяют соотношение масса — радиус. Звезды гетерогенного строения с плотным ядром большого молекулярного веса, где водород уже выгорел, являются красными гигантами.

В третьей главе излагается ставшая уже классической теория расчета гомогенных звездных моделей. Физические законы выражаются в безразмерных переменных, вводятся структурные множители и критерии подобия. Подчеркивается, что подобие является приближенным не только в неоднородных, но и в однородных по составу звездах. В связи с этим вводится понятие приближенного подобия.

Вторая стадия эволюции звезд, когда водород в ядре выгорел, называется гетерогенной. Модели таких звезд начали рассчитываться сравнительно недавно, и теории

их не является устоявшейся. Обычно эти модели (им посвящена четвертая глава книги) конструируются из решений для зон с однородным составом и механизмом теплопередачи, а затем решения сшиваются, с учетом условий на скачке. В ядре используются уравнения состояния вырожденного газа. Особые неприятности доставляет внешняя конвективная зона, которая у красных гигантов весьма протяженна. При расчете структуры зоны приходится вводить неизвестный параметр — отношение пути перемешивания к высоте однородной атмосферы, что вносит значительную неопределенность. В то же время конвективная зона определяет граничные условия для более внутренних частей, так что неопределенность распространяется на всю модель. Эта неопределенность остается и при расчете обычных звезд, например Солнца, но влияние ее здесь меньше.

Часть II, занимающая около половины объема книги, посвящена теории стационарных процессов теплоотвода и энерговыделения в звездах — процессах лучистой теплопроводности и термоядерных реакций. Содержание этой части — чисто физическое, основанное на применении современной атомной и ядерной физики к рассматриваемым процессам. В главе пятой излагается макроскопическая теория лучистой теплопроводности, устанавливается феноменологическая связь между лучистым переносом энергии и эффективными сечениями элементарных процессов, без конкретизации механизма последних. Рассматриваются основные вопросы теории лучистого переноса энергии: уравнение переноса с учетом индуцированного испускания, локальное термодинамическое равновесие, диффузионное приближение, коэффициент лучистой теплопроводности и др. Подробно обсуждается усреднение пробега излучения по Росселанду.

Шестая глава посвящена микроскопической теории процессов теплоотвода. Здесь на основе квантовомеханической теории взаимодействия излучения с веществом вычисляются в явном виде сечения элементарных процессов, фигурировавшие в пятой главе в качестве феноменологически заданных величин. Автор ограничивается, применительно к типичным астрофизическим условиям, нерелятивистским приближением теории, что дает существенный выигрыш в доступности изложения. Излагая основы теории, а в дальнейшем и применяя ее, автор уделяет значительное внимание различным способам нормировки волновых функций сплошного спектра и соответствующим размерностям матричных элементов; обычно эти важные вопросы затрагиваются в литературе слишком бегло. Далее следуют расчеты вероятностей конкретных процессов: дискретных переходов, фотопроцессов и тормозных процессов. Особенно детально рассматриваются последние процессы (тормозное излучение и поглощение, связанные принципом детального равновесия). Полностью проводится их расчет в борновском приближении и довольно подробно излагаются результаты точной теории Зоммерфельда, использующей кулоновские волновые функции. Обсуждаются также «улучшенные борновские» приближения Зоммерфельда и Борна — Эльверта, а также классическое приближение Крамерса. Проводится усреднение тормозного сечения (в приближениях Борна и Крамерса) по максвелловскому распределению электронных скоростей. Приводятся точные формулы для вероятностей фотопроцессов. Приведенная в конце главы оценка электронной теплопроводности показывает, что для невырожденных состояний ее вкладом в теплоотвод можно пренебречь.

В седьмой главе рассматриваются термоядерные реакции — источники энергии звезд. Вначале обсуждаются различные циклы ядерных реакций. Для нормальных гомогенных звезд основными источниками энергии являются водородный и углеродный циклы. Для звезд-гигантов с плотными выгоревшими ядрами существенную роль играют гелиевый и неоновый циклы (последний — в возможном механизме образования химических элементов). Далее излагаются основы теории ядерных реакций: прохождение сквозь кулоновский потенциальный барьер, дисперсионная формула Брейта — Вигнера, радиационные и частичные ширины, правила отбора по спину и четности, резонансные реакции. Рассчитывается интенсивность термоядерных реакций в максвелловском газе (в том числе и с учетом резонансных реакций). Приводятся численные данные для основных циклов и сводная таблица скоростей различных термоядерных реакций. Следует отметить, что автор всюду приводит по возможности новейшие данные; это относится как к численным значениям, так и к затрагиваемым в тексте расчетным методам (оптическая модель полупрозрачного ядра, прямое взаимодействие и др.).

Заключительная глава части II посвящена отдельному рассмотрению одной из ядерных реакций — протонной реакции, играющей основную роль в водородном цикле, и в связи с ней — изложению теории бета-процессов. Здесь довольно подробно и вместе с тем просто излагается теория бета-распада (в нерелятивистской трактовке): статистическая функция Ферми, константа бета-процесса, правила отбора для разрешенных бета-переходов и т. д. Подробно рассчитывается скорость протонной реакции и анализируется вопрос о точности и надежности численных результатов в свете последних теоретических и экспериментальных данных о бета-взаимодействиях.

Часть III посвящена приложению описанной выше теории физических процессов к расчетам строения стационарных звезд. За основу принимается структура чисто водородных звезд разной массы. Показано, что у реальных водородных звезд должны

быть конвективные ядра. Рассчитаны кривые масса — светимость и масса — радиус. Реальные звезды отклоняются от этих кривых из-за примеси гелия, влияющего на молекулярный вес, тяжелых элементов, влияющих на непрозрачность газа, и из-за наличия в более массивных звездах углеродно-азотного цикла. Учет этих факторов удовлетворительно объясняет положение на диаграмме звезд главной последовательности, кроме горячих звезд, для которых нужно предположить гетерогенную структуру. Кроме того, остается неясным, почему субкарлики, которые содержат меньше примесей, отходят от «водородной» кривой дальше, чем обычные карлики. Автор указывает, что одной из возможных причин может быть неточная редукция наблюдений к болометрической светимости и эффективной температуре. Однако конкретных оснований для такого предположения нет, и здесь, по-видимому, необходим более глубокий пересмотр теоретических основ расчета. В заключительной главе части III теория применяется к наиболее изученной звезде — Солнцу.

В части IV рассматриваются нестационарные процессы в звездах. Математически это сводится к тому, что в уравнении механического и теплового равновесия добавляются производные по времени. Сначала ставится упрощенная задача о подобных адиабатических изменениях состояния звезды, при которых структура звезды сохраняется, а меняются значения величин только в какой-либо характерной точке, например в центре. При этом дифференциальные уравнения в частных производных сводятся к обыкновенным. Рассматриваются малые колебания, определяются собственная частота, условия устойчивости и вводятся тепловая и гравитационная энергии. Подчеркивается, что звезда представляет собой систему с отрицательной теплоемкостью. Далее рассматривается более общая задача звездных пульсаций, исходя из условий колебательной неустойчивости, выведенных на основе термодинамических соотношений. Обращение в нуль, или знак приращения колебательной энергии, определяет, будут ли возбуждаться колебания, стремится ли их амплитуда к предельному значению, является ли система неустойчивой по отношению к возмущениям конечной амплитуды. При этом учитывается кинетика ядерных реакций в нестационарных условиях. Результаты качественно применяются к пульсациям цефеид. Следующая глава — преимущественно описательная — посвящена обзору современных представлений о звездной эволюции. Упоминаются основные факторы и метод расчета эволюции, роль перемешивания, данные наблюдений для плоских и сферических подсистем и их эволюционное истолкование. Интересна гипотеза автора, что переменные звезды типа RR Лиры появляются в результате перестройки структуры звезды при переходе на новый цикл. Такая перестройка является возмущением конечной амплитуды, по отношению к которому звезда неустойчива.

Небольшая последняя глава посвящена теориям образования химических элементов в звездах; изложение здесь носит качественный характер. Вначале автор сжато характеризует теории дозвездного образования элементов, их успехи и трудности. В частности, для теории нейтронного захвата Альфера — Бете — Гамова камнем преткновения оказывается невозможность объяснения наблюдаемого факта отсутствия стабильных ядер с массовыми числами $A=5$ и $A=8$. Тем не менее процессы нейтронного захвата с последующим бета-распадом остаются правдоподобным механизмом образования ядер с $A>8$. Далее рассматриваются теории образования элементов, связанные с теорией внутреннего строения и эволюции звезд. Сюда относится теория образования элементов в выгоревших ядрах звезд-гигантов, в которой существенную роль играет гелиевый цикл. Кратко обсуждается вопрос о возможных источниках нейтронов в звездах; такими источниками могут быть экзотермические реакции (α, n) на ядрах Be^9 , C^{13} , O^{17} , Ne^{21} , образующихся в результате контакта продуктов гелиевого цикла с водородом. Однако и теории образования элементов только внутри звезд наталкиваются на серьезные трудности (невозможность объяснения наблюдаемого состава звездных атмосфер). Поэтому нельзя считать исключенной определенную роль «дозвездных» механизмов в образовании элементов. В заключение обсуждается один из механизмов образования элементов в процессе холодного ускорения, предложенный автором и состоящий из двух стадий: первичной газодинамической инжекции и последующего электромагнитного ускорения.

Интересно приложение I, в котором подробно рассматривается введенная автором единая система солнечных единиц для измерения физических величин.

Из изложенного ясно, что рецензируемая книга охватывает весьма широкий круг важных и актуальных вопросов современной физики и астрофизики. В разработку ряда этих вопросов существенный вклад внесли работы автора книги. Это относится, в частности, к водородным моделям звезд, приложениям теории бета-процессов в астрофизике, теории звездных пульсаций, теории происхождения элементов и др.

Большими достоинствами книги являются ясность и подробность изложения, а также достигнутая автором значительная степень единства в рассмотрении физической теории и ее астрофизических приложений.

При общем высоком уровне изложения оно не свободно от некоторых неточностей; к счастью, они почти нигде не затрагивают результатов. Приведем примеры. На стр. 175 о предельных переходах $t \rightarrow \infty$ и $\Delta E \rightarrow 0$ говорится, как о двух независи-

мых условиях преобразования (2.1) в (2.2); в действительности же второй переход является следствием первого (в чем и состоит точный смысл закона сохранения энергии в квантовой механике). На стр. 209 формулируется неправильное исходное условие применимости борновского приближения ($U \ll T$), и лишь благодаря второй неправильности ($U_{\text{эф}} \sim Ze^2/\lambda$) получается нужный конечный результат ($\frac{Ze^2}{\lambda v} \ll 1$). Вопреки утверждению на стр. 162—163, соотношение $P_v = \frac{1}{3} e_v$ означает, вообще говоря, не равновесность излучения, а лишь его изотропность. На стр. 252—255 об области применимости приближения Крамерса следовало бы говорить не просто как о жестком «конце» (или «хвосте»), а как о п р е о б л а д а ю щ е й ч а с т и квазиклассического тормозного спектра. Нельзя согласиться с автором, что соотношение (6.10) на стр. 141 является термодинамическим, или макроскопическим; на самом деле оно является лишь несколько видоизмененной записью микроскопического принципа детального равновесия. Неясно, какой смысл вкладывается в понятие «плотность вероятности нахождения осциллятора излучения в единице объема» (стр. 178). Некоторые из неточностей являются, возможно, опечатками, не исправленными при редактировании. Так, на стр. 243 говорится, что по точной формуле для рекомбинационного излучения величина (σv) при $v \rightarrow 0$ стремится к конечному пределу; в действительности она стремится к бесконечности. На стр. 219 упущено из виду, что не всякий несходящийся интеграл является расходящимся. За экспоненциальное время t_e (стр. 349) не распадается, а остается доля $1/e$ от начального числа систем.

Из приведенных примеров видно, что допущенные погрешности носят частный и, так сказать, «локальный» характер и потому могут быть легко устранены при переиздании. Они, конечно, практически не умаляют отмеченных ранее достоинств рецензируемой книги.

В целом книга является ценной монографией, которая будет способствовать распространению идей, касающихся внутреннего строения звезд. Концентрическая композиция книги позволяет использовать ее как для первоначального знакомства с предметом (что делает ее учебным пособием для студентов), так и в качестве руководства для углубленного изучения при работе в данной области. К сожалению, автор ограничил свою задачу только физическими процессами, слишком бегло касаясь гидродинамики, в частности конвекции, циркуляции, сжатия и взрывов звезд. Тем не менее книга и в настоящем своем виде содержит очень много полезного материала и будет служить хорошим рабочим пособием для многих астрофизиков и физиков. Читатели будут благодарны Физматгизу за выпуск этой полезной книги, кстати сказать, очень хорошо оформленной.

С. Б. Пикельнер, В. И. Коган