

Глава 7

Модели атмосфер

7.1. Классическая задача о построении модели атмосферы: предположения и ограничения

Проблема построения моделей атмосфер состоит в создании математических моделей, которые описывают физическое строение звездной атмосферы и спектр испускаемого звездой излучения. Поставленная в самом общем виде, эта проблема необычайно сложна, и те физические и математические трудности, к которым она приводит, в настоящее время преодолеть невозможно. Поэтому приходится вводить ряд упрощений и рассматривать идеализированные модели, являющиеся довольно далекими абстракциями. Такие модели полезны в том отношении, что они позволяют лучше понять существо дела, отвлекаясь от деталей. Целесообразно с самого начала перечислить некоторые из налагаемых нами ограничений не только потому, что это будет способствовать постановке задачи, но и затем, чтобы это служило напоминанием о почти безграничном числе захватывающих научных проблем, остающихся еще неисследованными. Допущения, которые будут нами использоваться, можно отнести к нескольким широким категориям.

а) *Геометрия*. Предполагается, что атмосфера состоит либо из *однородных плоскопараллельных слоев* (если ее толщина мала по сравнению с радиусом звезды), либо из *однородных сферических оболочек* (если ее толщина составляет заметную долю радиуса; см. § 7.6). Предположение об однородности делает задачу одномерной и тем самым сильно упрощает анализ, но вместе с тем исключает из рассмотрения много интересных явлений, связанных с мелкомасштабными структурами, наблюдающимися в солнечной атмосфере. Для звезд информации о степени однородности их атмосфер почти нет (см., впрочем, [261], гл. 11), и можно лишь надеяться, что одномерные модели дают некоторую «усредненную» (в неопределенном смысле) информацию. Однако, поскольку процесс «усреднения» *нелинеен*, вопрос на самом деле остается открытым, и вовсе не ясно, всегда ли такие модели действительно дают имеющий смысл средние характеристики (например, для хромосфер), хотя в некоторых случаях они *могут быть* и удовлетворительными. В частности, в атмосфере Солнца многие из неоднородностей порождаются гидродинамическими явлениями, в конечном счете обуслов-

ленными конвективной зоной. У звезд без сильных конвективных зон атмосферы и в самом деле могут быть однородными. (Контр-пример: Ар-звезды, показывающие большие вариации физических свойств от одного участка поверхности к другому, предположительно связанные с наличием сильных магнитных полей).

б) *Стационарность*. Будем предполагать, что атмосфера находится в *стационарном состоянии*. Тем самым мы оставляем в стороне обсуждение всех явлений, зависящих от времени, например звездных пульсаций, ударных волн, изменений, происходящих со временем в расширяющихся оболочках (новые, сверхновые), явлений, связанных с нагревом атмосферы спутником в двойных системах, переменных магнитных полей и т.п. В этой главе рассматриваются только *неподвижные* атмосферы. В гл. 14 и 15 теория распространяется на случай стационарного истечения (расширяющиеся атмосферы). Будем предполагать, что уравнение переноса не содержит зависимости от времени, а населенности уровней постоянны во времени и определяются уравнениями статистического равновесия (частный случай — ЛТР), выражающими равенство числа атомов, покидающих некоторый уровень за счет всех микропроцессов, и числа атомов, которые приходят на этот уровень.

в) *Баланс импульса*. В рамках определенного выше стационарного состояния мы будем рассматривать либо *гидростатическое равновесие*, при котором давление неподвижного газа в точности уравновешивает силу тяготения, либо одномерные ламинарные *установившиеся течения*. При этом не учитывается (возможно, значительное) влияние магнитных сил, как крупномасштабных (таких, как у Ар-звезд), так и мелкомасштабных (например, в солнечных пятнах или в узлах концентрации общего магнитного поля Солнца). Кроме того, мы пренебрегаем влиянием движений малых масштабов, таких, как волны, и более крупных масштабов типа течений в супергранулах, конвективных ячейках и т.д., а также еще более крупномасштабными приливными возмущениями в тесных двойных.

г) *Энергетический баланс*. Обычно мы будем предполагать, что атмосфера находится в *лучистом равновесии*. Это предположение требует и *неподвижности* атмосферы. В § 7.3 будет рассмотрено влияние конвекции, однако лишь в самых общих чертах. В гл. 15 будет дано обобщение теории на случай установившихся течений и произведен учет работы, совершаемой одномерным гидродинамическим потоком. Для атмосферы Солнца существование сложных движений надежно установлено наблюдениями (см., например, [694], гл. 9 и 10, или [244], гл. 5). Хотя для звезд данные гораздо

беднее, почти не приходится сомневаться в том, что в атмосферах многих звезд (например, сверхгигантов) сложные макроскопические движения играют важную роль. Однако в своем нынешнем виде теория не способна вполне последовательно описывать детали обмена энергией между полем излучения и гидродинамическими движениями. Турбулентная диссипация при конвекции; возбуждение, распространение и диссипация волн; эффекты, обусловленные дифференциальным вращением; эффекты, вызываемые магнитными полями и множество других явлений фактически целиком остаются в стороне! Это принципиально важные явления, так как без них мы не можем объяснить существование хромосфер и корон (в данной книге эти области атмосфер будут рассматриваться лишь с полупирической диагностической точки зрения, поскольку последовательного теоретического метода у нас нет). Существенные ограничения на наши представления о звездных атмосферах налагаются также и тем, что мы не умеем описывать тонкие явления обмена энергией между радиативными и нерадиативными модами. Разработка теории, которая позволяла бы правильно учитывать такие взаимодействия, является, по-видимому, наиболее насущной из проблем, лежащих на переднем крае исследований в этой области астрофизики.

Однако, чтобы у читателя не сложилось слишком уж мрачное представление о положении дел в настоящее время, надо сказать, что прогресс был быстрым и продолжается во все более высоком темпе. Поэтому разумно ожидать, что по крайней мере некоторые из недостатков сегодняшней теории будут исправлены в недалеком будущем. Более того, даже не выходя за рамки наложенных выше ограничений, все же удастся успешно предсказать многие характеристики континуума и профили линий у многих (вероятно, даже у большинства) звезд.

7.2. Модели с лучистым равновесием и ЛТР

В этом параграфе развиваются *методы*, которые можно использовать для построения моделей плоских неподвижных атмосфер с лучистым равновесием в предположении существования ЛТР. *Результаты* таких расчетов будут описаны в § 7.4. Как говорилось в гл. 5, предположение об ЛТР значительно упрощает расчет модели (в этом можно убедиться, сравнив методы, излагаемые в настоящем параграфе и в § 7.5). Мы критиковали использование ЛТР на том основании, что оно не дает правильного описания взаимодействия излучения и вещества в звездных атмосферах и совершен-