

СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

§ 1. Физические условия в обычных звездах

Почти вся астрофизика имеет дело с веществом, находящимся при высокой температуре. Даже в том случае, когда рассматривалось холодное вещество, то лишь предполагалось, что температура недостаточно высока, чтобы существенно изменить свойства вещества. При плотности порядка 10^6 г/см^3 это означает $T < 10^9 \text{ }^\circ\text{К}$, а при плотности 10^{14} г/см^3 соответственно $T < 10^{11} \text{ }^\circ\text{К}$; по житейским стандартам эти температуры достаточно высоки. Неудивительно, что белые карлики при плотности $\sim 10^6 \text{ г/см}^3$ имеют высокую температуру поверхности, $T \approx 10^4 \text{ }^\circ\text{К}$, а пульсары — нейтронные звезды (плотность которых $\sim 10^{14} \text{ г/см}^3$) при образовании имеют на поверхности $T \approx 10^6 \text{ }^\circ\text{К}$. Вместе с тем механическое равновесие этих плотных объектов практически определяется свойствами холодного вещества и не зависит от их температуры, поскольку температура их недр ниже указанных пределов.

Звезды, лежащие на главной последовательности (т. е. звезды, в центре которых идут ядерные реакции превращения водорода в гелий), составляющие основную долю звездного населения, имеют температуру в центре порядка 10^7 — $10^8 \text{ }^\circ\text{К}$ при плотности $0,1 \div 100 \text{ г/см}^3$. В этом случае мы говорим о горячих звездах; равновесие их полностью определяется именно тепловым давлением. Это связано с тем, что плотность вещества в таких звездах мала. При массе звезды $M < 100M_\odot$ главный вклад в давление и в плотность энергии вносит плазма — совокупность ядер и электронов, образующих одноатомный нерелятивистский газ с показателем адиабаты $5/3$.

В периферических слоях температура ниже и на поверхности звезд температура опускается до $50\,000$ — $3000 \text{ }^\circ\text{К}$; в последнее время открыты объекты неизвестной природы с температурой поверхности порядка 700 — $1000 \text{ }^\circ\text{К}$. Поэтому во внешней оболочке звезд ионизация уже отнюдь не является полной; наряду со свободными электронами в газе находятся и ионы, частично сохранившие электронную оболочку. У самой поверхности в атмосфере

холодных звезд есть и нейтральные атомы, и молекулы химических соединений, и даже расплавленные или затвердевшие частицы из огнеупорного вещества (возможно, металлические окислы).

Равновесное тепловое излучение играет решающую роль в выражении потока энергии в звезде, даже когда его плотность энергии мала по сравнению с плотностью энергии плазмы. Теплопроводность горячего вещества определяет перенос лучистой энергии *).

При высокой температуре пробег квантов зависит от их рассеяния на свободных электронах (комpton-эффект), при более низкой температуре главную роль в определении теплопроводности вещества играет поглощение и испускание квантов электронами в поле ядра, притом во всех вариантах: электрон свободный ($E > 0$) и до и после взаимодействия с квантом, переход электрона из связанного ($E < 0$) в свободное ($E > 0$) состояние при поглощении и из свободного в связанное при испускании кванта, и, наконец, переход электрона из одного связанного состояния ($E < 0$) в другое ($E < 0$).

Совокупность вопросов, относящихся к обычным звездам, подробно разработана. Расчеты ядерных реакций в звездах, потоков тепла и даже тонкости наблюдаемого спектра, — в настоящее время проводятся с большой точностью. Достаточно известны и все исходные величины, относящиеся к этой области (сечения ядерных реакций, непрозрачность вещества и т. д.). По существу, ее не следует относить к релятивистской астрофизике. Поэтому мы отсылаем читателя к хорошо известным книгам по астрофизике (см. литературу в гл. 9).

Ряд вопросов, связанных с ионизацией, теплопроводностью и гидродинамикой горячего газа, изложен также в книге Зельдовича и Райзера (1966). Отметим здесь только один момент, который выявился за последнее десятилетие и не нашел еще должного отражения в литературе. Речь идет о влиянии переходов электронов 3-го типа (связанный — связанный). При этом изолированный атом или ион дает спектр испускания или поглощения, состоящий из отдельных линий. Долгое время предполагалось, что роль отдельных линий в непрозрачности вещества мала. В действительности тяжелые элементы дают очень большое число линий, а взаимодействие с электронами и другими ионами расширяет линии. В целом оказывается, что в важной для звезд области плотностей и температур для обычного состава звездного вещества вклад линий в непрозрачность может уменьшить теплопроводность в два раза. Основная

*) В отдельных областях звезд (зависящих от массы звезды и стадии ее эволюции) перенос энергии осуществляется конвекцией, а при высокой плотности — электронной теплопроводностью.

работа по расчету теплопроводности принадлежит Коксу, Стюарту и Айлерсу (1965). Расчеты изменения структуры звезд главной последовательности за счет увеличения непрозрачности из-за поглощения в линиях проделали Имшенник, Надежин и Пинаев (1966).

§ 2. Высокие температуры

Для релятивистской астрофизики представляют интерес более высокие температуры, которые, с одной стороны, приводят к неустойчивости звезды и, с другой стороны, сами появляются в катастрофические периоды эволюции звезд. Ранний дозвездный период эволюции Вселенной также предположительно характеризуется весьма высокими температурами.

В области высокой температуры наиболее характерным является рождение частиц. Прежде всего речь идет о рождении квантов электромагнитного излучения. При температуре, приближающейся к $m_e c^2/k \approx 6 \cdot 10^9$, становится существенным рождение электронно-позитронных пар. При еще более высоких температурах возможно и рождение других, более тяжелых нейтральных (π^0 , k^0 , \bar{k}^0) и заряженных (μ^\pm , π^\pm , k^\pm) элементарных частиц, вплоть до нуклон-антинуклонных пар (\bar{p} , p , n , \bar{n}), а также частиц, которые можно рассматривать как возбужденные состояния нуклонов («странные» частицы Λ , Σ , ..., резонансы Δ , Σ^* , ...). Ясно, что в этой области очень больших плотностей сильно взаимодействующих частиц количественные предсказания весьма неопределенны; неизвестен даже полный список частиц или состояний, которые нужно рассматривать.

Особо стоит вопрос о равновесном содержании нейтрино и антинейтрино. Как показали эксперименты последних лет, есть два сорта нейтрино и два сорта антинейтрино — так называемые электронные ν_e , $\bar{\nu}_e$ и мюонные ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$. Так как масса покоя этих частиц равна нулю, то равновесное содержание и соответствующая плотность энергии и давление весьма близки к тем же величинам для квантов (электромагнитного излучения). Система, состоящая из определенного числа различных частиц, может превратиться в систему того же состава плюс любое число квантов. Однако нельзя таким же способом без изменения состава остальной системы создать только нейтрино или антинейтрино. Беспрепятственно с точки зрения законов сохранения могут возникать или исчезать только пары $\nu_e + \bar{\nu}_e$ или $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$. Наконец, по современным взглядам нейтрино являются спиральными частицами: это значит, что при данном направлении импульса момент нейтрино может быть только антипараллелен импульсу (момент антинейтрино соответственно только параллелен импульсу). Поэтому энергия, давление и число нейтрино антинейтринных пар вдвое меньше, чем те же