

Рис. 4.3. Эффективность охлаждения разреженной космической плазмы $\lambda(T)$ [эрг·см³/с] со столкновительным возбуждением и ионизацией. Приведены кривые для плазмы солнечного химического состава (верхняя кривая), с обедненным в 10 раз содержанием металлов (средняя кривая) и водородно-гелиевой плазмы (75% H, 25% He) без тяжелых элементов (нижняя кривая). Резкий скачок вблизи $T \sim 10^4$ К связан с ударным возбуждением второго (резонансного) уровня атомов водорода. На нижней кривой максимумы соответствуют водороду (слева) и гелию (справа).

объясняет наблюдаемую стратификацию областей HI на холодные облака, более теплую межоблачную среду и горячий корональный газ (см. ниже).

Отметим, что в большинстве перечисленных процессов нагрева и охлаждения требуется знать населенность уровней атомов и ионов МЗС, поэтому для нахождения равновесной температуры среды требуется совместно решать уравнения ионизационного баланса.

4.5. Облака нейтрального водорода HI и тепловая неустойчивость межзвездной среды

Наблюдения показывают, что нейтральный водород не заполняет равномерно межзвездную среду, а находится преимущественно в одной из двух фаз — относительно плотных ($n \sim 10^1\text{--}10^2$ см⁻³) холодных ($T \sim 100$ К) облаков и разреженной межоблачной среды ($n \sim 0.1\text{--}1$ см⁻³, $T \sim 10^3\text{--}10^4$ К). Это в значительной степени обу-

словлено *тепловой неустойчивостью* МЗС, вызванной немонотонной зависимостью давления от плотности вещества $P(n)$ в условиях МЗС. Другая причина неоднородностей среды — турбулентный характер движения газа.

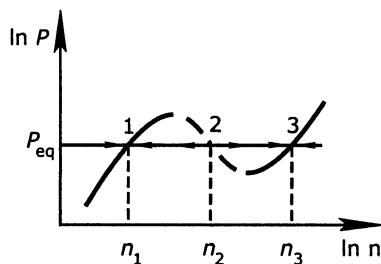


Рис. 4.4. К тепловой неустойчивости МЗС. Участок кривой $P(n)$ с отрицательной производной соответствует неустойчивому состоянию.

Качественно эффект тепловой неустойчивости состоит в следующем. Вещество МЗС — идеальный разреженный газ с давлением $P = nkT$. Равновесная температура среды находится из решения уравнений теплового и ионизационного баланса (см. выше) и является функцией плотности. В результате быстрого роста $\lambda(T)$ в области $T \sim 10^4$ К (см. рис. 4.3) получается, что зависимость $P(n)$ в условиях МЗС немонотонна, наряду с участками роста давления $P(n)$ есть участок, где давление падает с увеличением плотности из-за уменьшения температуры газа (рис. 4.4). Таким образом существует область давлений, в которой одному значению давления соответствует три решения системы уравнений теплового и гидростатического равновесия с разными n и T . Решение 2 на среднем участке (где давление падает с ростом плотности) неустойчиво относительно малых возмущений. Действительно, флуктуация с плотностью ниже равновесной будет иметь большее давление, чем в окружающей среде, и, значит, будет расширяться до тех пор, пока не достигнет равновесного значения (решение 1). Обратно, флуктуация с плотностью больше равновесной будет иметь меньшее давление и начнет сжиматься пока не достигнет равновесного давления при большей плотности (решение 3)⁴. Поэтому более разреженная меж-

⁴Здесь полная аналогия с уравнением Ван-дер-Ваальса для неидеального газа — немонотонная зависимость $P(n)$ объясняет разбисие среды на две фазы: жидкую и газообразную.

облачная среда (решение 1) может находиться в динамическом равновесии с более плотной средой в облаке газа (решение 3).

Для того, чтобы в МЗС имела место тепловая неустойчивость и возникали две динамически равновесные фазы газовой среды, отличающиеся в десятки раз по плотности и температуре, требуется, чтобы давление МЗС было заключено между экстремумами функции $P(n)$ (рис. 4.4). В общем случае, это условие может и не выполняться, но в природе, по-видимому, действует механизм саморегуляции, стремящийся удержать давление в требуемых пределах. Действительно, положение кривой, изображенной на рис. 4.4, не фиксировано, а зависит от потока энергии, нагревающей среду. Чем меньше поток энергии, тем ниже будет располагаться на рисунке неустойчивый участок кривой (между экстремумами). Предположим, максимум между точками 1 и 2 оказался ниже уровня давления среды, P_{eq} . Тогда условие тепловой неустойчивости перестанет выполняться, останется только одна точка пересечения прямой $P = P_{eq}$ с кривой, справа от области неустойчивости. Равновесие между процессами нагрева и охлаждения будут достигаться при более высокой концентрации частиц, газ станет более плотным, и, как следствие, возрастут темпы звездообразования. Это вызовет рост потока энергии через межзвездную среду, возрастание темпов ее нагрева, и, как следствие, поднятие кривой $P(n)$. И наоборот, при очень мощном «подогреве» газа кривая $P(n)$ поднимется, и точка пересечения прямой $P = P_{eq}$ с кривой переместится на левый участок, соответствующий более разреженному и горячему газу. Облака при этом образовываться не будут, что приведет к уменьшению темпов звездообразования и опусканию области неустойчивости на диаграмме $P(n)$. Таким образом может поддерживаться двухфазное состояние газа в течение долгого времени.

В реальных условиях межзвездной среды ситуация оказывается более сложной. Во-первых, магнитное поле, вмороженное в газ, препятствует его сжатию, если только оно не происходит вдоль линий индукции поля, и это обстоятельство существенно везде, где поле сохраняет упорядоченный характер. В этом случае сжатие газа при развитии неустойчивости происходит преимущественно вдоль поля, плотность газа растет значительно медленнее, чем при сжатии по всем трем измерениям, и для образования даже небольших облаков требуются десятки миллионов лет, а за это время баланс между нагревом и охлаждением может измениться. Во-вторых, межзвездная

среда находится в непрерывном движении и ее локальные свойства непрерывно меняются, в ней появляются новые источники энергии и исчезают старые, претерпевают сильные изменения как темпы нагрева, так и темпы охлаждения среды, так что условие теплового равновесия в данной области может просто не выполняться или выполняться лишь очень приблизительно. Поэтому часть газа всегда будет находиться в состоянии, далеком от равновесия, то есть не лежать на равновесной кривой $P(n)$.

В зависимости от конкретных ситуаций в образовании облаков газа играет роль не только тепловая неустойчивость, но и другие неустойчивости (гравитационная, магнитогидродинамическая). Большую роль в образовании более плотных и менее плотных областей МЗС играет также сложный характер движения газа, например, его турбулентность, а также сжатие при распространении ударных волн от сверхновых или возникающих при прохождении газа через спиральные ветви Галактики.

4.6. Ионизованный водород и зоны HII

Водород — самый распространенный элемент МЗС. Потенциал его ионизации с основного уровня $\chi \approx 13.6$ эВ, поэтому он может быть ионизован только излучением с длиной волны меньше предела лаймановского континуума $\lambda(Ly_c) = 912 \text{ \AA}$ ($\nu_c \approx 3.29 \cdot 10^{15}$ Гц).

Помимо ионизации фотонами, возможна ионизация электронным ударом. Формально «температура ионизации», соответствующая энергии 13.6 эВ, очень велика — около 158000 К, однако ионизация водорода становится ощутимой значительно раньше, начиная с температур около 3000 К, и к 10000 К водород практически полностью ионизован. Это связано с тем, что относительная концентрация ионов определяется ионизационным равновесием в плазме, т. е. динамическим балансом процессов ионизации и рекомбинации, а ионизация может производиться электронами с энергией выше средней при данной температуре.

Следует иметь в виду, что эффективное сечение столкновения электрона с нейтральным атомом, приводящее к его ионизации, значительно больше, чем эффективное сечение рекомбинации. Физическая причина этого состоит в том, что «статистический вес» (совокупность возможных состояний) свободного электрона намного выше, чем электронов в связанном состоянии — при прочих равных