

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

условиях «найти» свободное место в континууме электрону гораздо легче, чем осуществить обратный переход в состояние с небольшим «статвесом». Необходимые для поддержания ионизационного равновесия возбуждение и ионизация атомов осуществляются электронами с энергией $\epsilon \gg kT$, т. е. малой долей высокоэнергичных электронов из «хвоста» максвелловского распределения. Если выполняются условия ЛТР (например, в атмосферах звезд), равновесная степень ионизации ионов определяется по формуле Саха (см. Приложение).

Области ионизованного водорода (зоны НII) — самый распространенный вид эмиссионных туманностей, возникающих вокруг горячих звезд. В них имеет место практически полная ионизация водорода УФ излучением с $\lambda < 912 \text{ \AA}$. Яркие гигантские зоны НII, отлично видимые даже в других галактиках, являются индикаторами зон активного звездообразования, где много молодых горячих звезд высокой светимости. УФ квантов может быть так много, что весь водород в облаке вокруг зоны звездообразования будет ионизован.

Объем зоны НII определяется мощностью УФ излучения центрального источника и как правило резко ограничен. Толщина переходной области порядка $0.1/n_e$ пк, в сотни раз меньше характерных размеров самой туманности. Резкость границы обусловлена лавинообразным характером нарастания оптической толщи для $L_{\gamma c}$ квантов в переходной области из-за большого эффективного сечения взаимодействия атом–фотон.

Физические условия в зонах НII далеки от термодинамического равновесия, поэтому ионизация элементов рассчитывается на основе условий ионизационного равновесия (из условия баланса фотоионизации и радиационной рекомбинации). Температура зон НII определяется балансом нагрева УФ излучением (при фотоионизации) и охлаждения (преимущественно благодаря излучению в запрещенных линиях тяжелых элементов ОII, ОIII, NII). Электроны расходуют тепловую энергию на возбуждение метастабильных уровней, а испускаемый квант выходит из туманности, и тем самым происходит охлаждение. В зависимости от температуры центральной звезды и содержания тяжелых элементов температура зон НII составляет 6000–12000 К.

Радиус стационарной зоны НII $R_{\text{НII}}$ определяется равенством числа Лайман-квантов с $\lambda < 912 \text{ \AA}$, испускаемых центральной звездой (звездами) за единицу времени $N_{L_{\gamma c}}$, числу рекомбинаций водо-

рода за единицу времени на все уровни, выше первого, во всем объеме туманности:

$$\frac{4\pi}{3} R_{\text{НИ}}^3 \sum_{i=2}^{\infty} \alpha_i n_e n_p = N_{Ly_c}. \quad (4.13)$$

Здесь α_i — коэффициент спонтанной радиационной рекомбинации на i -й уровень, $n_e \approx n_p$ — концентрация электронов и протонов, соответственно. Рекомбинация на первый (основной) уровень приводит к испусканию нового Лайман-кванта с $\lambda < 912 \text{ \AA}$, который поглощается внутри туманности, вызывая ионизацию другого атома водорода, т. е. не изменяет число ионизованных атомов по туманности в целом. Она должна быть исключена из баланса, поэтому суммирование начинается с $i = 2$.

Сделаем численную оценку. Число Ly_c квантов, испускаемых звездой с радиусом R_* за единицу времени,

$$N_{Ly_c} = 4\pi R_*^2 \int_{3.3 \cdot 10^{15}}^{\infty} \pi B_\nu \frac{d\nu}{h\nu},$$

где πB_ν — поток излучения с единичной площади поверхности звезды. Тогда для $T_* = 3 \text{ эВ}$ ($\sim 35000 \text{ К}$) и $R_* \simeq 10^{11} \text{ см}$ получаем в виновском приближении:

$$N_{Ly_c} \simeq 16\pi^2 \left(\frac{R_*}{c}\right)^2 \left(\frac{kT_*}{h\nu_c}\right)^3 \nu_c^3 e^{-\frac{h\nu_c}{kT_*}} \sim 3 \cdot 10^{42} \text{ кв./с.}$$

При характерных температурах областей НИ коэффициент $\alpha_i = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \simeq 4 \cdot 10^{-13} (\text{см}^3/\text{с}) / \sqrt{T/10^4}$, $\alpha_1 \simeq 1.55 \cdot 10^{-13} (\text{см}^3/\text{с}) / \sqrt{T/10^4}$, и при $n_e \sim n_p \sim 1 \text{ см}^{-3}$ получаем из (4.13) $R_{\text{НИ}} \simeq 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}$. С ростом температуры центральной звезды радиус стационарной зоны НИ очень резко возрастает.

Кванты с длиной волны $\lambda < 504 \text{ \AA}$ способны ионизовывать гелий, так что вокруг самых горячих звезд наблюдаются зоны HeII.

4.7. Горячий, или «корональный» газ

Как видно из Табл. 4.1, наиболее горячий — корональный — газ занимает существенную долю объема пространства. Картина его распределения в диске Галактики очень сложна и должна сравнительно быстро меняться (за десятки миллионов лет). Горячий газ за-