

## 4.8. Молекулярные облака, области звездообразования и космические мазеры

**Молекулярные облака.** Внутри протяженных областей нейтрального водорода HI с характерной концентрацией атомов  $n_{\text{HI}} \approx 10 \text{ см}^{-3}$  часто наблюдаются плотные холодные облака молекулярного водорода, наиболее интенсивные из которых — гигантские молекулярные облака (ГМО) имеют массу, превышающую  $10^5 M_{\odot}$  и характерные размеры до 40 пк. В них сосредоточена основная часть молекулярного газа  $\text{H}_2$  (полная масса молекулярного газа в Галактике оценивается в  $2 \cdot 10^9 M_{\odot}$ ). ГМО — самые массивные гравитационно-связанные объекты в Галактике. Большинство из них сосредоточено в кольце на расстоянии от 4 до 8 кпк от центра Галактики. Они встречаются как в спиральных рукавах, так и (реже) между ними. Облака неоднородны, в них есть холодные уплотнения ( $n \sim 100\text{--}1000 \text{ г/см}^3$ ,  $T \approx 10 \text{ К}$ , размер  $\sim 0.3\text{--}1 \text{ пк}$ ). Молекулярные облака меньшей массы образуют плотные глобулы (глобулы Бока), видимые как черные пятна на фоне Млечного Пути или областей HII (например, Конская Голова или Угольный Мешок), с массами до нескольких сотен  $M_{\odot}$ . В некоторых из них наблюдаются признаки звездообразования.

В молекулярных облаках обнаружены более 100 различных молекул. После  $\text{H}_2$  наиболее обильна молекула CO. Ее концентрация в первом приближении пропорциональна количеству молекул  $\text{H}_2$ :  $n(\text{H}_2)/n_{\text{CO}} \approx 10^4$ . Наблюдать излучение молекулы  $\text{H}_2$  трудно (у нее нет линий в оптическом или радиодиапазонах). Поэтому масса  $\text{H}_2$  обычно оценивается по массе CO, измеряемой по радиоизлучению.

**Космические мазеры (КМ)** — нетепловые источники радиоизлучения, в которых тепловая эмиссия газа в спектральных линиях молекул усиливается за счет преобладания индуцированного излучения над поглощением (ср. с лабораторными лазерами<sup>5</sup>). Мазерные источники отличаются высокой яркостной температурой и высокой степенью поляризации в линиях. Наиболее известные КМ наблюдаются в линиях гидроксидов OH ( $\lambda = 18 \text{ см}$ ,  $T_b \sim 10^{13} \text{ К}$ ), воды  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\lambda = 1.35 \text{ см}$ ,  $T_b \sim 10^{15}\text{--}10^{16} \text{ К}$ ), монооксида кремния SiO ( $2\text{--}7 \text{ мм}$ ,  $T_b \sim 10^{10} \text{ К}$ ) и метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$  (1.2 см). Мазерные источники обычно ассоциируются либо с областями звездообразования, где

---

<sup>5</sup>Имеется в виду одинаковая физическая природа излучения; расхожее представление о лазерах как об узконаправленных пучках когерентного света не соответствует КМ — в них отсутствует искусственно создаваемая в лабораторных условиях высокая степень направленности излучения. КМ излучают вполне изотропно!

они представляют собой скопления маленьких (1–10 а. е.) газовых образований, образующих «гнезда» с размерами  $10^{16}$ – $10^{17}$  см, либо с областями вблизи активных ядер галактик (т. н. мегамазеры). Полная светимость в мазерной конденсации составляет  $10^{28}$ – $10^{31}$  эрг/с, а в случае мегамазеров может достигать  $10^{35}$  эрг/с. Это означает, что в узком спектральном диапазоне КМ излучают  $10^{44}$ – $10^{51}$  «радиофотонов» в секунду. Концентрация частиц газа в КМ составляет  $10^7$ – $10^{11}$  см<sup>-3</sup>, массы КМ в областях звездообразования порядка масс планет,  $10^{27}$ – $10^{30}$  г (возможно, это протопланетные сгущения). Более слабые КМ встречаются в областях взаимодействия оболочек сверхновых с молекулярными облаками и в околозвездных оболочках вокруг старых звезд поздних спектральных классов (К,М) с сильным истечением вещества.

Для функционирования КМ необходима, как и в случае лабораторных лазеров, инверсная заселенность атомных уровней (отрицательный коэффициент поглощения):  $n_2/g_2 > n_1/g_1$ , где  $g_{1,2}$  — статистический вес уровней перехода. Высокая мощность выходящего излучения возникает за счет индуцированных переходов с верхнего метастабильного уровня «2» на нижний «1», стимулированных фотонами, которые рождаются в среде за счет тепловой энергии (столкновение атомов, рекомбинация). Индуцированное излучение возникает на той же частоте и с той же фазой и распространяется в ту же сторону, что и вызвавший его фотон.

Образно говоря, КМ непрерывного действия представляет собой тепловую машину, перерабатывающую с некоторой эффективностью энергию накачки, поступающую от внешнего источника, в энергию мазерного излучения. Для работы такой тепловой машины необходима как минимум трехуровневая система по схеме  $1 \rightarrow 3 \rightarrow \langle 2 \rangle \rightarrow \langle 1 \rangle$  (накачка на верхний уровень с последующим стоком на верхний (сигнальный) уровень мазерного перехода) или  $1 \rightarrow \langle 3 \rangle \rightarrow \langle 2 \rangle \rightarrow 1$  (накачка на верхний сигнальный уровень мазерного перехода «3» и сток с нижнего сигнального уровня «2» на уровень 1). В кавычках — номера уровней, переход между которыми рождает мазерное излучение. Отсутствие или ослабление стока энергии с уровня 3 на верхний сигнальный «2» приведет к уменьшению заселенности верхнего сигнального уровня «2» в первом случае, а отсутствие стока с уровня «2» во втором случае приведет к повышению заселенности нижнего сигнального уровня. В обоих случаях инверсная заселенность сигнальных уровней быстро исчезнет.

Накачка и сток энергии в КМ осуществляется либо через радиативные (R) или столкновительные (C) процессы, либо за счет химических процессов. В последнем случае образуется молекула в возбужденном состоянии или же разрушается молекула на нижнем сигнальном уровне в процессе химической реакции. Лабораторный пример такого рода — эксимерные лазеры на неустойчивых соединениях благородных газов  $\text{Ne}_2$  или  $\text{Xe}_2$ .

При R-стоке важно, чтобы кванты стока «2» — 1 свободно выходили из мазерного источника, иначе возникнет термализация уровней (заселенность уровней будет стремиться к больцмановскому распределению, как в условиях ЛТР). Для мазера со столкновительной накачкой необходимо, чтобы накачка и сток энергии осуществлялись частицами с разными энергиями. Такие неравновесные условия возможны в ударных волнах, где температуры электронов и атомов (молекул) могут значительно отличаться.

#### 4.9. Космические лучи и синхротронное излучение

Космическими лучами (КЛ) называют заряженные частицы высокой энергии (от  $10^8$  до  $\sim 3 \cdot 10^{20}$  эВ), приходящие либо от Солнца ( $E < 10^{10}$  эВ), либо из межзвездного пространства. Космические лучи были открыты австрийским физиком В. Гессом (*V. Hess*) в 1912 г. По своим физическим свойствам КЛ представляют собой сильно разреженный релятивистский газ, частицы которого практически не взаимодействуют друг с другом (энергетический спектр КЛ имеет не максвелловский, а степенной характер), но могут сталкиваться с частицами МЗС и взаимодействуют с межзвездным магнитным полем. В КЛ преобладают протоны, но имеются также электроны, альфа-частицы и ядра более тяжелых элементов с зарядом до  $Z \sim 30$ . Поток КЛ вблизи Земли сравнительно мал, около 1 частицы/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ), однако плотность энергии  $U_{\text{кр}} \sim 1$  эВ/ $\text{см}^3$  сравнима с плотностью суммарного ЭМ излучения звезд в Галактике, или с плотностью энергии теплового движения межзвездного газа и кинетической энергии его турбулентных движений, а также с плотностью энергии ( $B^2/8\pi$ ) магнитного поля Галактики.

Энергетический спектр КЛ — степенной, нетепловой, имеет несколько характерных изломов, в среднем показатель спектра около 2 (точнее:  $I \sim E^{-1.7}$ , рис. 4.5). КЛ с энергией  $10^{11}$ – $10^{16}$  эВ приходят с равной вероятностью с любого направления на небе (изотроп-