

РАСЧЕТ ЭФФЕКТОВ САМОПОГЛОЩЕНИЯ В ПРОФИЛЯХ РАДИОЛИНИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА

З. А. Алферова, И. В. Госачинский

Приведены результаты численного анализа профилей радиолнии H I от облаков газа с произвольным сферически симметричным распределением параметров. Приведены графики, связывающие наблюдаемые параметры с некоторыми физическими характеристиками облаков газа, главной из которых является величина градиента кинетической температуры от центра облака к его краю. Рассмотрены случаи отсутствия крупномасштабных движений газа в облаке и наличия радиальных движений разного вида. Приведены некоторые рекомендации по выбору той или иной качественной модели распределения физических параметров.

The results of the computer analysis of H I line profiles from the gas clouds with a spherical symmetry and an arbitrary distribution of parameters are reported. The dependence between the observed parameters and some physical characteristics of the gas clouds is presented. The main of them is the value of kinetic temperature gradient from the cloud center to its edge. The models that have been considered are: a cloud without large scale motions, and with some radial motions. Recommendations on the choice between these models of physical parameters are discussed.

Хорошо известно, что интерпретация наблюдений спектральных радиолний успешно проводится, только если оптическая толщина облаков межзвездного газа не слишком велика. Большая оптическая толщина в линии, затрудняя количественный анализ наблюдательных данных, приводит также к ряду новых качественных эффектов, которые часто трудно отличимы от особенностей кинематики межзвездного газа. Давно известно о существовании облаков газа, оптически-толстых в линии нейтрального водорода на волне 21 см (см., например, [1]). Интерес к этой проблеме усилился после обнаружения радиолнии молекулы CO на волне 2.6 мм, для которой характерны огромные оптические толщины. При этом оказалось, что при наличии внутри облака регулярных движений газа (расширение или вращение) профиль линии CO существенно искажается [2].

Время от времени появляются теоретические работы, в которых обсуждаются различные эффекты самопоглощения [3]. Следует заметить, что исследование этих эффектов обычно проводится аналитически, что, естественно, ограничивает возможности расчета только наиболее простыми случаями. В настоящей работе приводятся результаты численного анализа влияния большой оптической толщины на профили радиолний с помощью машинной программы расчета излучения линии H I от облаков газа с произвольной кинематикой. Некоторые результаты этого анализа (разумеется, лишь качественно) могут быть использованы и при интерпретации наблюдений других радиолний.

Программа MODLH1 предназначена для расчета профилей радиолнии нейтрального водорода на волне 21 см от сферически симметричных облаков H I с произвольным распределением параметров по радиусу. Пять параметров задаются в виде таблиц с переменным шагом: концентрация H I, N , см⁻³, кинетическая температура T_k , К, полуширина профиля турбулентных движений σ , км/с, радиальная скорость расширения или сжатия облака V_R , км/с, и скорость вращения u , км/с. Если параметр изменяется линейно, то достаточно ввести лишь его начальное и конечное значения. Положение оси вращения облака задается с помощью двух углов относительно опорной системы координат. Необходимо указать еще линейный размер облака в парсеках. Яркостная температура радиолнии вычисляется с помощью двукратного интеграла

$$T_B(X, Y, V) = k_1 \int_{-z_m}^{z_m} N(Z, V) e^{-k_2 N(Z, V) T(Z) dZ} dZ, \quad (1)$$

где ось Z направлена по лучу зрения; оси X и Y — в картинной плоскости; $2z_m$ — размер облака по лучу зрения в точке (X, Y) ; k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от физических параметров радиолинии и доплеровской ширины ее в той же точке. Последняя складывается из заданного турбулентного движения и теплового движения атомов в соответствии с распределением кинетической температуры по лучу зрения.

Вычисление профилей $T_B(X, Y, V)$ производится в 400 точках наблюдаемой площади облака. Заметим, что формула (1) является приближенной и требует, чтобы величина оптической толщины на единичном интервале интегрирования по лучу зрения (1 пс) была не более 0.2. Затем производится трехмерное сглаживание профилей: по осям X и Y — в соответствии с заданными размерами диаграммы направленности антенны, а по оси V — в соответствии с шириной полосы анализатора. Форма всех сглаживающих функций принимается гауссовой. Программа выдает распределение сглаженной яркостной температуры радиолинии в виде изофот в координатах (X, V) в заданной точке Y_0 , а также по желанию таблицу профилей, вычисленных в узлах интерполяции изофот.

Время расчета одной картинки существенно зависит от размеров облака (поскольку шаг интегрирования фиксирован), а также от параметров сглаживания и составляет на ЭВМ ЕС 1033 от 3 до 6 мин. Вся программа занимает 156 К оперативной памяти. Для ускорения счета можно использовать отображения симметрии по осям X и V . Программа может рассчитывать также некоторые не сферически симметричные случаи.

Самопоглощение при отсутствии макроскопических движений. Пример изофот $T_B(X, Y_0, V)$, вычисленных при условии, что $N=10 \text{ см}^{-3}$, $\sigma=3 \text{ км/с}$, а кинетическая температура изменяется линейно от $T_k^0=100 \text{ К}$ в центре облака до $T_k^1=10 \text{ К}$ на краю, приведен на рис. 1. Видно, что в большей части облака профили линии имеют двугорбый характер, который обычно наблюдается при наличии в облаке радиальных движений. Заметим, что наличие градиента кинетической температуры обязательно для появления этого эффекта. Отношение яркостных температур в минимуме профилей к максимуму зависит как от концентрации NI , так и от величины градиента кинетической температуры. Результаты вычислений этого отношения для некоторого набора концентраций и градиентов температуры приведены на рис. 2. Видно, что при отсутствии градиента температуры профиль имеет один максимум при любой концентрации.

Градиент кинетической температуры существен не только для величины оптической толщины, но и для доплеровской ширины профилей. Оказалось, что двугорбый характер профилей можно компенсировать градиентом σ , подобранным соответствующим образом (рис. 3, который получен при тех же параметрах, что и рис. 1, но σ в центре облака равно 3 км/с, а на краю — 10 км/с).

Рис. 2 позволяет по наблюдаемым параметрам радиолинии определить градиент T_k , если можно выяснить, что наблюдаемое раздвоение профиля возникает в результате совместного действия большой оптической толщины и градиента T_k , а не макроскопических движений газа в облаке. Последнее можно сделать при наличии антенны с достаточно высокой угловой разрешающей способностью. На рис. 1 видно, что распределение яркости по облаку NI на фиксированных лучевых скоростях имеет один максимум, и такая картина сохраняется при любых N и любых градиентах. С другой стороны, известно, что при кинематическом раздвоении профилей распределение яркости на лучевых скоростях вблизи средней скорости облака всегда имеет два максимума и это позволяет по наблюдениям с высоким угловым разрешением различить эти два эффекта.

Самопоглощение при наличии радиальных движений газа. Самопоглощение обычно привлекается для объяснения асимметрии профилей, которые раздваиваются в результате радиальных движений газа в облаке [2]. Это явление довольно часто наблюдается в облаках CO, и в этом случае приходится предполагать специфическое распределение скорости радиального движения ($V_R \propto R^{-1/2}$)

и, кроме того, значительные градиенты кинетической температуры и турбулентности. Этот эффект можно воспроизвести и для радиолинии HI (см. рис. 4, который получен при $N=10 \text{ см}^{-3}$, $\sigma=3 \text{ км/с}$, $V_R \propto R^{-1/2}$, $T_K^0=100 \text{ К}$, $T_K^1=10 \text{ К}$). Отношение яркостных температур двух максимумов центрального профиля в зависимости от N и градиента T_K приведено на рис. 5. В работе [2] высказано предположение, что по соотношению интенсивностей максимумов профиля на положительных и отрицательных скоростях можно определить знак скорости радиального движения (расширение или сжатие). Однако, как видно на рис. 5, отношение максимумов профиля зависит еще и от знака градиента кинетической температуры. Следовательно, для определения того, расширяется или сжимается облако газа, необходимо выяснить знак градиента T_K . Расчет соответствующих изофот показал, что это можно сделать по результатам наблюдений с достаточно высоким угловым разрешением, но лишь для облаков HI с достаточно высокой концентрацией (больше 10 см^{-3}). В этом случае яркостная температура профиля на краю облака показывает, растет ли кинетическая температура к центру облака или наоборот.

Рис. 6 показывает, что близкий к предыдущему характер профилей получается и при постоянной скорости радиального движения. Эти изофоты вычислены при тех же параметрах, что и изофоты на рис. 4, но $V_R=20 \text{ км/с}$. Качественно это явление можно объяснить тем, что поглощения в крыльях профиля

Рис. 1. Изофоты яркостной температуры радиолинии при $R_0=50 \text{ пс}$, $N=10 \text{ см}^{-3}$, $\sigma=3 \text{ км/с}$, $T_K^0=100 \text{ К}$, $T_K^1=10 \text{ К}$ и при отсутствии макроскопических движений.

Шаг изофот $0.1 T_B$ (макс.).

Рис. 2. Зависимость отношения яркостной температуры в минимуме профиля к максимуму от градиента кинетической температуры.

Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но σ изменяется от 3 км/с в центре облака до 10 км/с на краю.

Рис. 1

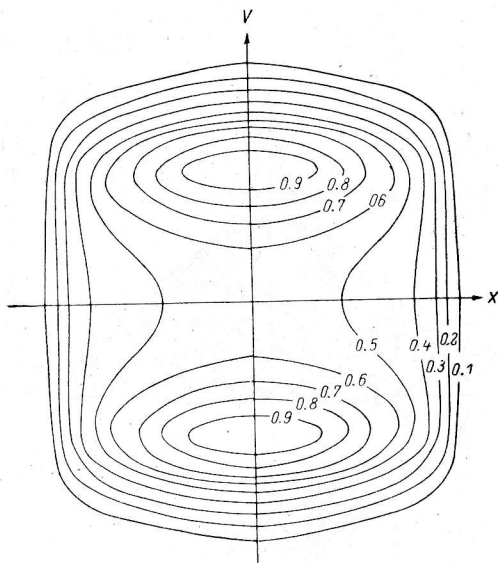


Рис. 2

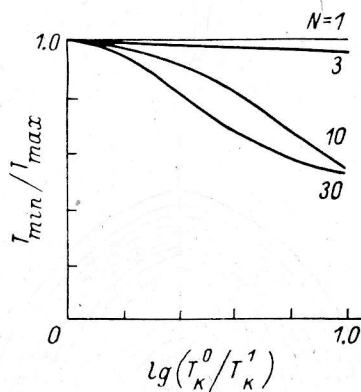
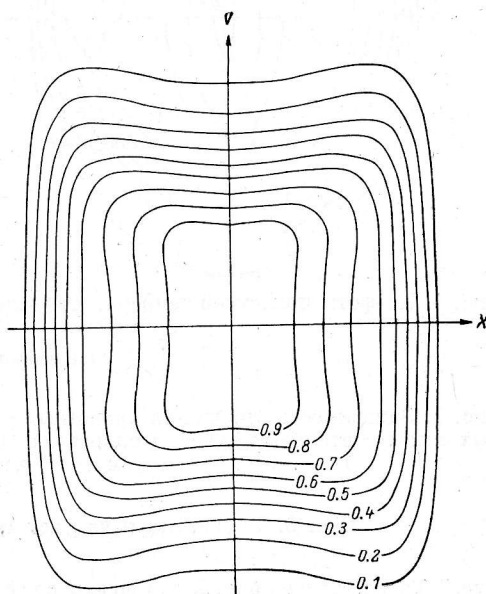


Рис. 3



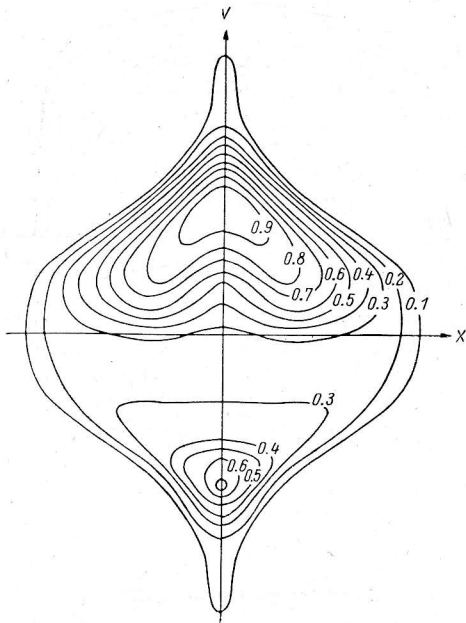


Рис. 4

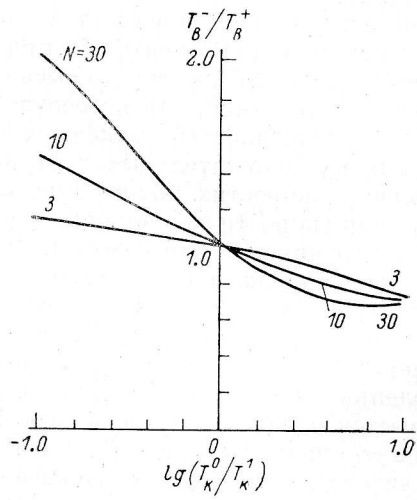


Рис. 5

Рис. 6

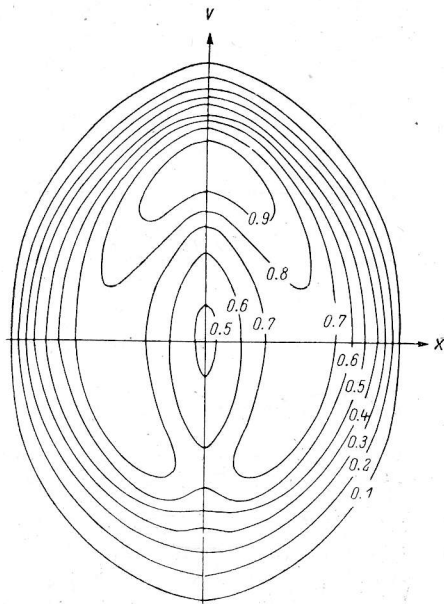


Рис. 7

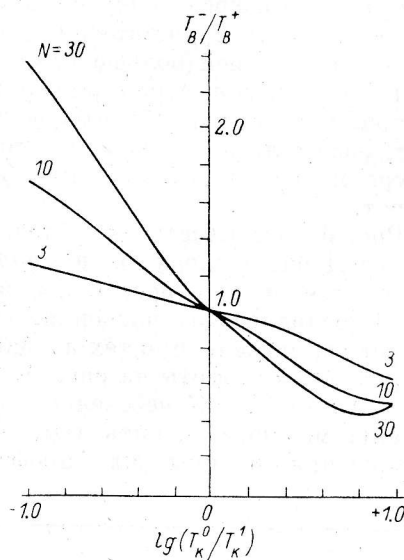


Рис. 4. Изофоты яркостной температуры радиолинии при $R_0=50$ пс, $N=10$ см $^{-3}$, $\sigma=3$ км/с, $V_R \propto R^{-1/2}$, $T_K^0=100$ К, $T_K^1=10$ К.
Шаг изофот $0.1T_B$ (макс.).

Рис. 5. Зависимость отношения яркостных температур максимумов профиля на отрицательных и положительных лучевых скоростях от концентрации HI и градиента кинетической температуры, $V_R \propto R^{-1/2}$.

Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но $V_R=20$ км/с по всему облаку.

Рис. 7. То же, что и на рис. 5, для модели с постоянной скоростью радиального движения газа.

с большой оптической толщиной оказывается достаточно для появления асимметрии максимумов интегрального профиля радиолинии. Зависимость отношения яркостных температур максимумов профиля в центре облака от N и величины градиента T_e приведена на рис. 7. Эти кривые (так же как и рис. 4) позволяют по измеренным параметрам профиля радиолинии определить величину градиента температуры, если задаться средней концентрацией HI.

Заключение. Приведенные выше результаты расчета профилей радиолинии HI показывают, что самопоглощение приводит к некоторым качественно новым эффектам, которые можно наблюдать в облаках с большой концентрацией атомов HI и достаточно низкой кинетической температурой. Рис. 2, 5 и 7 дают количественную связь наблюдаемых величин с физическими параметрами облака газа. В ряде случаев подробное исследование распределения излучения радиолинии по облаку с высоким угловым разрешением антенны позволяет сделать качественное заключение о том или ином характере распределения физических параметров в облаке. Приведенные выше качественные выводы применимы к любым радиолиниям, для которых характерно самопоглощение, особенно для линии молекулы CO. Количественный расчет излучения этой радиолинии весьма сложен и требует специальной программы.

Литература

1. Riegel K. W., Jennings M. C. Observations of an unusual cold cloud in the Galaxy. — *Astrophys. J.*, 1969, 157, p. 563.
2. Snell R. L., Loren R. B. Self-reversed CO profiles in collapsing molecular clouds. — *Astrophys. J.*, 1977, 211, p. 122.
3. Levinson F. H., Brown R. L. Analysis and interpretation of HI self-absorption lines. — *Astrophys. J.*, 1980, 242, p. 416.

Поступила в редакцию 14.07.81