

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКНА WB 673 В РАДИОЛИНИЯХ АММИАКА**О. Л. Рябухина, М. С. Кирсанова***Институт астрономии Российской академии наук*

Работа посвящена изучению молекулярного волокна WB 673, которое находится на расстоянии 1.8 кпк в гигантском молекулярном облаке G174+2.5. Были проведены наблюдения линий аммиака NH_3 (1,1), (2,2) и (3,3) в 2019 г. на телескопе обсерватории Эффельсберг (Германия). Определены параметры линий, получены карты интегральных интенсивностей аммиака в плотных сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Получены карты лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа. Проведен анализ аномалий сверхтонкой структуры линий NH_3 (1,1).

STUDY OF THE FILAMENT WB 673 IN AMMONIA RADIOLINES**O. L. Ryabukhina, M. S. Kirsanova***Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences*

We study the molecular filament WB 673 which is located at a distance of 1.8 kpc in the giant molecular cloud G174 + 2.5. Observations of ammonia radiolines NH_3 (1,1), (2,2) and (3,3) were carried out in 2019 at the Effelsberg observatory (Germany). The parameters of the lines were determined, maps of the integrated intensities of ammonia in dense clumps WB 668, WB 673, S233-IR and G173.57+2.43 were obtained. The column density of ammonia and the kinetic temperature of the gas were obtained. An analysis of the hyperfine structure anomalies of the NH_3 (1,1) lines was carried out.

Введение

Исследования последних лет неизменно показывают, что образование звезд происходит в наиболее плотных частях межзвездных молекулярных волокон [1]. Образование и уплотнение волокон происходит вследствие последовательного сжатия газовых облаков сверхзвуковыми волнами или оболочками [2]. Таким образом, плотные облака на границах расширяющихся зон ионизированного водорода H II являются подходящими лабораториями для проверки теоретических концепций механизмов образования звезд.

Исследуемое волокно WB 673 граничит с восточной стороны с областью H II S231, а также содержит компактную область H II S233. В самом волокне по картам излучения CO [3] выделяются плотные сгустки WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Все сгустки демонстрируют признаки активного звездообразования: в них наблюдаются мазеры водяного пара H_2O , а также точечные ИК-источники IRAS и MSX [4]. Наблюдения показывают, что центральные сгустки WB 673 и S233-IR находятся на более поздней эволюционной стадии, чем периферийные WB 668 и G173.57+2.43. Для проверки этого предположения мы планируем использовать метод химических часов, для которого требуется информация о температуре газа и содержании различных молекул. Обилия молекул CS, CO, N_2H^+ , HCN и HNC были получены в работе [5]. Для определения температуры газа было решено использовать линии аммиака, поскольку его нижние инверсионные переходы являются метастабильными и возбуждаются посредством столкновений. Приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР) адекватно описывает распределение населенности

уровней аммиака, что делает его надежным трассером температуры газа. Также по яркому излучению аммиака определяются местоположения плотных сгустков, поскольку он наблюдается в газовой фазе без вымораживания на пыль в плотных (до 10^5 см^{-3}) и холодных молекулярных облаках.

Наблюдательные данные

Наблюдения линий аммиака производились на 100-м телескопе Эффельсберг (Германия). Наблюдения проводились в режиме непрерывного картирования (On-the-Fly) с использованием 1.3 мм приемника SFK с полосой пропускания 500 МГц. Ширина диаграммы направленности на уровне половины интенсивности составляет $40''$.

Обработка данных осуществлялась с помощью пакета CLASS GILDAS <http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>, многие вычисления производились на языке программирования Python с использованием пакетов Astropy и PySpecKit.

Результаты и анализ наблюдений

Для определения кинетической температуры и плотности аммиака были использованы инверсионные переходы (1,1) и (2,2). Эти линии имеют сверхтонкое расщепление, на спектрах перехода (1,1) выделяются пять компонент, разнесенных на расстояние нескольких мегагерц. В спектре линии (2,2) интенсивность сателлитных компонент не превышает уровень шума и видна только главная компонента. Приближая сверхтонкую структуру линий перехода (1,1) функцией Гаусса, мы получаем значение оптической толщины $\tau_{(1,1)}$. Зная оптическую толщину главной компоненты $\tau_{(1,1)m} = \tau_{(1,1)}/2$ и интенсивность линий перехода (1,1) $T_{B(1,1)}$ и (2,2) $T_{B(2,2)}$, мы можем рассчитать так называемую вращательную температуру аммиака [6]:

$$T_{\text{rot}} = -41.5 \ln \left(\frac{-0.282}{\tau_{(1,1)m}} \ln \left(1 - \frac{T_{B(2,2)}}{T_{B(1,1)}} (1 - \exp(-\tau_{(1,1)m})) \right) \right)^{-1} \text{ (K)}. \quad (1)$$

Далее определяются лучевая концентрация аммиака в переходе (1,1) $N_{1,1}$ [7] и полная лучевая концентрация N_{NH_3} [6] в предположении ЛТР:

$$N_{1,1} = 6.6 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \tau_{(1,1)m} \Delta V_{(1,1)} \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (2)$$

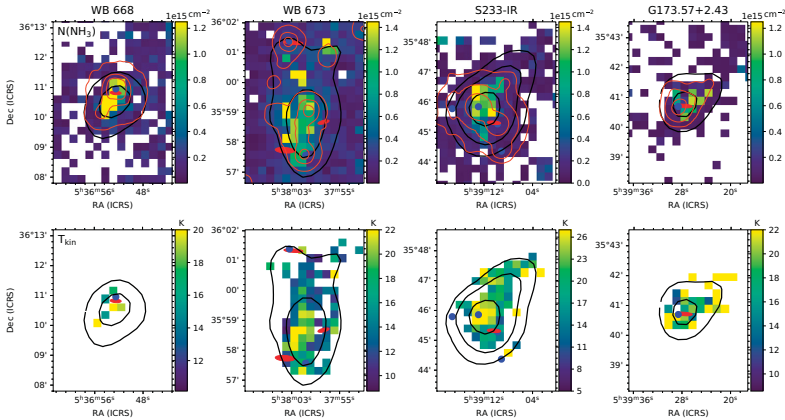
$$N_{\text{NH}_3} = N_{1,1} \left(\frac{\exp(21.3/T_{\text{rot}})}{3} + 1 + \frac{5 \exp(-41.2/T_{\text{rot}})}{3} + \frac{14 \exp(-99.4/T_{\text{rot}})}{3} \right) \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (3)$$

где $\nu_{(1,1)}$ — частота перехода NH_3 (1,1); $\Delta V_{(1,1)}$ — ширина линии. В тех пикселях полученных карт, где линия аммиака в переходе (1,1) оптически тонкая, расчет лучевой концентрации проводился исходя из интегральной интенсивности линии NH_3 (1,1) с учетом приближений из работы [8]:

$$N_{1,1} = 3.3 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \frac{\int T_{1,1} dV}{J(T_{\text{rot}}) - J(T_{\text{bg}})} \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (4)$$

где величина $J(T)$ — эквивалентная температура Рэля—Джинса. Кинетическая температура газа T_{kin} рассчитывается из величины T_{rot} следующим образом [6]:

$$T_{\text{kin}} = \frac{T_{\text{rot}}}{1 - \frac{T_{\text{rot}}}{42} \ln(1 + 1.1 \exp(\frac{-16}{T_{\text{rot}}}))} \text{ (K)}. \quad (5)$$



Карты лучевой концентрации аммиака (вверху) и кинетической температуры газа (внизу) в сгустках волокна WB 673. Черные контуры показывают излучение пыли на 1,1 мм (Bolocam), красные эллипсы — источники ИК-излучения IRAS (эллипс показывает область неопределенности положения), синие кружки — источники MSX

Все сгустки имеют умеренную оптическую толщину $\tau_{(1,1)} < 2$, причем большая оптическая толщина излучения в линии аммиака найдена в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43, что может указывать на большее обилие аммиака в молекулярном газе либо на то, что область, где содержится аммиак, имеет большую протяженность вдоль луча зрения.

Карты лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 представлены на рисунке. В сгустке WB 673 наблюдаются две области с повышенной лучевой концентрацией аммиака: к востоку и северу от пика излучения пыли на 1.1 мм. В остальных сгустках максимум лучевой концентрации наблюдается в направлении пиков излучения пыли на 1.1 мм. Максимальные значения лучевой концентрации аммиака практически одинаковы во всех сгустках волокна. В сгустках WB 673 и S233-IR температура газа T_{kin} повышается в центральных, наиболее плотных направлениях и достигает 27 и 30 К соответственно, в сгустке G173.57+2.43 температура, напротив, повышается на периферии.

В условиях ЛТР и без градиента лучевой скорости две внутренние и две внешние сателлитные линии перехода NH_3 (1,1) будут иметь одинаковую интенсивность. Однако в молекулярных облаках наблюдаются аномалии сверхтонкой структуры, при которых интенсивность сателлитных компонент изменяется [9]. Для обнаружения аномалий мы определили отношения интегральных интенсивностей внутренних (HIA_{IS}) и внешних (HIA_{OS}) сателлитных компонент, как это было сделано, например, в работе [10]. При отсутствии аномалий отношения $\text{HIA}_{\text{IS}} = 1$ и $\text{HIA}_{\text{OS}} = 1$. В WB 673 аномалии сверхтонкой структуры указывают на градиент лучевой скорости вдоль сгустка и его сжатие (HIA_{IS} и $\text{HIA}_{\text{OS}} < 1$), см., например, [10]. В сгустке S233-IR получены значения $\text{HIA}_{\text{IS}} < 1$ и $\text{HIA}_{\text{OS}} > 1$, что может быть интерпретировано в рамках модели сгустка, состоящего из нескольких небольших, неразрешенных пространственно составляющих, см. [9]. Эти отдельные фрагменты излучают в линиях аммиака с шириной линии, близкой к тепловой, а на выходе из-за переизлучения наблюдаются неодинаковые интенсивности сверхтонких компонент. В сгустках WB 668 и G173.57+2.43 показатели аномалий близки к единице.

Заключение

В этой работе представлены результаты наблюдений линий аммиака NH_3 (1,1), (2,2) и (3,3) в молекулярном волокне WB 673: получены карты интегральных интенсивностей линий аммиака в плотных сгустках волокна WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Построено распределение лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа в сгустках. Показано, что максимальные значения лучевой концентрации аммиака практически одинаковы во всех сгустках волокна. Кинетическая температура газа увеличивается в направлении наиболее плотных центральных частей сгустков WB 673 и S233-IR, а в сгустке G173.57+2.43 температура, напротив, увеличивается к периферии. Аномалии сверхтонкой структуры линий аммиака в переходе (1,1) описываются моделью сжатия в центральном сгустке WB 673, а в сгустке S233-IR — моделью сгустка, состоящего из небольших фрагментов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-32-90102.

Библиографические ссылки

- [1] *André P., Di Francesco J., Ward-Thompson D. et al.* From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 27–51. 1312.6232.
- [2] *Inutsuka Shu-ichiro, Inoue Tsuyoshi, Iwasaki Kazunari, Hosokawa Takashi.* The formation and destruction of molecular clouds and galactic star formation. An origin for the cloud mass function and star formation efficiency // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 580. — P. A49. 1505.04696.
- [3] *Bieging John H., Patel Saahil, Peters William L. et al.* The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. V. The Sh2-235 Cloud in CO J=2-1, ^{13}CO J=2-1, and CO J=3-2 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2016. — Vol. 226, № 1. — P. 13.
- [4] *Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M.* Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71, № 2. — P. 208–224. 1605.08917.
- [5] *Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S.* Survey of Molecular Emission Lines in the WB 673 Interstellar Filament // *Astronomy Reports.* — 2020. — Vol. 64, № 5. — P. 394–405.
- [6] *Wienen M., Wyrowski F., Schuller F. et al.* Ammonia from cold high-mass clumps discovered in the inner Galactic disk by the ATLASGAL survey // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 544. — P. A146. 1208.4848.
- [7] *Mangum Jeffrey G., Wootten Alwyn, Mundy Lee G.* Synthesis Imaging of the DR 21 (OH) Cluster. II. Thermal Ammonia and Water Maser Emission // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 388. — P. 467.
- [8] *Mangum Jeffrey G., Shirley Yancy L.* How to Calculate Molecular Column Density // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2015. — Vol. 127, № 949. — P. 266. 1501.01703.
- [9] *Stutzki J., Winnewisser G.* On the interpretation of hyperfine-structure intensity anomalies in the NH_3 (J, K) = (1,1) inversion transition // *Astron. Astrophys.* — 1985. — Vol. 144. — P. 13–26.
- [10] *Zhou Dong-dong, Wu Gang, Esimbek Jarken et al.* NH_3 (1,1) hyperfine intensity anomalies in the Orion A molecular cloud // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 640. — P. A114. 2006.10709.