

Биполярное движение молекулярного вещества в области звездообразования IRAS 22267+6244

А. В. Антюфеев, В. М. Шульга

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: antyuf@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 24 июня 2011 г.

Проведено картографирование области звездообразования большой массы IRAS 22267+6244 в линии молекулы ^{13}CO ($J=1-0$) на частоте 110.2 ГГц. Установлено, что биполярный поток, наблюдавшийся ранее в этом объекте в линиях молекулы ^{12}CO , наблюдается также в линии молекулы ^{13}CO и проявляется в систематическом сдвиге профиля линии с изменением расстояния от центра облака. По излучению молекулы ^{13}CO рассчитаны параметры биполярного потока. Показано, что биполярный поток составляет значительную часть массы молекулярного облака. Установлено, что скорость биполярного потока линейно увеличивается с расстоянием от центрального источника. Сравнение высокоскоростной (^{12}CO) и низкоскоростной (^{13}CO) частей биполярного потока показало, что они имеют сходную морфологию и примерно одинаковую кинетическую энергию. Рассчитаны кинетическая энергия турбулентного движения и энергия связи молекулярного облака и показано, что они сравнимы с энергией биполярного потока.

Ключевые слова: молекулярное облако, биполярный поток

1. Введение

В настоящее время большинство исследований биполярных потоков проводится по спектральным линиям вращательных переходов молекулы ^{12}CO . Такие исследования дают информацию, в основном, о высокоскоростной части биполярных потоков, так как в центральной части спектральной линии молекулы ^{12}CO оптическая толщина очень велика. Для исследования низкоскоростной части биполярного потока используется излучение линий молекул ^{13}CO , CS, C^{18}O и др. В некоторых случаях влияние биполярного потока не только проявляется в изменении формы профиля линии, но и приводит к тому, что средняя скорость плотного ядра облака систематически сдвигается вдоль направления оси потока [1]. Величина этого сдвига намного меньше скоростей, которые используются для изучения потока в линиях молекулы ^{12}CO , и сравнима с наблюдаемой шириной линий исследуемой молекулы.

Предполагается, что биполярные потоки, вызывающие такие сдвиги, являются основным источником образования турбулентностей в ядре облака [2], а в некоторых случаях потенциально могут рассеять молекулярное облако [3].

Число работ, в которых исследуется низкоскоростная часть биполярного потока, заметно меньше, чем число аналогичных исследований, где биполярный поток исследуется по излучению молекулы ^{12}CO . Вместе с тем известно, что игнорирование низкоскоростной части биполярного потока приводит к существенной недооценке основных характеристик биполярных потоков (относительная погрешность может достигать 1000 % при определении массы потока и 100 % при определении энергии потока [1, 3]).

В настоящей работе исследуется низкоскоростная часть биполярного потока в области звездообразования IRAS 22267+6244 в линии молекулы ^{13}CO ($J=1-0$). Этот источник ассоциируется с III областью. Первые признаки

наличия в нем биполярного потока были описаны в работе [4], где было замечено наличие красного крыла в линии молекулы ^{12}CO . В этой области неоднократно проводились поиски мазеров в молекулах H_2O [5], OH [6], NH_3OH [8]. Все поиски мазеров дали отрицательный результат. Плотное ядро облака было картографировано в линиях молекулы NH_3 [8]. В работе [9] получено изображение этого источника в К-диапазоне и обнаружена отражательная туманность. Исследование биполярного потока в области звездообразования IRAS 22267+6244 в линии $J = 2 - 1$ молекулы ^{12}CO приводится в работе [10].

2. Наблюдения

Наблюдения области IRAS 22267+6244 в линии $J = 1 - 0$ молекулы ^{13}CO (110 ГГц) были проведены в октябре 2006 и октябре 2008 гг. на радиотелескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). Картографировалась область размерами $6' \times 12'$. При измерениях использовался высокочувствительный криогенный приемник, в качестве входного элемента которого служил смеситель на диоде с барьером Шоттки. Двухполосная шумовая температура приемника не превышала 100 К [11]. Однополосная шумовая температура системы составляла $500 \div 600$ К в зависимости от погодных условий и угла места источника. Для спектрального анализа принимаемого излучения использовался фурье-спектроанализатор с полосой обзора 14 МГц [12] и спектральным разрешением 112 кГц (0.3 км/с). Наблюдения проводились в режиме “навод–отвод”. Коэффициент использования диаграммы направленности антенны составлял 0.15. Калибровка осуществлялась стандартным методом по черному телу [13].

3. Расчет параметров биполярного потока

Расчет параметров биполярного потока проводился с помощью метода определения низкоскоростных параметров биполярного потока (МНСБП), предложенного в работе [14]. В методе допускается, что молекулярное облако можно разделить на две области: стационарное облако, движение которого носит

турбулентный характер, и биполярный поток. В результате метод дает возможность определить нижний предел основных параметров биполярного потока (массы, импульса и энергии). При расчете этих параметров не делалась поправка на наклон оси биполярного потока к лучу зрения. Температура возбуждения газа ^{13}CO предполагалась равной 30 К [10]. Отношение концентраций молекул H_2 и ^{13}CO полагалось $5 \cdot 10^5$ [15]. Результаты расчетов приведены в табл. 1. Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров биполярного потока, также указаны в табл. 1. Расчет масс стационарного облака и молекулярного облака осуществлялся во всем диапазоне лучевых скоростей, в котором наблюдалось излучение молекулы ^{13}CO (от -5.5 до 2 км/с).

Применяя метод МНСБП к данному потоку, мы учли следующее обстоятельство. Поток в этом облаке обладает столь сильной биполярностью, что предположение, сделанное в методе МНСБП о том, что в диапазоне скоростей, приближенном к центральной скорости, влияние биполярного потока незначительно, оказывается неверным [14]. Поэтому для расчета параметров данного биполярного потока верхним пределом скорости синесмещенного компонента потока и нижним пределом скорости красносмещенного компонента потока считалась центральная скорость стационарного облака.

4. Обсуждение результатов

На рис. 1 показаны карты распределения интегральных интенсивностей красносмещенного (пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 22267+6244 в линии $J = 1 - 0$ молекулы ^{13}CO , полученные интегрированием профиля наблюдаемых линий (рис. 1, а) и с помощью метода МНСБП (рис. 1, б). Точками отмечены позиции, на которых проводились наблюдения. Тонкими линиями показаны контуры по уровням начиная с $2 \text{ К} \cdot \text{км/с}$ с шагом $2 \text{ К} \cdot \text{км/с}$. Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0.5 от максимальных значений. Фонным серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности молекулярного облака (рис. 1, а)

Таблица 1. Параметры биполярного потока и молекулярного облака в области звездообразования IRAS 22267+6244

Молекула	¹³ CO (низкоскоростной компонент)	¹² CO (высокоскоростной компонент)
Масса молекулярного облака, M _☉	781	
Масса стационарного облака, M _☉	187	
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров синесмещенного компонента биполярного потока, км/с	-5.5 ÷ -1.96	-19.9 ÷ -5.6
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров красносмещенного компонента биполярного потока, км/с	-1.96 ÷ 2	1 ÷ 19.8
Масса синесмещенного компонента биполярного потока, M _☉	341	
Масса красносмещенного компонента биполярного потока, M _☉	253	
Масса биполярного потока, M _☉	594	3.8
Импульс биполярного потока, M _☉ · км/с	621	66
Энергия биполярного потока, эрг	9.8 · 10 ⁴⁵	12 · 10 ⁴⁵
Турбулентная кинетическая энергия молекулярного облака, эрг	17 · 10 ⁴⁵	
Энергия связи молекулярного облака, эрг	54 · 10 ⁴⁵	

Примечание. M_☉ – масса Солнца.

и стационарного облака (рис. 1, б). Координаты максимума интегральной интенсивности молекулярного облака находятся в центре биполярного потока, и эта точка в дальнейшем считается центром облака. (Все карты, приведенные в настоящей работе, центрированы относительно координат RA(2000) = 22^h28^m30^s и DEC(2000) = 62°59'00".) Из рис. 1 видно, что облако обладает ярко выраженной биполярностью. Красносмещенный и синесмещенный компоненты полностью разделены на уровне 0.5 от максимальных значений. Это свидетельствует о том, что угол наклона оси биполярного потока к лучу зрения велик. Важной особенностью исследуемого облака является то, что основная его часть участвует в биполярном движении вещества, а масса стационарного облака мала по сравнению с массой биполярного потока (табл. 1). Она составляет лишь 24 % от массы облака. Из рис. 1, б видно, что стационарное облако занимает небольшую часть общего объема молекулярного

облака, а остальная часть принимает участие в движении, вызванном биполярным потоком. В то же время распределение интегральной интенсивности молекулярного облака на рис. 1, а показывает, что основная масса вещества сосредоточена в центре молекулярного облака и биполярный поток не приводит к сильному пространственному перемещению вещества.

Биполярный поток в линии молекулы ¹²CO обычно регистрируется в крыльях линии. Биполярный поток в линии молекулы ¹³CO проявляется в виде сдвига профиля линии вдоль направления оси потока. На рис. 2 приведены усредненные профили линий красносмещенного и синесмещенного компонентов биполярного потока. Усреднение проводилось по точкам, лежащим в пределах контура на уровне 0.5 от максимальных значений на рис. 1, а. Хорошо видно, биполярный поток в линии ¹³CO проявляется как смещение по скорости всего профиля линии без существенного изменения его формы. Профили смещены относительно друг

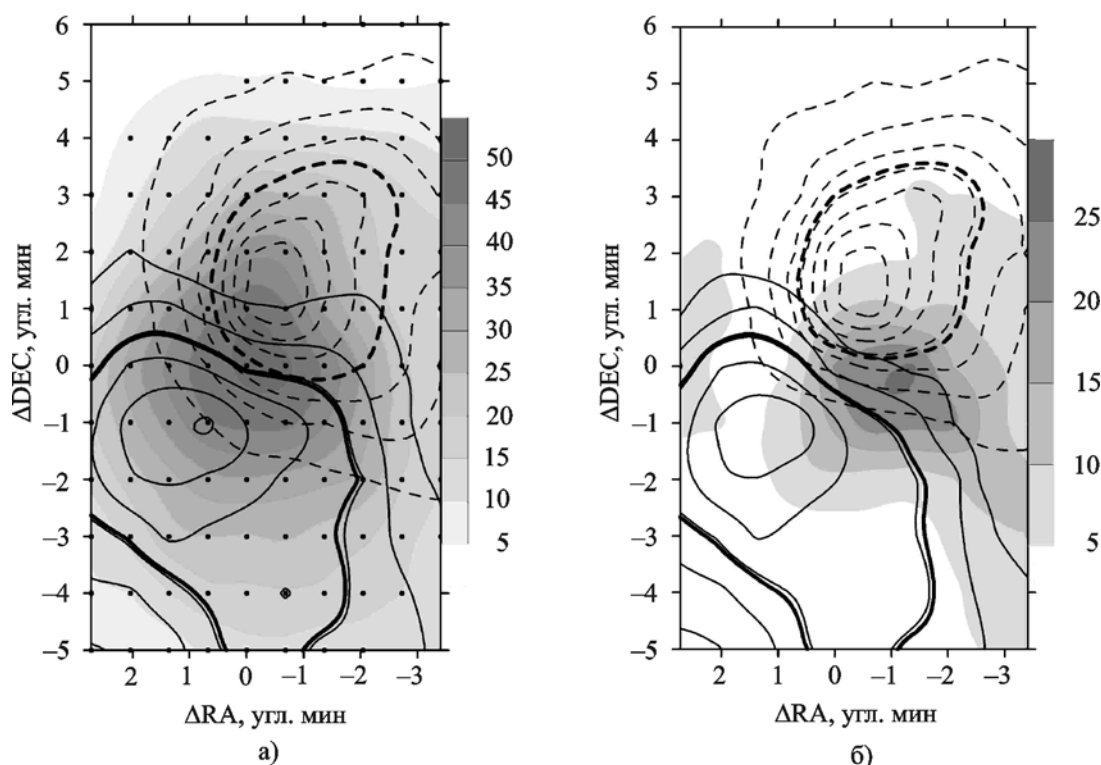


Рис 1. Карты распределения интегральных интенсивностей красномещенного (пунктирная линия) и синемещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 22267+6244 в линии $J = 1-0$ молекулы ^{13}CO , полученные интегрированием профиля наблюдаемых линий (а) и с помощью метода МНСБП (б). Точками отмечены позиции, на которых проводились наблюдения. Тонкими линиями проведены контуры по уровням начиная с $2 \text{ K} \cdot \text{км/с}$ с шагом $2 \text{ K} \cdot \text{км/с}$. Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0.5 от максимальных значений. Фоновым серым цветом (градации серого соответствуют интегральным антенным температурам от 5 до $25 \text{ K} \cdot \text{км/с}$) показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности молекулярного облака (а) и стационарного облака (б)

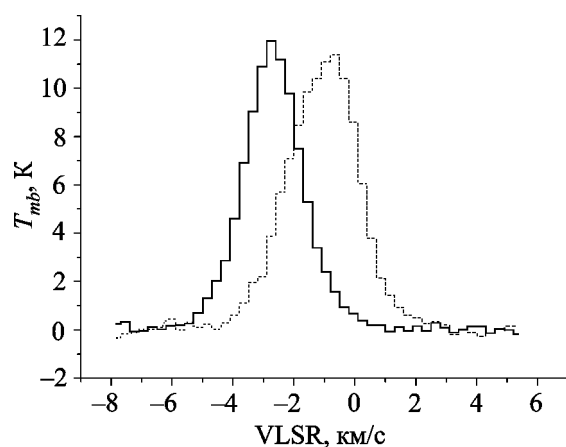


Рис. 2. Усредненные спектры красномещенного (пунктир) и синемещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 22267+6244 (T_{mb} – яркостная температура, VLSR – лучевую скорость)

друга примерно на значение их ширины на уровне 0.5 от максимального значения.

Диаграмма “позиция–скорость”, построенная вдоль оси биполярного потока в области звездообразования IRAS 22267+6244, рассчитанная по профилям наблюдаемых линий, показана на рис. 3, а. Диаграмма отражает высокую степень симметрии, присущую скоростной структуре данного биполярного потока. Следует также отметить систематическое увеличение скорости биполярного потока с расстоянием от центрального источника. Это свойство присуще многим биполярным потокам. Из рис. 3, а видно, что на больших расстояниях от центрального источника скорость биполярного потока приближается к постоянной величине. Но эта диаграмма отражает распределение интенсивности всего молекуляр-

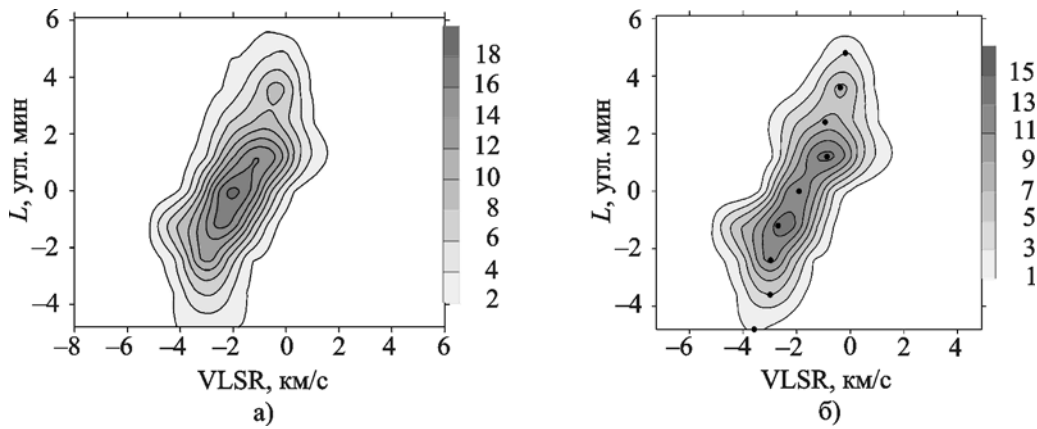


Рис. 3. Диаграмма “позиция–скорость” для области звездообразования IRAS 22267+6244, построенная в направлении оси биполярного потока L (0 соответствует позиции $(0, 0)$ на рис. 1, а), рассчитанная по профилям наблюдаемых линий (а) и с помощью метода МНСБП (б). Точками отмечены позиции центральных скоростей, определенных с помощью аппроксимации профилей линий функцией Гаусса

ного облака, в котором, кроме биполярного потока, содержится излучение стационарного облака. На рис. 3, б построена аналогичная диаграмма “позиция–скорость”, рассчитанная методом МНСБП и соответствующая излучению только биполярного потока. Точками отмечены позиции центральных скоростей, определенных с помощью аппроксимации профилей линий функцией Гаусса. Из рис. 3, б видно, что скорость биполярного потока линейно увеличивается с расстоянием от центрального источника. Наиболее необычной особенностью этих диаграмм можно считать факт почти полного отсутствия излучения на скоростях, соответствующих скорости центра облака, в точках, удаленных от центра облака. Это свидетельствует о том, что почти все вещество, находящееся вблизи оси потока на краях облака, “сметено” и движется вместе с биполярным потоком.

Сравнение высокоскоростной части биполярного потока, определенной из наблюдений линии молекулы ^{12}CO , с нашими данными показало, что положения красномещенных компонентов высокоскоростной (данные линий молекулы ^{12}CO [10]) и низкоскоростной (данные линии молекулы ^{13}CO) части биполярного потока практически совпадают. Значительная часть синемещенного компонента низкоскоростной части биполярного потока лежит юго-восточнее высокоскоростной части. Сравнение пара-

метров биполярного потока в линиях молекул ^{12}CO и ^{13}CO показывает, что масса низкоскоростной части биполярного потока, определенная по линии молекулы ^{13}CO ($J=1-0$), намного больше массы, определенной по наблюдениям линий молекулы ^{12}CO . А их энергии почти равны (см. табл. 1).

Сильные биполярные потоки оказывают мощное воздействие на родительское молекулярное облако. В данном случае, как указано выше, в движении, вызванном биполярным потоком, участвует значительная часть молекулярного облака. С целью найти степень этого влияния, мы оценили кинетическую энергию турбулентного движения и энергию связи молекулярного облака. Расчет производился по методике, изложенной в статье [16]. При этом предполагалось, что молекулярное облако представляет собой шар радиуса $4'$, в котором вещество равномерно распределено по всему объему. Масса молекулярного облака рассчитывалась по излучению молекулы ^{13}CO и составила $781 M_{\odot}$. Ширина линии на уровне половинной мощности вычислялась путем усреднения всех профилей линий по всем наблюдаемым позициям и аппроксимации полученного усредненного профиля линии функцией Гаусса. Ее значение составило 2.9 км/с . Результаты расчетов приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что суммарная энергия высокоскоростной и низкоскоростной частей би-

полярного потока ($21.8 \cdot 10^{45}$ эрг) превышает турбулентную кинетическую энергию молекулярного облака. В то же время энергия биполярного потока меньше, чем энергия связи молекулярного облака. Но, учитывая, что нам известен только нижний предел энергии биполярного потока, и делая поправку на угол между направлением оси потока и лучом зрения, можно утверждать, что при угле 40° , энергия биполярного потока достигнет значения энергии связи молекулярного облака. С учетом морфологии биполярного потока такая возможность представляется вполне вероятной.

Простого сравнения энергий недостаточно для того, чтобы предсказать будущее молекулярного облака. Но можно утверждать, что биполярный поток поставляет в молекулярное облако энергию, сравнимую с турбулентной энергией и энергией связи облака, и может способствовать поддержанию турбулентного движения в облаке и явиться причиной его гравитационной нестабильности в будущем.

5. Выводы

Проведено картографирование области звездообразования большой массы IRAS 22267+6244 в линии молекулы ^{13}CO ($J=1-0$) на частоте 110.2 ГГц. Показано, что в этой линии объект обладает ярко выраженной биполярной структурой, проявляющейся в систематическом сдвиге профиля линии с изменением расстояния от центра облака. Расчеты показали, что значительная часть вещества молекулярного облака находится в движении, вызванном биполярным потоком. Зависимость увеличения скорости биполярного потока с расстоянием от центрального источника носит линейный характер. Отмечено, что почти все вещество, находящееся вблизи оси потока на краях облака, “сметено” и движется вместе с биполярным потоком. Проведено сравнение высокоскоростной (^{12}CO) и низкоскоростной (^{13}CO) частей биполярного потока. Установлено, что они имеют сходную морфологию и сравнимую кинетическую энергию. Рассчитаны кинетическая энергия турбулентного движения и энергия связи молекулярного облака и показано, что они сравнимы с энергией биполярного потока.

Литература

1. Tafalla M. and Myers P. Velocity Shifts in L1228: The Disruption of a Core by an Outflow // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 491, No. 2. – P. 653-662.
2. Myers P., Heyer M., Snell R. and Goldsmith P. Dense cores in dark clouds. V. CO outflow // *Astrophys. J.* – 1988. – Vol. 324, No. 2. – P. 907-919.
3. Arce H. Impact of giant stellar outflows on their clouds // *RevMexAA (Serie de Conferencias)*. – 2003. – Vol. 15. – P. 123-125.
4. Wouterloot J. and Brand J. IRAS sources beyond the solar circle. I. CO observations // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1989. – Vol. 80, No. 2. – P. 149-187.
5. Kazuyoshi S., Takeshi N., Norio I., Satoshi H., Yoshimi K., and Ji Y. Water Maser and Ammonia Survey toward IRAS Sources in the Galaxy. I. H_2O Maser Data // *Publ. Astron. Soc. Japan.* – 2007. – Vol. 59, No. 6. – P. 1185-1219.
6. Edris K., Fuller G., and Cohen R. A survey of OH masers towards high mass protostellar objects // *Astron. Astrophys.* – 2007. – Vol. 465, No. 3. – P. 865-877.
7. Fontani F., Cesaroni R., and Furuya R. Class I and Class II methanol masers in high-mass star-forming regions // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 517, No. 1. – P. 56.
8. Jijina J., Myers P., and Adams F. Dense cores mapped in ammonia: a Database // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1999. – Vol. 125, No. 1. – P. 161-236.
9. Connelley M., Reipurth B., and Tokunaga A. Infrared nebulae around young stellar objects // *Astron. J.* – 2007. – Vol. 133, No. 4. – P. 1528-1559.
10. Kim K. and Kurtz S. Occurrence Frequency of CO Outflows in Massive Protostellar Candidates // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 643, No. 2. – P. 978-984.
11. Piddyachiy V. I., Shulga V. M., Korolev A. M., and Myshenko V. V. High doping density Schottky diodes in the 3mm wavelength cryogenic heterodyne receiver // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2005. – Vol. 26, No. 9. – P. 1307-1315.
12. Антюфеев А., Шульга В. Спектроанализатор на базе персонального компьютера // *Радиотехника.* – 2005. – №10. – С. 145-148.
13. Kutner M. and Ulich B. Recommendations for calibration of millimeter-wavelength spectral line data // *Astrophys. J.* – 1981. – Vol. 250, No. 1. – P. 341-348.
14. Антюфеев А. В., Шульга В. М. Биполярный поток в области звездообразования IRAS 05345+3157 в линии молекулы ^{13}CO // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2011. – Т. 27, №6. – С. 18-30.
15. Dickman R. The ratio of carbon monoxide to molecular hydrogen in interstellar dark clouds // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1978. – Vol. 37, No. 4. – P. 407-427.
16. Arce H. and Goodman A. The Episodic, Precessing Giant Molecular Outflow from IRAS 04239+2436 (HH 300) // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 554, No. 1. – P. 132-151.

**Біполярний рух молекулярної речовини
в області зореутворення
IRAS 22267+6244****О. В. Антюфеев, В. М. Шульга**

Виконано картографування області зореутворення великої маси IRAS 22267+6244 в лінії молекули ^{13}CO ($J=1-0$) на частоті 110.2 ГГц. Встановлено, що біполярний потік, що спостерігався раніше в цьому об'єкті в лініях молекули ^{12}CO , спостерігається також в лінії молекули ^{13}CO і виявляється в систематичному зсуві профілю лінії зі зміною відстані від центру хмари. За випромінюванням молекули ^{13}CO розраховані параметри біполярного потоку. Показано, що біполярний потік становить значну частину маси молекулярної хмари. Встановлено, що швидкість біполярного потоку лінійно збільшується з відстанню від центрального джерела. Порівняння високошвидкісної (^{12}CO) та низькошвидкісної (^{13}CO) частин біполярного потоку показало, що вони мають подібну морфологію та приблизно однакову кінетичну енергію. Розраховані кінетична енергія турбулентного руху та енергія зв'язку молекулярної хмари та показано, що вони порівнянні з енергією біполярного потоку.

**Bipolar Molecular Motion of Matter
in the Star Forming Region
IRAS 22267+6244****A. V. Antyufeyev and V. M. Shulga**

The high-mass star-forming region IRAS 22267+6244 has been mapped in the $J=1-0$ line of ^{13}CO at 110.2 GHz. We have found that the bipolar outflow which had been observed in the line of ^{12}CO in this object, is also observed in the line of ^{13}CO . This outflow is observed as the systematic shift of the line profile accompanied by the change of the distance from the cloud centre. Bipolar outflow parameters have been calculated using the radiation of ^{13}CO molecule. The bipolar outflow constitutes a significant part of the molecular cloud mass. The dependence of the average velocity of the bipolar outflow on distance from the central source appears to be linear. Comparison of the high-velocity (^{12}CO) and low-velocity (^{13}CO) parts of the bipolar outflow shows their similar morphology and comparable kinetic energy. Kinetic energy of the turbulent movement and binding energy of the molecular cloud has been calculated. They are shown to be comparable to the energy of the bipolar outflow.