

УДК 524.6-77

А. В. Антюфеев, В. М. Шульга

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины
ул. Червонопрапорна 4, Харьков, 61002
antyuf@rian.kharkov.ua, shulga@rian.kharkov.ua

**Метод расчета параметров низкоскоростной части
биполярных потоков в массивных областях
звездообразования**

Представлен новый метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков в молекулярных облаках. Метод учитывает все возможные проявления биполярного потока в спектрах линий — асимметрию профилей линий, наличие крыльев линий и систематический сдвиг всего профиля линии вдоль оси потока. Метод адаптирован для расчета параметров слабых биполярных потоков, а также потоков, спектры которых характеризуются малым отношением сигнал / шум. С помощью этого метода рассчитаны параметры биполярных потоков в источнике G122.0-7.1.

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ НИЗЬКОШВИДКІСНОЇ ЧАСТИНИ БІПОЛЯРНИХ ПОТОКІВ У МАСИВНИХ ОБЛАСТЯХ ЗОРЕУТВОРЕННЯ, Антюфеев О. В., Шульга В. М. — Подано новий метод розрахунку параметрів низькошвидкісної частини біполярних потоків в молекулярних хмарах. Метод враховує всі можливі прояви біполярного потоку в спектрах ліній — асиметрію профілів ліній, наявність крил ліній і систематичне зміщення всього профілю лінії уздовж осі потоку. Метод адаптований для розрахунку параметрів слабких біполярних потоків, а також потоків, спектри яких характеризуються малим відношенням сигнал / шум. За допомогою цього методу розраховані параметри біполярних потоків у джерелі G122.0-7.1.

A PROCEDURE FOR CALCULATING LOW-VELOCITY COMPONENTS OF BIPOLAR OUTFLOWS IN MASSIVE STAR FORMING REGIONS, by Antyufeyev A. V., Shulga V. M. — We present a new method for the calculation of parameters of low-velocity components of bipolar outflows

in molecular clouds. The method takes into consideration all possible manifestations of a bipolar outflow in line spectra: asymmetry of line profiles, existence of line wings and systematic shift of the profile along the outflow axis. Our method is adapted for the calculation of parameters of weak bipolar outflows as well as of the outflows whose spectra are characterized by low signal-noise ratio. Using the method, the parameters of bipolar outflows observed in the line of ^{13}CO ($J = 1-0$) molecule in the G122.0-7.1 source are calculated.

ВВЕДЕНИЕ

На самых ранних этапах эволюции протозвезды проходят стадию, на которой они становятся источником мощных движений вещества в родительском облаке, называемых биполярными молекулярными потоками. Эти направленные в противоположные стороны молекулярные потоки присущи почти всем молодым звездным объектам (МЗО). В наблюдаемых спектрах излучения молекул биполярные потоки проявляются в асимметрии профилей линий и появлении крыльев линий. В некоторых массивных источниках наблюдается систематический сдвиг всего профиля линии вдоль направления движения вещества.

Потоки оказывают значительное воздействие на родительское облако в окрестности протозвезды. Степень этого воздействия зависит от массы вовлеченного в движение вещества и его кинетической энергии. Определение этих величин является одной из основных задач при изучении процессов звездообразования. Первые работы по обнаружению и изучению биполярных потоков были выполнены для случая, когда их скорость была значительно больше, чем скорость уширяющего линию излучения турбулентного движения молекулярного вещества в родительском (далее стационарном) облаке. Такие так называемые высокоскоростные биполярные потоки наблюдались в излучении молекулы ^{12}CO . Позже стало известно, что существенный вклад в кинетические характеристики биполярных потоков дают низкоскоростные движения вещества, незначительно отличающиеся по скорости от турбулентных скоростей стационарного облака. Вследствие этого для их изучения использовалось излучение молекул, концентрация которых в облаке, а значит и оптическая толщина молекулярного газа вблизи центра линии, существенно меньше, чем у молекулы ^{12}CO . К таким молекулам относятся молекулы ^{13}CO или CS. При изучении низкоскоростных движений биполярных потоков проблема заключается в том, что в этом диапазоне лучевых скоростей необходимо разделять излучение, связанное с биполярностью, и излучение от окружающего родительского облака.

В работах [5] и [7] центральная область профилей линий исключалась из анализа, а расчет производился только по крыльям линий. В работе [4] усреднялись все спектры, которые наблюдались во всем об-

лаке. Усредненная линия излучения затем аппроксимировалась функцией Гаусса в центральной ее части, где предполагается наличие только излучения окружающего облака. При этом считалось, что эта аппроксимирующая кривая и есть профиль излучения родительского стационарного облака. Массой биполярного потока считается разность масс, вычисленных по усредненному спектру и аппроксимированной кривой.

В работе [11] центральная часть каждого спектра аппроксимировалась функцией Гаусса, и эта аппроксимирующая кривая считалась излучением стационарного облака. Для каждого спектра вычислялась разность масс m_i , рассчитанная по наблюдаемому профилю линии и по аппроксимированному профилю стационарного облака. Сумма m_i считалась массой биполярного потока, где i характеризует распределение потока по молекулярному облаку.

В работе [12] предполагается, что стационарное облако симметрично относительно центра потока. Для разделения вкладов стационарного облака и биполярного потока из синесмещенной (красносмещенной) части каждого спектра вычиталась соответствующая часть спектра, снятого в точке наблюдений, которая симметрично расположена относительно центра биполярного потока. Результат вычитания рассматривался как чистое проявление биполярного потока. Первые три рассмотренных метода не предназначены для учета систематического сдвига всего профиля линии. В последнем методе введено предположение о симметричности стационарного облака относительно центра потока. Это предположение может не выполняться для массивных молодых звездных объектов, в особенности в периферийных областях биполярного потока.

В работе [1] мы представили метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков (МНСБП). Метод учитывает все перечисленные проявления биполярного потока в спектрах линий (асимметрию профилей линий, наличие крыльев линий и систематический сдвиг всего профиля линии). Метод предполагает, что распределение скоростей в стационарном облаке является максвелловским, а биполярный поток имеет произвольную морфологию. Ниже мы развиваем метод МНСБП для изучения низкоскоростных биполярных потоков, оптимизируя его для определения параметров биполярных потоков в МЗО, где систематический сдвиг профиля линий выражен слабо. При этом метод также модифицирован для случаев с небольшим отношением сигнал-шум, что часто имеет место в наблюдаемых спектрах.

В методе МНСБП предполагается, что родительское молекулярное облако состоит из стационарного облака и биполярного потока. При расчете спектра стационарного облака требуется выполнение условий

$$T_{mb}^{b_0} d \frac{1}{\frac{b}{b_1}} T_{mb}$$

и

$$T_{mb}^{bo} d = \frac{1}{r^1 - r} T_{mb},$$

где b^1, b — нижний и верхний пределы скорости синесмещенной части потока, r, r^1 — нижний и верхний предел скорости красносмещенной части потока, T_{mb} — среднее квадратичное отклонение наблюдаемой яркостной температуры, величина T_{mb}^{bo} — рассчитанная яркостная температура биполярного потока (формула (5) работы [1]). Такой подход дает удовлетворительное решение в большинстве случаев. Но при сильной зашумленности или изрезанности спектра несколько последовательных значений величины T_{mb}^{bo} могут принимать отрицательные значения, величина которых зависит от T_{mb} . При небольших величинах шума T_{mb} этот эффект слабо влияет на величину определяемых массы и кинетической энергии биполярного потока. Но он приводит к значительной ошибке при плохом отношении сигнал шум. В модифицированном методе влияние зашумленности сведено к минимуму. Это дает возможность рассчитывать параметры биполярных потоков в МЗО, у которых систематический сдвиг профиля линий мал и масса потока мала.

АЛГОРИТМ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ЧАСТИ БИПОЛЯРНЫХ ПОТОКОВ

Метод использован нами для расчета массы, импульса и энергии биполярных потоков по наблюдательным данным картографирования молекулярного облака в линии молекулы ^{13}CO ($J = 1-0$). Предполагается, что молекулярное облако состоит из стационарного облака и биполярного потока. Для каждой точки наблюдения с координатами α и δ рассчитываются спектры стационарного облака и спектры, соответствующие биполярному потоку, и затем по ним определяются параметры биполярного потока.

При этом используются следующие допущения:

- температуры возбуждения стационарного облака и биполярного потока считаются одинаковыми и постоянными во всем МЗО;
- рассчитывается нижний предел параметров биполярного потока.

Первое допущение накладывает ограничение на максимальную величину интенсивности излучения стационарного облака. Она не может быть больше интенсивности излучения молекулярного облака. А из второго допущения следует, что интенсивность излучения стационарного облака должна быть максимально возможной. При таких допущениях и при отсутствии шумов профиль линии излучения стационарного облака должен касаться в некоторой области лучевых скоростей профиля линии молекулярного облака. В действительности спектр «загрязнен» шумами, которые возникают в атмосфере и в приемной аппаратуре. Естественно, необходимо минимизировать влияния шумов на точность определения массы и энергии биполярных потоков.

В модернизированном МНСБП используется следующий подход к описанию стационарного облака. Профиль линии излучения стационарного облака, в каждой точке наблюдений с координатами λ и ν можно представить в виде [9]

$$T_{mb}^s(\lambda, \nu, \nu_0, \nu_s) = (J(T_{ex}) - J(T_{bg})) (1 - \exp(-\tau_s)) \exp(-\tau_0), \quad (1)$$

$$\tau_s = \exp(-4 \ln(2) \frac{\nu - \nu_0}{\nu_s}),$$

$$J(T) = 5.29 / (\exp(5.29/T) - 1),$$

где ν_0 — центральная скорость стационарного облака, ν_s — ширина линии на уровне половинной мощности.

Поскольку молекулярное облако состоит из стационарного облака и биполярного потока, то и масса биполярного потока, рассчитанная в определенном диапазоне лучевых скоростей, равна разности масс молекулярного и стационарного облака, рассчитанных в том же диапазоне лучевых скоростей. На этом положении основан пересчет спектра биполярного потока из спектра стационарного облака, используемый в модернизированном МНСБП. Особенности алгоритма расчета параметров биполярного потока по известным спектрам биполярного потока описаны в работе [1].

В работе [1] значения ν_0 и ν_s определялись из спектров, которые расположены в окрестности биполярного потока. В модернизированном методе такой подход применяется для поиска начальных приближений ν_0 и ν_s . Окончательные их значения рассчитываются, исходя из следующих положений. Предполагается, что величина ν_0 одинакова во всем молекулярном облаке и определяется исходя из минимума рассчитываемой массы биполярного потока, при этом оставаясь в пределах своей погрешности. ν_s может изменяться от спектра к спектру и определяется исходя из минимума рассчитываемой массы биполярного потока. Алгоритм определения ν_0 и ν_s приведен ниже.

Таким образом, алгоритм модернизированного МНСБП можно разбить на две части. В первой части вычисляется оптическая толщина τ_s стационарного облака и масса m биполярного потока для спектра, снятого в точке с координатами λ и ν , при фиксированных значениях ν_0 и ν_s . Во второй части с использованием условия минимума массы m рассчитываются окончательные значения ν_0 и ν_s , спектры стационарного облака и биполярного потока и параметры биполярного потока.

Вычисление параметров биполярного потока при фиксированных значениях ν_0 и ν_s . Как видно из формулы (1), при фиксированных ν_0 и ν_s для определения спектра стационарного облака и параметров биполярного потока необходимо определить только величину τ_s . Исходя из допущений, приведенных выше, для каждого спектра в точке наблюдения λ и ν применяется итерационный алгоритм, цель

которого найти максимально возможное положительное значение s , при котором для всех рассчитанных $T_{mb}^{bo}(\nu)$ для b_1 и r_1 выполняется одно из условий

$$T_{mb}^{bo}(\nu, s, 0, \nu) \geq T_{mb}(\nu) - e T_{mb},$$

$$T_{mb}^{bo}(\nu, s, 0, \nu) \geq T_{mb} T_{mb},$$

где $T_{mb}(\nu)$ — яркостная температура молекулярного облака (в экспериментально полученных спектрах), T и e — коэффициенты, которые определяют массив спектральных каналов, участвующих в аппроксимации исходного спектра и окончательном определении s .

Первое условие является вспомогательным, но оно определяет массив значений яркостных температур для нахождения искомого s с использованием второго условия. На рис. 1 показан характерный вид экспериментально полученного спектра молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия) и три рассчитанных методом МНСБП [1] спектра биполярного потока $T_{mb}^{bo}(\nu)$ при $T = 0.2$ (точки), $T = 1$ (квадраты) и $T = 3$ (треугольники). Для $e = 1$ обозначен интервал лучевых скоростей, в котором первое условие не выполняется, и искомое s определяется вторым условием. Исследование зависимости рассчитываемой массы биполярного потока от e показало, что при $e = 0.5$ масса биполярного потока слабо зависит от e . В расчетах e принималось равной 1.

Из рис. 1 видно, что в интервале наблюдаемых лучевых скоростей в $T_{mb}^{bo}(\nu)$ можно выделить сигнал от биполярного потока и базовую линию. Базовая линия на интервале должна иметь математическое ожидание равно нулю, такое же, как и вне этого диапазона. Количество спектральных каналов в базовой линии обозначим как n . Второе условие основано на предположении, что T_{mb}^{bo} не может быть меньше значения $T T_{mb}$ и описывает уровень базовой линии спектра излуче-

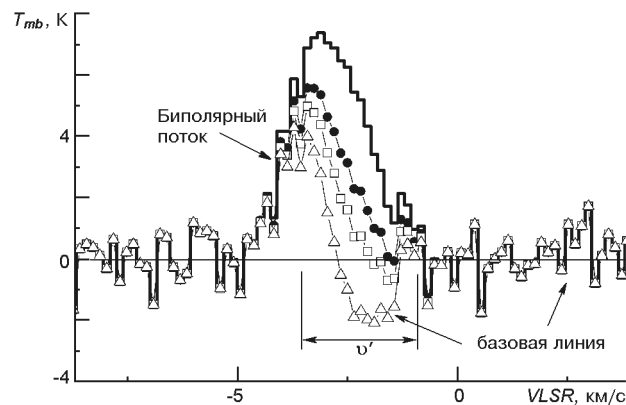


Рис. 1. Наблюдаемый спектр линии ^{13}CO ($J = 1-0$) в одной из точек молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия) и три рассчитанных методом МНСБП спектра биполярного потока $T_{mb}^{bo}(\nu)$ при $T = 0.2$ (точки), $T = 1$ (квадраты) и $T = 3$ (треугольники)

ния биполярного потока T_{mb}^{bo} внутри интервала T_{mb} . При увеличении T_{mb} базовая линия T_{mb}^{bo} изгибается и опускается в область отрицательных значений (рис. 1). Очевидно, что для T_{mb} существует некий оптимум, при котором математическое ожидание базовой линии T_{mb}^{bo} внутри интервала T_{mb} приближается к нулю. Этот оптимум достигается при выполнении следующего условия: вероятность P_1 того, что n последовательных значений яркостной температуры в базовой линии T_{mb}^{bo} имеют значения выше, чем T_{mb} , должна быть равна вероятности того, что хотя бы одно из этих значений менее T_{mb} . А так как эти два события составляют полную группу событий, то $P_1 = 0.5$. Наблюдательные спектры в областях лучевых скоростей, где нет сигнала, могут быть интерпретированы как дискретный шумовой сигнал. Исследование характеристик этого сигнала показало, что плотность распределения вероятности шума близка к нормальной плотности вероятности. Следовательно, вероятность выпадения одного значения яркостной температуры в диапазоне от T_{mb} до $T_{mb} + \Delta T$ равна

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx.$$

В предположении о независимости детектирования сигнала в каждом спектральном канале спектроанализатора вероятность того, что n последовательных значений яркостной температуры имеют значения выше, чем T_{mb} , равна $P_1 = p^n = 0.5$. Решение этого уравнения дает зависимость $T_{mb}(n)$, которая показана на рис. 2. На практике базовая линия наблюдается в нескольких спектральных каналах, и их число может изменяться от спектра к спектру.

Таким образом, можно утверждать, что величина T_{mb} должна быть порядка 1. На данном этапе для каждого спектра, наблюдаемого в точке T_{mb} и $T_{mb} + \Delta T$, проводится расчет T_{mb}^{bo} и спектра биполярного потока $T_{mb}^{bo}(T_{mb})$ для $T_{mb} = 1$ и $T_{mb} = 1 + \Delta T$.

Неопределенность в T_{mb} , описанная выше, может являться причиной погрешности полученных параметров биполярного потока. Для уменьшения этой погрешности дальнейший алгоритм метода МНСБП строится таким образом, чтобы конечный результат (в данном случае

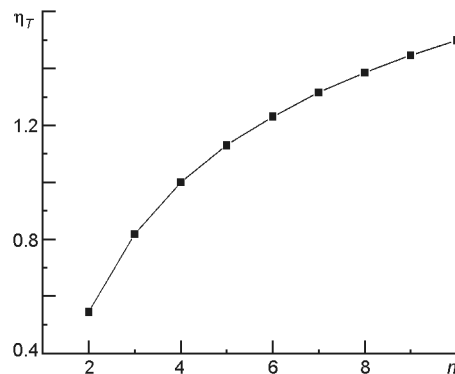


Рис. 2. Зависимость оптимального коэффициента T_{mb} от количества n спектральных каналов в базовой линии $T_{mb}^{bo}(T_{mb})$, находящихся в диапазоне

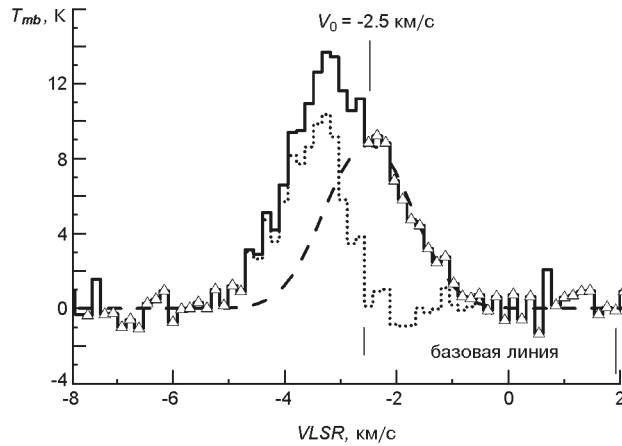
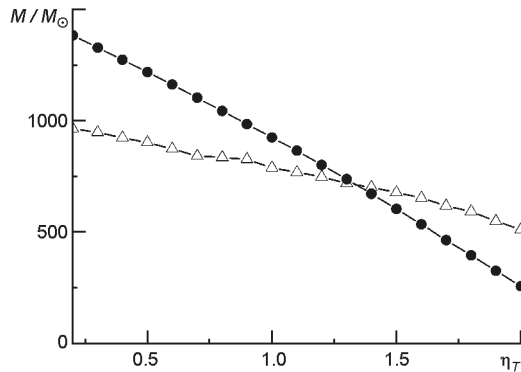


Рис. 3. Спектр линии ^{13}CO ($J = 1-0$) в одной из точек молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия), спектр стационарного облака, полученный с помощью метода наименьших квадратов (штриховая линия), спектр биполярного потока (пунктир); треугольники — значения $T_{mb}(v_i)$ исходного спектра молекулярного облака, которые участвуют при определении спектра стационарного облака

масса биполярного потока) не зависел (или почти не зависел) от T . Для этого окончательные значения s ищутся с помощью метода наименьших квадратов. Вначале определяется массив данных лучевых скоростей v_i , которые участвуют при определении s . В этот массив включаются те спектральные каналы, в которых найденные выше значения яркостных температур биполярного потока подчиняются условию $T_{mb}^{bo}(v_i) < 2 T_{mb}$. Затем значения экспериментально полученных спектров молекулярного облака, соответствующие массиву v_i , используются для вычисления окончательного значения s с помощью метода наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующей функции используется функция (1), с единственным неизвестным параметром s . На основе найденного s рассчитываются спектры стационарного облака и биполярного потока. На рис. 3 показаны спектр линии ^{13}CO ($J = 1-0$) в одной из точек молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия), спектр стационарного облака, (штриховая линия) и результирующий спектр биполярного потока (пунктир). Треугольниками показаны $T_{mb}^{bo}(v_i)$, которые участвовали в формировании спектра стационарного облака. При расчетах предполагалось, что $v_0 = 2.5$ и $\sigma = 1.7$. Вертикальными линиями показан участок базовой линии биполярного потока. Видно, что она параллельна оси лучевой скорости V_{LSR} , и ее математическое ожидание близко к нулю. Расчет массы биполярного потока по известным спектрам биполярного потока проводится по алгоритму, описанному в работе [1].

При таком подходе рассчитанная масса молекулярного потока значительно меньше зависит от T , чем в решении, полученном без применения метода наименьших квадратов. Это видно из рис. 4, где

Рис. 4. Зависимость массы биполярного потока МЗО IRAS 05345+3157 от η_T : треугольники — масса биполярного потока, рассчитанная с применением метода наименьших квадратов для поиска окончательных значений η_T^s , точки — без применения



приведена зависимость массы биполярного потока МЗО IRAS 05345+3157 от η_T . Треугольниками обозначена масса биполярного потока, рассчитанная с использованием метода наименьших квадратов для поиска окончательных значений η_T^s , точками — без его применения.

Определение значений η_0 и η_T и расчет параметров биполярного потока. Значения величин η_0 и η_T рассчитываются исходя из минимума массы биполярного потока. При этом не накладывается никаких ограничений относительно величины η_T , и она определяется отдельно для каждого спектра. Поскольку одним из основных назначений этого метода является расчет параметров биполярного потока МЗО, в котором есть систематический сдвиг всего профиля линии, предполагается, что η_0 одинакова во всем молекулярном облаке и может изменяться только в пределах своей погрешности. Поскольку новый алгоритм более устойчив к шумам, содержащимся в экспериментально полученных спектрах, то верхним пределом скорости синесмещенного компонента и нижним пределом скорости красносмещенного компонента потока принимается η_0 .

Алгоритм метода расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков следующий. Строятся карты интегральных интенсивностей красносмещенной и синесмещенной частей молекулярного облака и определяются точки, не принадлежащие биполярному потоку. Профили линий в этих точках аппроксимируются функцией (1) методом наименьших квадратов и рассчитываются усредненные по этим точкам величины $\overline{m_0}$ и $\overline{m_T}$, а также среднее квадратичное отклонение σ_0 величины $\overline{m_0}$. С использованием методики расчетов массы биполярного потока для каждого спектра, описанной выше, и условия минимума массы биполярного потока рассчитываются окончательные значения η_0 и η_T . При этом η_0 рассчитывается отдельно для каждого спектра, и в качестве критерия используется минимум массы биполярного потока m , которая определяется для одного спектра. Расчет η_0 осуществляется методом равномерного поиска. Центральная скорость η_0 стационарного облака считается одинаковой для всего облака, и в качестве критерия используется минимум суммы m по всем координатам x и y , соответствующим биполярному потоку.

Область определений для θ не ограничивается. Диапазон, в котором рассчитывается θ , ограничен значениями θ_0^- , $\theta_0/2$ и θ_0^+ + $\theta_0/2$. По известным θ_0^- , $\theta_0/2$ и θ_0^+ рассчитываются спектры стационарного облака и биполярного потока.

Расчет параметров биполярного потока по известным спектрам биполярного потока проводится по алгоритму [1].

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ПОТОКА В ИСТОЧНИКЕ G122.0-7.1 С ПОМОЩЬЮ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МНСБП

Модернизированный МНСБП применялся для расчета параметров биполярного потока в области звездообразования G122.0-7.1. Эта область в окрестности инфракрасного источника IRAS 0042+5530 является областью звездообразования, в которой наблюдается несколько звезд спектрального класса B5 [10]. Область в окрестности IRAS 0042+5530 картографировалась в линиях CS (3-2), ^{13}CO (2-1) C18O (2-1) C34S (3-2) [6], CO(2-1), C18O (2-1), CS (5-4) [8]. Были также проведены континуальные наблюдения в диапазонах длин волн 3.6 см, 3.4 мм, 850 мкм [8]. В основном эти исследования были проведены только в небольшой части молекулярного облака, связанного с IRAS 0042+5530. В работе [3] это облако было картографировано в линиях ^{12}CO (1-0) и ^{13}CO (1-0) на площади 15×9 . При увеличении области исследований в этом молекулярном облаке было обнаружено наличие двух плотных областей звездообразования (ASO1 и ASO2).

В ASO1 биполярный поток наблюдался в линии ^{12}CO [3, 13]. Параметры высокоскоростной части биполярного потока определялись из наблюдений линий ^{12}CO ($J = 2-1$) и ^{12}CO ($J = 1-0$). Полученные массы биполярного потока составили $46.9M_{\odot}$ и $939M_{\odot}$. Такая разница масс объясняется тем, что в работе [3] учитывается оптическая толщина в линии молекулы ^{12}CO . Биполярный поток в линии ^{13}CO был обнаружен в работе [3]. В данной работе эти наблюдательные данные использовались для проведения расчета параметров низкоскоростной части биполярного потока в объектах ASO1 и ASO2. При расчете не делалась коррекция на наклон оси биполярного потока к лучу зрения. Температура возбуждения газа ^{13}CO определялась из наблюдений оптически толстой линии ^{12}CO , и ее значение составляло 20 К. При расчете использовалось кинематическое расстояние до облака 7.7 кпк [6]. Кинетическая энергия и энергия связи молекулярного облака определялись по методике, изложенной в работе [2]. Результаты расчетов приведены в таблице.

Характер излучения линий ^{12}CO и ^{13}CO в объектах ASO1 и ASO2 различен. В объекте ASO1 линии более широкие, чем в ASO2. Биполярный поток в объекте ASO1 проявляется в основном в крыльях линий ^{12}CO . В ASO2 биполярный поток наблюдается в линии ^{13}CO как смещение всего профиля линий.

Параметры биполярных потоков ASO1 и ASO2 в объекте G122.0-7.1

Параметр	ASO1	ASO2
Масса молекулярного облака, M_{\odot}	11000	8900
Масса стационарного облака, M_{\odot}	8900	6500
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров синесмещенного компонента биполярного потока, км/с	-53...-51.4	-53...-51.4
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров красносмещенного компонента биполярного потока, км/с	-51.4...-49	-51.4...-49
Масса синесмещенного компонента биполярного потока, M_{\odot}	1300	1300
Масса красносмещенного компонента биполярного потока, M_{\odot}	960	1100
Масса биполярного потока, M_{\odot}	2200	2400
Импульс биполярного потока, M_{\odot} км/с	2000	1600
Энергия биполярного потока, 10^{39} Дж	2.1	1.5
Турбулентная кинетич. энергия молекулярного облака, 10^{39} Дж	7.2	5.7
Энергия связи молекулярного облака, 10^{39} Дж	94	90

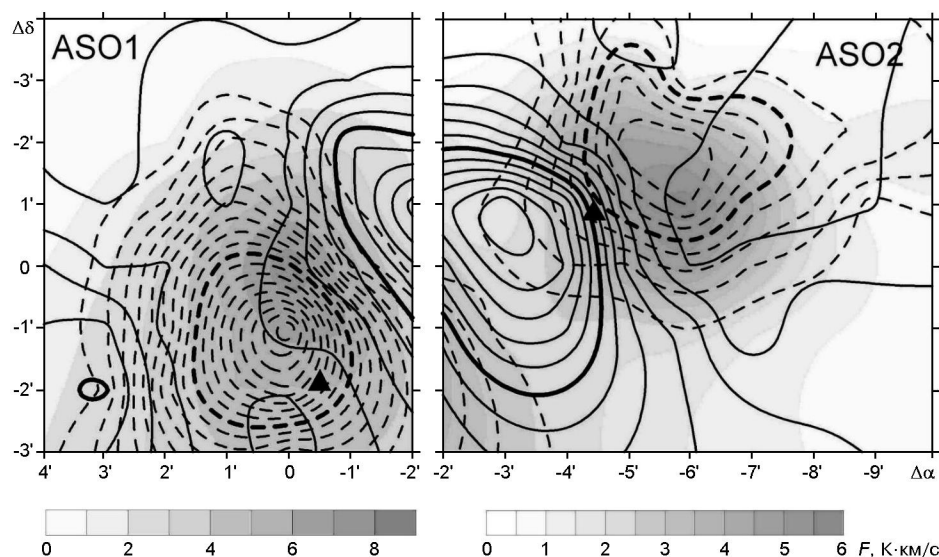


Рис. 5. Карта распределения интегральных интенсивностей F красносмещенного (штриховая линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярных потоков в объектах ASO1 и ASO2 в линии $J = 1-0$ молекулы ^{13}CO , полученные с помощью модернизированного МНСБП. Тонкие изолинии проведены с шагом 2 К км/с начиная с 0 К км/с; жирные линии — уровень $0.5F_{\text{max}}$. Градации серого — распределение рассчитанной интегральной интенсивности F стационарного облака; треугольник — максимум излучения континуального излучения на частоте 4850 МГц в объекте ASO2

Карта распределения интегральных интенсивностей F красносмещенного (пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярных потоков в объектах ASO1 и ASO2 в линии $J = 1-0$ молекулы ^{13}CO , полученные с помощью модернизированного МНСБП, показана на рис. 5. Тонкими изолиниями показаны уровни начиная с 0 с шагом 2 К км/с. Толстыми линиями показаны уровни $0.5F_{\text{max}}$. Фоновым серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности стационарного облака. Треугольником показан максимум континуального излучения на частоте

4850 МГц. Карты центрированы относительно источника IRAS 0042+5530 с координатами $_{(1950)} = 00^h42^m05.0^s$ и $_{(1950)} = 55\ 31\ 00$.

Сравнение карт биполярного потока в линиях ^{12}CO и ^{13}CO в объекте ASO1 показывает, что положение красномещенного компонента в этих линиях практически совпадает. Синемещенный компонент, определенный по излучению линии ^{13}CO , расположен северозападнее, чем синемещенный компонент, определенный по излучению линии ^{12}CO . Масса биполярного потока, определенного по линиям $J = 1-0$ молекул ^{12}CO [3] и ^{13}CO составляет примерно 30 % от массы всего молекулярного облака. При этом значительная часть массы ($\sim 10\%$) составляет высокоскоростную часть потока.

Суммарная энергия биполярного потока, определенная из наблюдений линий ^{12}CO [3] и ^{13}CO (данная работа) составляет $7.6 \cdot 10^{39}$ Дж. Эта величина сравнима с турбулентной кинетической энергией молекулярного облака (таблица). Энергия биполярного потока намного меньше энергии связи молекулярного облака ($9.4 \cdot 10^{40}$ Дж). Соотношение этих энергий указывает на то, что этот биполярный поток не обладает потенциалом, способным рассеять молекулярное облако.

В объекте ASO2 в профилях линий ^{12}CO отсутствуют крылья линий. Тем не менее, мы предполагаем, что излучение в линии ^{13}CO свидетельствует о наличии биполярного потока. Основным при этом является обнаруженный сдвиг линий излучения, величина которого увеличивается к его границе. Это наблюдается в биполярных потоках в ряде объектов при формировании массивных звезд [1, 2, 11, 12]. Кроме того, ASO2 располагается в области звездообразования и находится вблизи ядра, о чем свидетельствует также, как и в случае с ASO1, максимум континуального излучения на частоте 4850 МГц. Его положение почти совпадает с максимумом интегральной интенсивности излучения молекулы ^{13}CO .

Масса биполярного потока объекта ASO2, определенного по линиям $J = 1-0$ молекул ^{13}CO составляет 27 % от массы всего молекулярного облака. Энергия биполярного потока ($1.5 \cdot 10^{39}$ Дж) намного меньше турбулентной кинетической энергии ($5.7 \cdot 10^{39}$ Дж) и энергии связи молекулярного облака ($9 \cdot 10^{40}$ Дж). Следовательно, этот поток на данном этапе не может способствовать поддержанию турбулентного движения в облаке и быть причиной его гравитационной неустойчивости в будущем.

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ И ЭНЕРГИИ БИПОЛЯРНОГО ПОТОКА В ОБЪЕКТЕ ASO1, ВЫЗВАННАЯ НАЛИЧИЕМ ШУМОВ В СПЕКТРАХ

Погрешность, которая вызвана шумами в наблюдаемых спектрах в каждой точке с координатами α и δ , можно определить, сравнивая рассчитанные с их помощью параметры биполярных потоков с парамет-

рами, найденными с использованием спектров, в которых шум пренебрежимо мал. Поскольку уменьшить шум в экспериментальных спектрах нельзя, предлагается в качестве последних использовать усредненные спектры.

Молекулярное облако делится на три области — область, в которой доминирует красносмещенный компонент биполярного потока, область, в которой доминирует синесмещенный компонент биполярного потока, и оставшаяся часть облака. Все спектры, относящиеся к каждой области, суммируются, и тем самым определяются усредненные спектры. Усредненные спектры обладают низкими по сравнению с исходными спектрами шумами.

Ко всем трем спектрам добавляется смоделированный шумовой сигнал с такой же, как и для наблюдаемых сигналов, нормальной плотностью вероятности. Выбираемая величина среднее квадратичного отклонения смоделированного шума была существенно больше, чем среднее квадратичное отклонение усредненных спектров. Затем рассчитывается среднее квадратичное отклонение σ_a суммарных спектров (антенных температур). По этим спектрам для каждого значения σ_a с применением метода МНСБП вычисляются массы M_K и энергии E_K биполярного потока. Для уменьшения погрешности вычислений, связанной с конкретной реализацией добавляемого шума, эти расчеты проводятся статистически обоснованное число раз.

Таким образом, для каждого σ_a определяются ряд значений массы M_K и энергии E_K биполярного потока. Затем рассчитываются статистические характеристики этих рядов — математические ожидания \bar{M}, \bar{E} , средние квадратичные отклонения σ_M, σ_E и относительные погрешности $\delta_M = \sigma_M / \bar{M}$ и $\delta_E = \sigma_E / \bar{E}$.

На рис. 6 показаны зависимости относительной погрешности массы δ_M (точки) и энергии δ_E (треугольники) биполярного потока от среднего квадратичного отклонения антенной температуры σ_a . Среднее квадратичное отклонение каждого из трех усредненных спектров равно 0.1 К, что значительно меньше, чем среднее квадратичное отклонение смоделированного шума. Средняя величина среднего квадратичного отклонения наблюдаемых спектров в объекте ASO1 равна $\sigma_a = 0.26$ К. Из рис. 6 видно, что при $\sigma_a = 0.26$ К применение модернизированного МНСБП приводит к относительным погрешностям около 15 % массы и 20 % энергии биполярного потока.

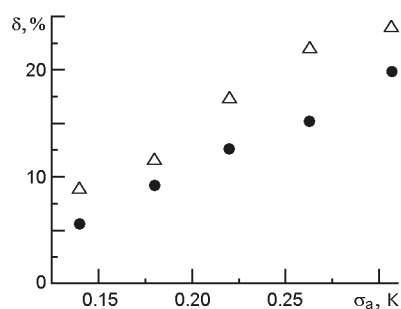


Рис. 6. Зависимости относительной погрешности массы M (точки) и энергии E (треугольники) биполярного потока от среднего квадратичного отклонения антенной температуры σ_a

ВЫВОДЫ

При определении массы и энергии биполярных потоков одной из самых сложных задач использования наблюдательных данных является учет низкоскоростных компонентов, которые трудно выделить в наблюдаемых данных из-за близости их величины к скоростям флуктуационных движений в облаке и возможных систематических перемещений молекулярного вещества. Вместе с тем именно они могут давать основной вклад в массу и энергию биполярных потоков.

В работе описан новый метод расчета параметров биполярного потока в областях звездообразования в массивных молекулярных облаках. Основываясь на данных картографирования молекулярного облака, он учитывает все возможные характерные особенности спектров излучения молекул в биполярных потоках: асимметрию профиля линий, крылья и систематический сдвиг вдоль направления молекулярных потоков. Метод позволяет определить массу и энергию всего облака в целом и его синесмещенного и красносмещенного биполярных компонентов.

С помощью модернизированного МНСБП рассчитаны параметры биполярных потоков в области звездообразования G122.0-7.1. Следует отметить, что с учетом низкоскоростных компонентов масса обоих биполярных потоков в G122.0-7.1 достигают несколько тысяч масс Солнца, что составляет примерно 30 % массы всего родительского облака.

Мы проанализировали влияние шумов на точность определения массы и энергии. Для случая молекулярного облака G122.0-7.1, использованного для демонстрации возможностей разработанного метода, при значении средних квадратичных отклонений сигнала из-за шумов (RMS) в наблюдаемых спектрах 0.26 К ошибка оценок массы биполярного потока составляет 15 %, а энергии — 20 %.

1. *Antyufeyev A. V., Shulga V. M.* Bipolar outflow in the vicinity of IRAS 05345+3157 in ^{13}CO line // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2011.—**27**, N 6.—P. 282—290.
2. *Antyufeyev A. V., Shulga V. M.* Bipolar molecular outflows in the star forming region IRAS 22267+6244 // *RadioPhysics RadioAstronomy.*—2012.—**3**, N 1.—P. 27.
3. *Antyufeyev A., Toriseva M., Shulga V.* Large-scale mapping of the IRAS 0042 + 5530 region in the ^{12}CO (J = 1-0) and ^{13}CO (J = 1-0) molecular lines // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2008.—**24**, N 5.—P. 229—235.
4. *Arce H., Goodman A.* The episodic, precessing giant molecular outflow from IRAS 04239+2436 (HH 300) // *Astrophys. J.*—2001.—**554**, N 1.—P. 132—151.
5. *Arce H., Sargent A.* Outflow-infall interactions in early star formation and their impact on the mass-assembling process in L1228 // *Astrophys. J.*—2004.—**612**, N 1.—P. 342—356.
6. *Brand J., Cesaroni R., Palla F., Molinari S.* A molecular-line study of clumps with embedded high-mass protostar candidates // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**370**.—P. 230—264.

7. *Gomez J. F., Torrelles J. M., Estrella R., et al.* On the nature of the bipolar molecular outflow in AFGL 437 // *Astrophys. J.*—1992.—**397**, N 2.—P. 492—499.
8. *Jenness T., Scott P. F., Padman R.* Studies of embedded far infrared sources in the vicinity of H₂O masers. I. Observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—**276**, N 3.—P. 1024—1040.
9. *Martin H. M., Hills R. E., Sanders D. B.* CO emission from fragmentary molecular clouds. A model applied to observations of M17 SW // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1984.—**208**.—P. 35—55.
10. *Neckel T., Staude H. J.* A survey of bipolar and cometary nebulae — Photographic and photometric observations // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**131**, N 2.—P. 200—209.
11. *Tafalla M., Bachiller R., Wright M. C. H., Welch W. J.* A Study of the mutual interaction between the Monoceros R2 outflow and its surrounding core // *Astrophys. J.*—1997.—**474**, N 1.—P. 329—345.
12. *Tafalla M., Myers P.* Velocity Shifts in L1228: The disruption of a core by an outflow // *Astrophys. J.*—1997.—**491**, N 2.—P. 653—662.
13. *Zhang Qizhou, Hunter T. R., Brand J., et al.* Search for CO outflows toward a sample of 69 high-mass protostellar candidates. II. Outflow properties // *Astrophys. J.*—2005.—**625**, N 2.—P. 864—882.

Статья поступила в редакцию 25.07.13