

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Радіоастрономічний інститут

УДК 524.6-77

Антюфєєв Олександр Валерійович

Біполярні молекулярні потоки в областях
зореутворення IRAS 05345+3157,
IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Радіоастрономічному інституті Національної Академії наук України.

Науковий керівник:

академік НАН України
доктор фізико-математичних наук, професор,
Шульга Валерій Михайлович,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
завідувач відділу міліметрової радіоастрономії.

Офіційні опоненти:

член-кор. НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор,
Пілюгін Леонід Степанович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України
завідувач лабораторією фізики галактик з активним
зореутворенням;

доктор фізико-математичних наук, професор
Захожай Володимир Анатолійович,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
професор кафедри астрономії та космічної інформатики.

Захист відбудеться « » _____ 2015 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, за адресою: 61022, м. Харків, пл. Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розісланий « » _____ 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю. В. Аркуша

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

На самих ранніх стадіях формування еволюції зорі проходять етап, коли вони стають джерелом потужних рухів речовини в протилежних напрямках, які в науковій літературі отримали назву “біполярні потоки”. Біполярні потоки є важливою складовою молодих зоряних об’єктів і на цей час вони активно вивчаються всіма засобами астрономії. Біполярні потоки містять іонізований газ, а також газ, що перебуває в атомарному та молекулярному станах. У даній роботі розглядається молекулярна складова газу.

У біполярних потоках молодих зоряних об’єктів можна виділити низькошвидкісну та високошвидкісну складові. В даній роботі під низькошвидкісною складовою розуміється та, що розташовується в тій області спектру, де є присутнім випромінювання нерухливої частини хмари (стаціонарної хмари). Таким чином, ця складова потоку випромінює в діапазоні швидкостей, які мало відрізняються від швидкостей руху молекул, що не приймають участі в біполярному потоці. Внаслідок цього їх важко розділити при аналізі спектрів випромінювання молекул.

Високошвидкісна складова біполярних потоків, як правило, вивчається за спостереженнями молекули ^{12}CO . Внаслідок відносно великої поширеності в молекулярних хмарах молекула ^{12}CO є основною, що використовуються для вивчення біполярних потоків. Але оптична товщина в центрі профілю ліній молекули ^{12}CO дуже велика, що робить неможливим аналіз руху молекул, які проявляють себе в цій ділянці спектру. Тому для вивчення біполярних потоків використовуються, області лінії випромінювання вдалині від її центру (на крилах лінії).

Дослідження низькошвидкісної складової біполярного потоку (поблизу центру лінії випромінювання) можна проводити по випромінюванню ліній ^{13}CO , CS , C^{18}O та інших молекул, у яких оптична товщина набагато менша, ніж у молекули ^{12}CO . У дисертаційній роботі основна увага приділена низькошвидкісній складовій потоків з використанням молекули ^{13}CO . Основною астрофізичною задачею при цьому було визначення внеску низькошвидкісних молекул в загальну масу біполярних потоків.

Актуальність теми. Низькошвидкісні складові потоків набагато менш досліджені, ніж високошвидкісні. Число робіт, присвячених їх вивченню, за випромінюванням молекул з малою оптичною товщиною значно менше, ніж число аналогічних досліджень, в яких біполярний потік досліджується за випромінюванням молекули ^{12}CO . Разом з тим відсутність даних про низькошвидкісну складову біполярного потоку приводить до істотної недооцінки основних характеристик біполярних потоків.

У більшості випадків у спектрах випромінювання низькошвидкісна складова біполярних потоків проявляється в асиметрії профілю ліній і появі крил ліній. Однак, у деяких об’єктах спостерігається систематичне зміщення всього профілю лінії уздовж напрямку руху речовини. Це явище було запропоновано у цій роботі

для вивчення низькошвидкісних складових потоку. Облік систематичного зміщення при розрахунках параметрів потоку приводить до істотного збільшення знайдених величин маси, моменту руху й інших параметрів потоку. При цьому зростає точність визначення внеску низькошвидкісних компонентів у загальні параметри потоку. Зміщення лінії випромінювання є найменш дослідженим явищем. На початок цієї роботи було недостатньо даних спостережень, а відповідні методи методів розрахунків параметрів низькошвидкісної складової біполярних потоків не охоплювали всі їх типи.

У дисертаційній роботі досліджується низькошвидкісна складова потоків з урахуванням систематичного зміщення всього спектру лінії уздовж напрямку руху речовини. Таким чином, актуальність тематики роботи визначається тим, що вона присвячена маловивченій низькошвидкісній складовій біполярних потоків, яка відповідальна за переміщення основної маси потоку, а виключення її з розрахунків приводить до істотної недооцінки параметрів потоку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація була виконана в рамках досліджень відділу міліметрової радіоастрономії Радіоастрономічного інституту Національної Академії наук України відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт: "Дослідження в галузі міліметрової радіоастрономії. Створення та розвиток інструментальної бази" (№ держ. реєстрації 0100U006425), "Спектральні дослідження областей активного зореутворення в міліметровому та сантиметровому діапазонах" (№ держ. реєстрації 0101U007269), "Дослідження місць активного зореутворення по молекулярним лініям випромінювання. Розвиток інструментальної бази радіоастрономічних досліджень." (№ держ. реєстрації 0103U007920), "Багаточастотні спектральні та РНДБ дослідження місць активного зореутворення. Розвиток інструментальної бази досліджень випромінювання молекул в молекулярних хмарах Галактики та в атмосфері Землі" (№ держ. реєстрації 0107U000027), "Дослідження космічної речовини методами багатохвильової радіоспектроскопії" (№ держ. реєстрації 0107U001043), "Дослідження кінематики та просторового розподілу молекулярної речовини в місцях активного зореутворення й атмосфері Землі методами мікрохвильової радіоастрономії. Розробка фізичних принципів створення радіофізичних приймальних систем нового покоління" (№ держ. реєстрації 0112U000035).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є визначення основних характеристик біполярних потоків в масивних областях зореутворення з урахуванням їх низькошвидкісних компонентів. Для досягнення поставленої мети були сформульовані та розв'язані наступні задачі:

1. Пошук і спостереження областей зореутворення в міліметровому діапазоні довжин хвиль, у яких спостерігається явище зміщення ліній випромінювання
2. Розробка методів аналізу для визначення кінетичних характеристик біполярних потоків з урахуванням низькошвидкісних компонентів руху молекулярної речовини. Створення комп'ютерних програм для їх розрахунків з урахуванням систематичного зміщення ліній випромінювання.

3. Визначення параметрів низькошвидкісної складової біполярних потоків і кінетичних характеристик біполярних потоків в об'єктах, де спостерігається зміщення ліній.
4. Оснащення радіотелескопу РТ-22 (сел. Кацивели, Крим) високочутливим приймальним комплексом міліметрового діапазону (на частоти від 85 до 115 ГГц) для проведення спектральних досліджень. У рамках цієї роботи були поставлені завдання розробки та виготовлення Фур'є-спектроаналізатору для аналізу спектру молекулярного випромінювання, а також розробки програмного забезпечення для управління антеною радіотелескопу РТ-22 і приймальним комплексом.
5. Визначення параметрів антени радіотелескопу РТ-22 на частотах випромінювання молекул, що використовувалися в спостереженнях.

Об'єкт дослідження – біполярні потоки в областях утворення молодих зір.

Предмет дослідження – низькошвидкісна складова молекулярних біполярних потоків в областях зореутворення.

Методи дослідження. Для визначення характеристик біполярних молекулярних потоків використовувалися спектральні методи спостережень випромінювання молекул в міліметровому діапазоні довжин хвиль. Спостереження на радіотелескопах виконувалися в режимі «наведення-відвід» і в режимі частотної модуляції. При розробці методів розрахунку параметрів низькошвидкісної складової біполярних потоків використовувався регресійний аналіз, методи теорії ймовірностей і теорії помилок. При розробці Фур'є-спектроаналізатора використовувалися методи спектрального аналізу, які базуються на властивостях швидкого перетворення Фур'є.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Вперше виконано картографування масивної області зореутворення IRAS 22267+6244 у лінії молекули ^{13}CO ($J=1-0$). Картографування масивних областей зореутворення IRAS 05345+3157 і G122.0-7.1 у лінії молекули ^{13}CO ($J=1-0$) вперше проведені на великій площі небесної сфери, що охоплює всю область потоку об'єктів. Об'єкт G122.0-7.1 додатково вивчено в лінії молекули ^{12}CO ($J=1-0$). У всіх цих об'єктах знайдено наявність біполярних потоків, які проявляються не тільки в зміні форми профілю лінії, а також і в зміщенні усього профілю лінії уздовж осі потоку. В об'єкті G122.0-7.1 знайдено раніше невідомий кандидат у молоді зоряні об'єкти.
- Запропоновано новий метод аналізу спектрів випромінювання молекул в біполярних потоках і програму для розрахунків параметрів низько швидкісних складових потоків. Метод ураховує всі прояви біполярного потоку в спектрах молекулярних ліній: крила, асиметрію профілів і систематичне зміщення речовини уздовж осі потоку. Можливість обліку останнього є найбільш істотною, тому що переважна більшість існуючих методів таке зміщення не враховують.

- Вперше знайдено параметри низькошвидкісних складових біполярних потоків в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1. Показано, що маси низькошвидкісних складових потоків набагато більше мас високошвидкісних, а їх енергії сумірні. Знайдено співвідношення між масами біполярних потоків і масами молекулярної хмари. Показано, що відношення мас біполярних потоків до мас молекулярної хмари може суттєво змінюватися від об'єкта до об'єкта (30 % – в об'єкті G122.0-7.1, 76 % – в об'єкті IRAS 22267+6244).
- Спостереження на радіотелескопі РТ-22 в 3-х міліметровому діапазоні довжин хвиль вперше проводились в режимах «наведення-відвід» і частотної модуляції. Застосування цих режимів дозволило скоротити час спостереження без втрати чутливості та проводити спостереження протяжних об'єктів.
- Вперше визначені параметри антенної системи радіотелескопа РТ-22 у високочастотній складовій її робочого діапазону на частоті 110,2 ГГц.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонований метод розрахунків параметрів біполярних потоків відрізняється універсальністю та може використовуватися для розрахунків параметрів потоків у багатьох областях зореутворення. Метод може бути легко перетворений і застосований для розрахунків параметрів у лініях інших молекул (наприклад CS або C¹⁸O). Це дає можливість використовувати його для оцінки впливу потоків на ядра молодих зоряних об'єктів і на безпосереднє оточення (оболонку) протозір.

Знайдені параметри низькошвидкісної складової біполярних потоків можуть бути використані при подальшому аналізі областей зореутворення та розробці нових моделей біполярних потоків.

Новий високочутливий приймальний комплекс на радіотелескопі РТ-22 КрАО дозволяє проводити регулярні радіоастрономічні спостереження в діапазоні частот 85...115 ГГц на сучасному рівні. Ці дослідження є одними з основних у діяльності Міжвідомчого центру колективного користування радіотелескопом РТ-22 НАН України та МОН України.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем виконані всі спостереження об'єктів IRAS 05345+3157 [1, 10] і IRAS 22267+6244 [2, 11], а також частина спостережень об'єкта G122.0-7.1 [3]. Здобувачем запропоновано та розроблено метод розрахунків низькошвидкісної складової біполярних потоків і проведено аналіз потоків в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244, G122.0-7.1 [1-4].

Автор запропонував і реалізував в розробленому Фур'є-спектралізаторі ідею використання звичайного персонального комп'ютера в якості основного процесора [5, 6, 12, 13]. При його розробці, здобувач виконав усі основні роботи по виготовленню приладу, а також розробив відповідне програмне забезпечення.

При розробці та створенні приймального комплексу 3-х міліметрового діапазону довжин хвиль [7, 8, 14, 15], здобувач здійснював розробку та виготовлення окремих блоків приймача, виконував роботи по впровадженню приймача на антені радіотелескопу РТ-22, а також розробив програмне забезпечення спостережень з приймальним комплексом.

Здобувач використав на РТ-22 багаточастотну методику визначення параметрів антенної системи по спостереженню планет і здійснив розрахунки параметрів радіотелескопа РТ-22 [9, 16].

Апробація результатів дисертації. Результати роботи з теми дисертації доповідалися й обговорювалися на семінарах міліметрової радіоастрономії в Радіоастрономічному інституті НАН України, а також на наступних міжнародних конференціях і симпозиумах:

- The Fourth International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves” (Kharkov, 2001).
- 2-я Харьковская конференция молодых ученых (Харьков - 2002).
- 13-я Международная Крымская конференция ”СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь – 2003).
- 16-я международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь – 2006).
- XXIV конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии» (Пущино – 2007)
- 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves (Kharkov – 2010).
- 12-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Asrtophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radioastronomy and astrobiology” (Odessa – 2012).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 16 наукових працях, у тому числі в 9 статтях в українських та закордонних фахових наукових журналах та у 7 доповідях на міжнародних конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 136 сторінки, з них основного тексту — 125 сторінок. Дисертація містить 5 таблиць і 41 рисунок. 2 сторінки повністю зайняти рисунками. Список використаних джерел розташовано на 9 сторінках і нараховує 120 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено актуальність теми дослідження й обґрунтовано необхідність виконання роботи, її зв'язок з науковими програмами, визначено мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичну значущість роботи, визначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, дано інформацію про публікацію й апробацію результатів досліджень.

Перший розділ присвячено огляду літератури за темою дисертації. У розділі наведені загальні відомості про молекулярні потоки, а також окремо розглянуті

високошвидкісна та низькошвидкісна складові потоків. Показано, що низькошвидкісна складова молекулярних потоків значно менше досліджена, чим високошвидкісна. Окремо розглянуті методи розрахунків високошвидкісний і низькошвидкісний складових потоку.

Проведений аналіз методів низькошвидкісної складової потоків показав, що у всіх існуючих методах визначення параметрів біполярних потоків є певні недоліки. У методах [17, 18] центральна частина спектра виключена з аналізу. Такий метод буде давати прийнятні результати, якщо спектри мають сильні крила. Методи, описані в роботах [19, 20] не враховують явища зміщення профілю лінії. Воно враховане в методі, який опубліковано в роботі [21], застосованого для одного об'єкта. Однак, використовуване в ньому припущення про симетричність стаціонарної хмари щодо центру акреції є суттєвим обмеженням. Таким чином, показано, що існуючі методи розрахунків параметрів низькошвидкісної складової потоку не є універсальними, та потребують суттєвої розробки нових підходів для визначення параметрів біполярних потоків.

Другий розділ присвячений опису апаратури, яка була виготовлена та використовувалася при радіоастрономічних спостереженнях. Також описано процес визначення параметрів радіотелескопа РТ-22 КрАО на частотах 87.7 ГГц і 110,2 ГГц.

Для виконання поставлених задач були проведені спостереження на радіотелескопі РТ-22 КрАО, а також використовувалися дані, отримані на радіотелескопі Метсахові (Фінляндія). Для проведення спостережень на РТ-22 був виготовлений спектральний приймальний комплекс для спостережень в діапазоні частот 85...115 ГГц. Ця велика за обсягом робота виконувалася колективом відділу міліметрової радіоастрономії РІ НАН України. Здобувач брав участь у багатьох розробках, але основним його внеском є створення Фур'є-спектроаналізатора та розробка програмного забезпечення для використання комплексу на РТ-22.

До складу приймального комплексу входять:

- модулятор та обладнання для калібрування;
- криогенний приймач міліметрового діапазону довжин хвиль;
- Фур'є-спектроаналізатор (512 каналів, смуга аналізу 14 МГц або 10 МГц або 8 МГц);
- фільтровий аналізатор спектра (64 каналу, смуга аналізу 64 МГц);
- система керування та збору даних (СКЗД), яка включає персональний комп'ютер з периферійними обладнаннями; комп'ютером управляє спеціально розроблена програма, яка управляє всім процесом спостережень і зберігає отримані результати.

Перед рупором був установлений обтюраторний модулятор квазіоптичного типу, який разом з додатковим дзеркалом формував другий опорний промінь. Модулятор дозволяє здійснювати перемикання: головний промінь – опорний промінь антени із частотою ~ 30 Гц. Опорний промінь антени розташований на $7'$ по азимуту від головного променя. Обтюраторний модулятор використовується для контролю точності наведення та при визначенні параметрів антени.

Калібрування здійснювалося за випромінюванням чорного тіла розташованого перед рупором.

Для радіотелескопа РТ-22 був створений супергетеродинний приймач із шумовою температурою ~ 70 К, яка мало відрізняється від шумових температур приймачів з надпровідниковими змішувачами чи високочутливими підсилювачами, що встановлені на інших радіотелескопах і вважаються кращими для радіоастрономічних спостережень. У якості змішувального елемента приймача використано AsGa діод з бар'єром Шоттки стільникової структури, що принципово дозволяє забезпечити найкращі параметри змішувача на нелінійних елементах такого типу. Перший каскад підсилювача проміжної частоти на 2-х НЕМТ транзисторах фірми Agilent забезпечував підсилення більш 20 дБ і мав власну шумову температуру $T_{ш} \sim 2$ К при охолодженні до 20 К. У якості гетеродину використовувався синтезатор частоти 3 мм діапазону, вихідним генератором якого була лампа зворотної хвилі типу ОВ-71. Розташовані у кріоблоці вузли приймальної системи (діплексер, змішувач, попередній підсилювач проміжної частоти) проохолоджувалися до 20 К за допомогою криогенної системи замкненого циклу типу НВК-3,2 А-Р.

Для спектрального аналізу комплекс був обладнаний двома спектроаналізаторами – фільтровим і Фур'є-спектроаналізатором.

Фільтровий аналізатор спектра має 64 канал і смугу аналізу 64 МГц. Він призначений для пошуку променевої швидкості об'єктів, у яких вона не відома заздалегідь.

Типова ширина молекулярних ліній спостережуваних в 3-х міліметровому діапазоні довжин хвиль становить від декількох сотень кГц до декількох МГц. Для спостереження цих ліній був розроблений Фур'є-спектроаналізатор, що забезпечує смугу аналізу 8 МГц, 10 МГц чи 14 МГц із кількістю каналів 512, 2048 чи 8192 залежно від обраного режиму спостережень.

Основне завдання Фур'є-спектроаналізаторів, полягає в тому, щоб оцифрувати сигнал, здійснити Фур'є-перетворення й одержати енергетичний спектр сигналу. У розробленому спектроаналізаторі Фур'є-перетворення виконує центральний процесор персонального комп'ютера із процесором Pentium, що працює на частоті 3,2 ГГц. До комп'ютера було розроблено спеціальне обладнання для оцифровки аналогового сигналу та передачі даних в оперативну пам'ять комп'ютера. Передача даних у комп'ютер здійснюється через АТА інтерфейс із застосуванням механізму PCS BUS Master, що дозволяє виключити із процесу передачі центральний процесор, який у цей час робить Фур'є перетворення накопичених раніше даних. Це дає можливість виключити втрати часу при смузі аналізу 8 і 10 МГц. При смузі аналізу 14 МГц, потужності процесору не вистачає на обробку даних, що приводить або до погіршення відношення сигнал-шум або до необхідності збільшити час спостережень на 15%.

Програмне забезпечення, розроблене для забезпечення роботи спектроаналізатора, передбачає можливість використання різних вікон, а також установки різного коефіцієнту перекриття періодограм. Динамічний діапазон Фур'є-спектроаналізатора становить 40 дБ при смузі аналізу 8 МГц і 20 дБ при смузі аналізу 10 і 14 МГц.

Створений приймальний комплекс 3-мм діапазону дозволяє проводити спектральні спостереження в 3-х різних режимах: режим діаграмної модуляції, режим «наведення-відвід» і режим частотної модуляції. Ці режими є стандартними та використовуються на багатьох сучасних радіотелескопах. Також є можливість сканувати джерело по азимуту, куту місця, прямому сходженню та схиленню. Сканування джерела застосовувалося для тестових вимірів і для визначення параметрів радіотелескопу. Сканувалися об'єкти, які випромінюють у широкому діапазоні частот. Тому для реєстрації такого типу сигналів застосовувався синхронний детектор, що реєструє сигнал у широкій смузі частот.

Для забезпечення загального керування всіма процесами проведення спостережень була розроблена система керування та збору даних (СКЗД). Вона є системою реального часу та при спостереженнях, інформація оперативно відображається на екрані, а оператор може в будь-який момент зупинити спостереження. СКЗД дозволяє зберігати результати спостережень на жорсткому диску, а також зчитувати збережені дані для їхнього перегляду й обробки. Також є можливість експортувати отримані результати у вигляді текстових файлів або файлах даних типу FITS. Крім основних режимів СКЗД має набір тестів для перевірки апаратури. Програма також містить математичний блок, що дозволяє здійснювати апроксимацію експериментальних даних функцій Гауса, коригувати базову лінію, а також усереднювати результати декількох спостережень.

Використовуючи створений апаратурний комплекс, були проведені виміри параметрів антени РТ-22 в 3-х міліметровому діапазоні довжин хвиль. Виміри велися в 2 етапи. На першому етапі ставилося завдання переконатися в тому, що поверхня антени не погіршилася із часу проведення останніх вимірів у 1979 році. Для цього в 2007 році на частоті 87,7 ГГц була визначена ефективна площа антени РТ-22. Порівняння показало, що ефективна площа, визначена в 1979 році та 2007 року практично не змінилася.

Коефіцієнт використання діаграми спрямованості на частоті 110,2 ГГц був визначений зі спостережень планети Юпітер. Спостереження, проведені в діапазоні кутів висоти від 45° до 60° , показали, що в цьому діапазоні його величина є 0.15 при відносній похибці вимірів 7%.

В **третьому розділі** роботи представлено новий метод розрахунків параметрів низькошвидкісної складової біполярних потоків (МНШБП). Метод враховує всі прояви біполярного потоку в спектрах ліній (асиметрію профілів ліній, наявності крил ліній і систематичне зрушення всього профілю лінії уздовж напрямку руху речовини). Метод використовується для розрахунків маси, імпульсу й енергії біполярних потоків, за результатами картографування молекулярної хмари в лінії молекули ^{13}CO ($J=1-0$). Він легко може бути адаптований для ліній інших молекул. У дисертації описані два варіанти методу - МНШБП і модифікований МНШБП. Обидва методи дають схожі результати. Розв'язання, які дає модифікований МНШБП менш залежить від шумів вихідних спектрів, ніж при використанні МНШБП.

Модифікований МНШБП. При моделюванні випромінювання робиться припущення, що воно випромінюється як стаціонарною частиною молекулярної

хмари, так і біполярним потоком. Для кожної точки спостереження з координатами α і δ розраховуються спектри стаціонарної хмари та спектри, відповідні до біполярного потоку, а потім визначаються параметри біполярного потоку. При цьому використовуються наступні припущення:

- температури збудження стаціонарної хмари та біполярного потоку вважаються однаковими та постійними у всієї молекулярній хмарі.
- розраховується нижня межа параметрів біполярного потоку
- речовина в стаціонарній хмарі та біполярному потоці перебуває в стані локальної термодинамічної рівноваги

Враховуючи припущення про локальну термодинамічну рівновагу, у методі використані співвідношення, що зв'язують яскравісну температуру T_{mb} молекулярної хмари з оптичною товщиною $\tau(T_{mb})$ і променевою концентрацією $N(T_{mb})$ [19]:

$$\tau(T_{mb}) = -\ln\left(1 - \frac{T_{mb}}{5.29 / [\exp(5.29/T_{ex}) - 1] - 0.87}\right) \quad (1)$$

$$N(T_{mb}) = \frac{2.42 \cdot 10^{14} \cdot (T_{ex} + 0.88)}{1 - \exp(-5.29/T_{ex})} \cdot \int \tau(T_{mb}) dv \quad (2)$$

де T_{ex} - температура збудження молекул ^{13}CO . Аналогічні співвідношення застосовні до стаціонарної хмари та біполярного потоку.

Різниця між масами молекулярної хмари та стаціонарної хмари вважається масою біполярного потоку. Оскільки в наближенні локальної термодинамічної рівноваги оптична товщина прямо пропорційна розрахованій масі, оптична товщина біполярного потоку, яка віднесена до одного спектрального каналу, дорівнює різниці оптичних товщин молекулярної хмари та стаціонарної хмари в даному каналі. Це дає можливість визначити яскравісну температуру біполярного потоку в кожному спектральному каналі:

$$T_{mb}^{bo} = (J(T_{ex}) - J(T_{bg})) \cdot (1 - \exp(-\tau(T_{mb}) - \tau(T_{mb}^s))), \quad (3)$$

де T_{mb} , T_{mb}^s , T_{mb}^{bo} - яскравісні температури, відповідно, молекулярної хмари, стаціонарної хмари та біполярного потоку. Таким чином, для визначення спектрів біполярного потоку необхідно знайти спектри стаціонарної хмари.

У модифікованому МНШБП використовується наступна модель стаціонарної хмари. У стаціонарній хмарі з мікротурбулентним типом руху речовини, розподіл кількості молекул по швидкостях описується функцією Гауса із центральною швидкістю v_0^s і шириною Δv^s , яка визначена на рівні 0.5. У цьому випадку яскравісну температуру стаціонарної хмари, на швидкості v в точці з координатами α і δ можна представити у вигляді [22]:

$$T_{mb}^s(v, \tau_{\alpha\delta}^s, v_0^s, \Delta v_0^s) = (J(T_{ex}) - J(T_{bg})) \cdot (1 - \exp(-\tau')), \quad (4)$$

де $\tau' = \tau_{\alpha\delta}^s \cdot \exp\left(-4 \ln(2) \cdot \left(\frac{v - v_0^s}{\Delta v^s}\right)^2\right)$, $J(T) = 5.29 / (\exp(5.29/T) - 1)$.

Тут $\tau_{\alpha\delta}^s$ - оптична товщина стаціонарної хмари в напрямку α і δ у центрі лінії. У формулі (4) невідомими є $\tau_{\alpha\delta}^s, \nu_0^s, \Delta\nu^s$.

Далі описана методика пошуку $\tau_{\alpha\delta}^s$ за умови, що ν_0^s і $\Delta\nu^s$ відомі. На рис. 1 наведено приклад типового спектру випромінювання молекулярної хмари, що спостерігався для одному з об'єктів, а також розраховані спектри стаціонарної хмари та біполярного потоку. З першого припущення випливає, що інтенсивність стаціонарної хмари не може бути більше інтенсивності випромінювання молекулярної хмари. Із другого припущення випливає, що інтенсивність випромінювання стаціонарної хмари повинна бути максимально можливою. Це приводить до появи в розрахованому спектрі біполярного потоку додаткової ділянки базової лінії (рис. 1). Для одержання фізичного спектру біполярного потоку необхідна рівність нулю середнього значення цієї додаткової базової лінії. Ця обставина була обрана критерієм при визначення $\tau_{\alpha\delta}^s$.

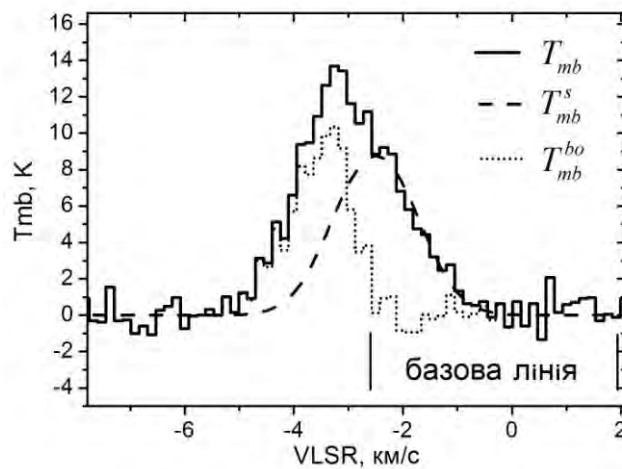


Рис. 1. Спектр лінії ^{13}CO ($J=1-0$) молекулярної хмари (T_{mb}), стаціонарної хмари (T_{mb}^s) і біполярного потоку (T_{mb}^{bo}).

Визначення $\tau_{\alpha\delta}^s$ здійснюється в такий спосіб:

1. Шукається наближене значення $\tau_{\alpha\delta}^s$. При цьому використовується наступна умова: імовірність, що n послідовних значень яскравісної температури в базовій лінії T_{mb}^{bo} мають значення вище, чим $-\eta_T \cdot \sigma_{T_{mb}}$, повинна дорівнювати ймовірності, що хоча б одне із цих значень менш $-\eta_T \cdot \sigma_{T_{mb}} - \sigma_{T_{mb}}$ - середньоквадратичне відхилення яскравісної температури, що розрахована в області спектра, де відсутня лінія випромінювання. У дисертації показано, що $\eta_T \approx 1$.
2. Визначається масив даних променевих швидкостей ν_i , які беруть участь в обчисленні остаточного значення $\tau_{\alpha\delta}^s$. У цей масив включаються ті спектральні канали, у яких для знайдених яскравісних температур біполярного потоку виконується умова $T_{mb}^{bo}(\nu_i) < 2 * \sigma_{T_{mb}}$.
3. Значення експериментально отриманих спектрів молекулярної хмари, що відносяться до масиву ν_i використовуються для обчислення остаточного

значення $\tau_{\alpha\delta}^s$ за допомогою методу найменших квадратів. У якості апроксимуючої функції використовується функція (4).

Використовуючи викладену вище методику, величини ν_0^s і $\Delta\nu^s$ розраховуються методом рівномірного пошуку, виходячи з мінімуму маси біполярного потоку. Величина ν_0^s вважається однаковою в усіх розрахованих спектрах. $\Delta\nu^s$ розраховується індивідуально для кожного спектру. Область визначень для $\Delta\nu^s$ не обмежується. Діапазон, у якому розраховується ν_0^s , обмежений інтервалом від $\bar{\nu}_0 - \frac{\sigma_{\nu_0}}{2}$ до $\bar{\nu}_0 + \frac{\sigma_{\nu_0}}{2}$. $\bar{\nu}_0$ і σ_{ν_0} - усереднені середня швидкість і середньоквадратичне відхилення середньої швидкості стаціонарної хмари, визначені в області, де біполярний потік відсутній.

По відомим значенням $\tau_{\alpha\delta}^s$, ν_0^s , $\Delta\nu^s$ розраховуються спектри стаціонарної хмари (4) та спектри біполярного потоку (3). По спектрам біполярного потоку розраховується променева концентрація молекули ^{13}CO (2). Маса біполярного потоку визначається зі спектрів біполярного потоку по формулі:

$$M_{gas} = \mu_g \cdot \frac{X(H_2)}{X(^{13}CO)} \cdot S_{flow} \cdot m_{H_2} \cdot \sum_{\alpha,\delta} N(T_{mb}^{bo}), \quad (5)$$

де $\mu_g = 1,36$ – відношення всієї маси газу до маси H_2 , $\frac{X(H_2)}{X(^{13}CO)} = 5 \cdot 10^5$ відношення концентрацій молекул H_2 до ^{13}CO , S_{flow} - площа біполярного потоку, m_{H_2} - маса молекули водню. Підсумовування проводиться по всіх точках α і δ , у яких спостерігається біполярний потік. При розрахунках не робилася корекція на кут нахилу між віссю потоку та променем зору.

Відмінність методу МНШБП від модернізованого МНШБП полягає у відсутності пунктів 2 і 3 при визначенні $\tau_{\alpha\delta}^s$, $\Delta\nu^s$ вважалася однаковою у всій молекулярній хмарі та визначалася аналогічно, як і ν_0^s .

На рис. 2 наведені приклади розрахунку модернізованим МНШБП спектрів стаціонарної хмари та спектрів біполярного потоку в окремих точках в об'єкті IRAS 22267+6244. Безперервною лінією показані спектри молекулярної хмари, що взяті з спостережень, штриховим пунктиром – спектри стаціонарної хмари, точками – спектри біполярного потоку. Трикутниками показані точки, які беруть участь в обчисленні спектра стаціонарної хмари методом найменших квадратів. Спектри відповідають різним частинам молекулярної хмари. Алгоритм ефективно виділяє червонозміщений (-1, 1) і синезміщений (1, -1) компонент потоку, а в центрі потоку (0,0) та області, де потоку немає (-4, -2), спектри біполярного потоку близькі до 0. У всіх випадках середнє значення базової лінії близьке до 0.

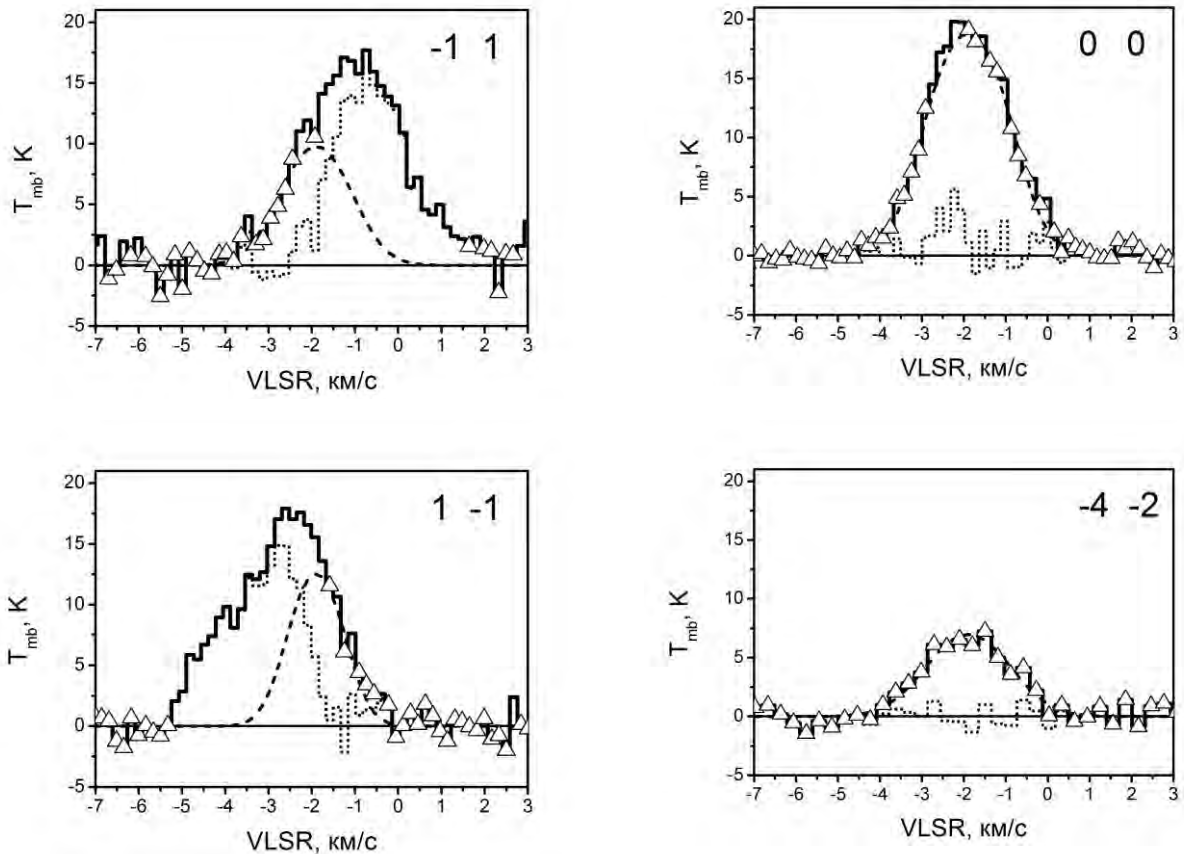


Рис. 2. Приклади використання модернізованого МНШБП для аналізу спостережуваних спектрів в різних областях об'єкта IRAS 22267+6244.

Похибка при застосуванні модернізованого МНШБП, що зумовлена наявністю шумів у вихідних спектрах, оцінювалася з аналізу усереднених спектрів об'єкта G122.0-7.1, у які додавався штучний шум з відомими характеристиками. Знайдено, що для цього об'єкта застосування модернізованого МНШБП приводить до відносних похибок при визначенні маси біполярного потоку $\sim 15\%$ та енергії біполярного потоку $\sim 20\%$.

У четвертому розділі даної роботи представлено аналіз молекулярних біполярних потоків в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1. У всіх цих об'єктах спостерігається ефект систематичного зміщення спектра лінії уздовж осі потоку. Визначення параметрів біполярних потоків в об'єктах IRAS 05345+3157 і IRAS 22267+6244 проводилося методом МНШБП. Параметри потоку в об'єкті G122.0-7.1 розраховані модернізованим МНШБП. Дослідження високошвидкісної складової біполярного потоку представлені спостереженнями об'єкта G122.0-7.1 у лінії ^{12}CO ($J=1-0$).

Біполярний потік в області зореутворення IRAS 05345+3157. Картографування області IRAS 05345+3157 у лінії $J=1-0$ молекули ^{13}CO проводилися в період з 27 вересня по 13 жовтня 2009 року на радіотелескопі РТ-22 КрАО.

Знайдено, що біполярний потік у лінії молекули ^{13}CO ($J=1-0$) має протяжну форму, витягнуту в напрямку з південного сходу на північний захід (рис. 3). Червонозміщений компонент потоку розташований в південно-східній частині молекулярної хмари, синезміщений - у північно-західній. Порівняння карт біполярного потоку з картою стаціонарної хмари показало, що червонозміщений компонент біполярного потоку поширюється в щільних шарах молекулярної хмари, у той час як істотна частина синезміщеного компонента біполярного потоку поширюється в набагато менш щільних шарах молекулярної хмари. Карта побудована з використанням спектрів біполярного потоку, розрахованих за допомогою методу МНШБП.

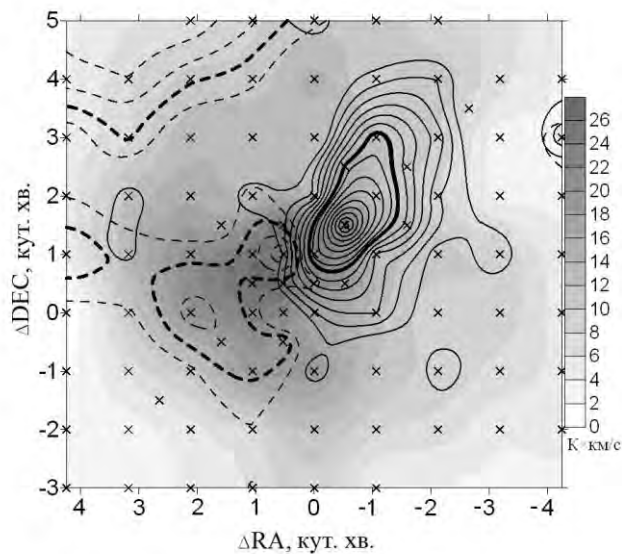


Рис. 3. Карта розподілу червонозміщеного (пунктирна лінія) та синезміщеного (безперервна лінія) компонентів біполярного потоку в області IRAS 05345+3157 у лінії $J=1-0$ молекули ^{13}CO . Хрестиками показані позиції, на яких виконувалися спостереження. Тонкими лініями проведені контури по рівнях починаючи з $1 \text{ K} \cdot \text{км/с}$ із кроком $0.5 \text{ K} \cdot \text{км/с}$. Товстими лініями показані контури на рівні $0,5$ від максимальних значень. Фоновим сірим кольором показаний розподіл розрахованої інтегральної інтенсивності стаціонарної хмари.

З літератури відомо [23], що біполярний потік у лініях $J=1-0$ і $J=2-1$ молекули ^{12}CO має протяжну форму, витягнуту в напрямку захід-схід. Порівняння цих даних з нашими показує, що положення червонозміщених компонент високошвидкісний (дані ліній молекули ^{12}CO) і низькошвидкісний (дані лінії молекули ^{13}CO) складових біполярного потоку практично збігаються. Значна частка синезміщених компонент високошвидкісний і низькошвидкісний складових біполярного потоку виявляються просторово рознесені.

Порівняння параметрів біполярного потоку в лініях молекул ^{12}CO і ^{13}CO показало, що маса низькошвидкісної складової біполярного потоку набагато більше маси, визначеної за спостереженнями ліній молекули ^{12}CO (високошвидкісна складова біполярного потоку). Це відноситься як до імпульсу, так і до енергії біполярного потоку, хоча в цьому разі різниця суттєво менша. Цей результат показано в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри біполярних потоків і молекулярних хмар в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244, G122.0-7.1.

	IRAS 05345+3157		IRAS 22267+6244		G122.0-7.1		
	¹³ CO	¹² CO	¹³ CO	¹² CO	ASO1		ASO2
					¹³ CO	¹² CO	¹³ CO
Маса потоку, M_{\odot}	370	6.1	590	3,8	2200	940	2400
Імпульс потоку, $M_{\odot} \times$ км/с	550	38.3	620	66	2000	2230	1600
Енергія потоку, 10^{45} erg	8.4	3.7	9.8	12	21	55	15
Турбулентна кінетична енергія молекулярної хмари, 10^{45} ерг			17		72		57
Енергія зв'язку молекулярної хмари, 10^{45} ерг			54		940		900
Маса молекулярної хмари, M_{\odot}			780		11000		8900
Джерело	ця робота	[23]	ця робота	[24]	ця робота		

Біполярний потік в області зіркоутворення IRAS 22267+6244. Спостереження області IRAS 22267+6244 у лінії J=1-0 молекули ¹³CO були проведені в жовтні 2006 і жовтні 2008 року на радіотелескопі РТ-22 КрАО.

На рис. 4 показана карта розподілу інтегральних інтенсивностей червонозмщеного (пунктирна лінія) та синеззмщеного (безперервна лінія) компонентів біполярного потоку в області IRAS 22267+6244 у лінії J=1-0 молекули ¹³CO, що отримані інтегруванням спектру ліній спостережень (рис. 4а) і з використанням методу МНШБП (рис. 4б). Фоновим сірим кольором показано розподіл розрахованої інтегральної інтенсивності молекулярної хмари (рис. 4а) і стаціонарної хмари (рис. 4б). З рис. 4 видно, що хмара має яскраво виражену біполярність. Червонозмщений і синеззмщений компоненти повністю розділені на рівні 1/2 від максимальних значень. Це свідчить про те, що кут нахилу осі потоку до променя зору великий. Знайдено, що основна частина молекулярної хмари (76%) бере участь у біполярному русі речовини, а маса стаціонарної хмари мала в порівнянні з масою біполярного потоку (табл. 1). Встановлено, що стаціонарна хмара займає невелику частину загального об'єму молекулярної хмари (рис. 4б), інша частина бере участь у русі, викликаним біполярним потоком. У той же час розподіл інтегральної інтенсивності молекулярної хмари на рис. 4а показує, що біполярний потік не приводить до сильного просторового переміщення речовини й основна маса молекулярної хмари зосереджена в центрі потоку.

Визначено, що в цьому потоці швидкість росте пропорційно з відстанню від центрального джерела.

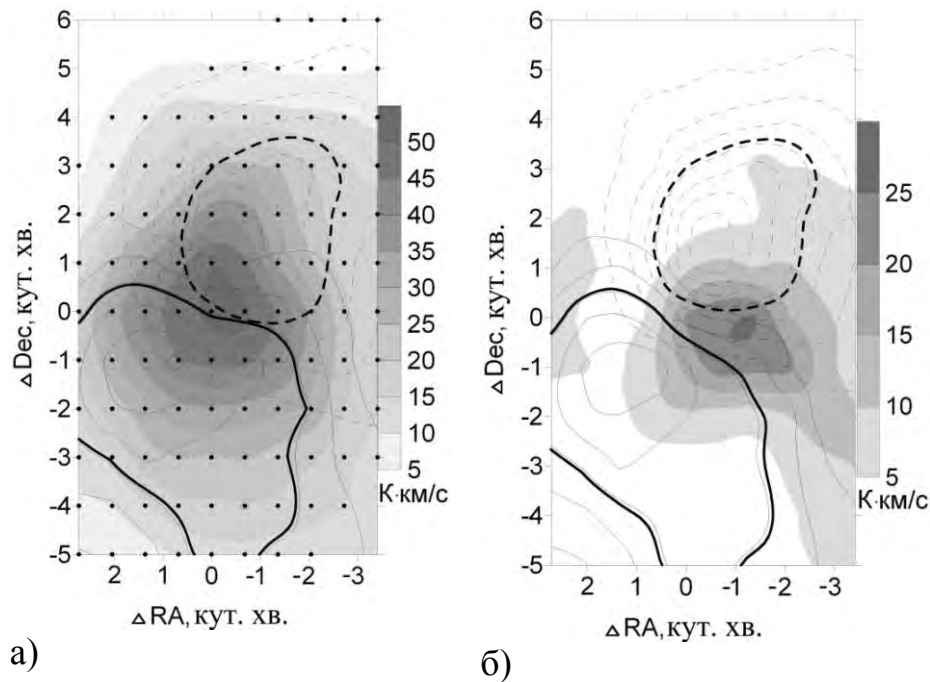


Рис. 4. Карта розподілу червонозміщеного (пунктирна лінія) та синезміщеного (безперервна лінія) компонентів біполярного потоку в області IRAS 22267+6244 у лінії J=1-0 молекули ^{13}CO , отримані інтегруванням профілю спостережуваних ліній (рис. а) і за допомогою методу МНШБП (рис. б). Точками показані позиції, на яких проводилися спостереження. Тонкими лініями проведені контури по рівнях починаючи з 2 К·км/с із кроком 2 К·км/с. Товстими лініями показані контури на рівні 0,5 від максимальних значень.

Розрахунки параметрів біполярного потоку проводився за допомогою МНШБП (табл.1). Порівняння високошвидкісної складової біполярного потоку, визначеної за даними спостережень лінії ^{12}CO [24], з нашими даними показало, що положення червонозміщених компонентів високошвидкісний і низькошвидкісний складових біполярного потоку практично збігаються. Значна частина синезміщеного компонента низькошвидкісної складової біполярного потоку лежить східніше високошвидкісної складової. Порівняння параметрів біполярного потоку в лініях молекул ^{12}CO і ^{13}CO показало, що маса низькошвидкісної складової біполярного потоку, визначеної за лінією молекули ^{13}CO (J=1-0), набагато більше маси, розрахованої за даними спостережень в лінії молекули ^{12}CO . При цьому їх енергії майже однакові (табл. 1).

Визначено, що сумарна енергія високошвидкісної та низькошвидкісної складових біполярного потоку (табл. 1) перевищує турбулентну кінетичну енергію молекулярної хмари. У той же час, енергія біполярного потоку менша, ніж енергія зв'язку молекулярної хмари. Але приймаючи до уваги, що ми визначаємо тільки нижню межу енергії біполярного потоку, та роблячи корекцію на кут між напрямком вісі потоку та променем зору, можна стверджувати, що при куті 40° , енергія біполярного потоку досягне значення енергії зв'язку молекулярної хмари. Враховуючи морфологію біполярного потоку, така можливість є цілком ймовірною.

Біполярний потік в області зореутворення G122.0-7.1. Цей об'єкт картографувався в лініях молекул ^{12}CO (1-0) і ^{13}CO (1-0) на площі $15' \times 9'$. У цій молекулярній хмарі була виявлена наявність двох щільних областей зореутворення, які були названі ASO1 і ASO2. У дисертації наведені карти цих потоків. Результати

розрахунків параметрів біполярних потоків, пов'язаних з ASO1 і ASO2 представлено в таблиці 1.

Порівняння карт біполярного потоку в лініях ^{12}CO і ^{13}CO в об'єкті ASO1 показало, що положення червонозміщеного компонента в цих лініях практично збігається. Синезміщений компонент, визначений за випромінюванням лінії ^{13}CO , розташований більш на північ і захід, ніж синезміщений компонент, визначений за випромінюванням лінії ^{12}CO . Маса біполярного потоку, розрахованого за даними спостережень молекул ^{12}CO і ^{13}CO склала 30% від маси всієї молекулярної хмари (табл. 1). При цьому значна частина маси ($\sim 10\%$) визначається високошвидкісною складовою потоку. Сумарна енергія біполярного потоку, що знайдена за спостереженнями в лініях ^{12}CO і ^{13}CO , складає $7,6 \cdot 10^{46}$ ерг. Ця величина майже співпадає з турбулентною кінетичною енергією молекулярної хмари. Енергія біполярного потоку набагато менше енергії зв'язку молекулярної хмари ($9,4 \cdot 10^{47}$ ерг). Порівняння цих енергій дозволяє зробити допущення, що цей біполярний потік не має потенціалу для повного розсіювання хмари в міжзоряному середовищі.

Знайдено, що в об'єкті ASO2 у профілях ліній ^{12}CO відсутні крила ліній. Проте, особливості випромінювання в лінії ^{13}CO свідчать про наявність біполярного потоку в цьому об'єкті. Підставою для цього є виявлене зміщення ліній випромінювання молекули ^{13}CO . Подібний ефект спостерігався в біполярних потоках у ряді об'єктів при формуванні масивних зір [20, 21]. Крім того, центр потоку ASO2 перебуває в області зореутворення поблизу максимуму континуального випромінювання на частоті 4850 МГц. Його положення майже збігається з максимумом інтегральної інтенсивності випромінювання молекули ^{13}CO . Маса біполярного потоку об'єкта ASO2 (табл. 1), визначеного за лінією молекули ^{13}CO складає $\sim 27\%$ від маси всієї молекулярної хмари. Енергія біполярного потоку ($1,5 \cdot 10^{46}$ ерг) набагато менше турбулентної кінетичної енергії ($5,7 \cdot 10^{46}$ ерг) та енергії зв'язку молекулярної хмари ($9 \cdot 10^{47}$ ерг). Цей потік на даному етапі не може сприяти підтримці турбулентного руху в хмарі та не може стати причиною його гравітаційної нестабільності в майбутньому.

Висновки

Проведено картографування масивних областей зореутворення IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 у лінії молекули ^{13}CO ($J=1-0$). Об'єкт G122.0-7.1 картографувався в лініях молекул ^{12}CO ($J=1-0$) і ^{13}CO ($J=1-0$). Спостереження вперше проводилися на великій площі, що охоплювало всю область потоку. Це дозволило вперше зареєструвати біполярні молекулярні потоки в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 в лінії ^{13}CO ($J=1-0$). В об'єкті G122.0-7.1 крім відомого потоку в області зореутворення (ASO1), виявлено раніше невідомий біполярний потік, що може розглядатися як новий кандидат у молоді зоряні об'єкти (ASO2).

Розроблено новий метод розрахунків параметрів низькошвидкісної складової біполярних потоків в молодих зоряних об'єктах. У методі аналізуються спектри, що спостерігаються в молекулярній хмарі, та розраховуються спектри як стаціонарної

хмари, так і біполярного потоку. МНШБП ураховує всі прояви біполярного потоку в спектрах молекулярної хмари - асиметрію профілю ліній, крила ліній і систематичне зміщення всього профілю лінії уздовж напрямку руху речовини. Метод дозволяє визначити масу стаціонарної частини хмари, а також масу, імпульс та енергію синезміщеного та червонозміщеного біполярних компонентів. Метод розроблено для аналізу ліній молекули ^{13}CO ($J=1-0$), але його можна легко адаптувати для аналізу ліній інших молекул.

За допомогою цього методу вперше проведено аналіз низькошвидкісних складових біполярних потоків в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1. В результаті побудовані карти низькошвидкісних складових потоків, визначені їхні параметри, проведено порівняння низькошвидкісних і високошвидкісних складових потоків, визначені турбулентна кінетична енергія й енергії зв'язку молекулярних хмар.

Визначено, що біполярні молекулярні потоки в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1(ASO1) мають схожі властивості. У всіх трьох цих об'єктах біполярний потік спостерігається в лініях молекул ^{12}CO і ^{13}CO . Профілі лінії ^{13}CO зміщуються по частоті при зміні позиції спостереження уздовж осі потоку. Це дозволяє зробити висновок, що зміщення профілю лінії може бути розповсюдженим в молекулярних потоках, характерним для масивних областей зореутворення. Синезміщені високошвидкісна та низькошвидкісна складові всіх трьох потоків просторово рознесені. Просторові розташування червонозміщених високошвидкісних і низькошвидкісних складових корелюють між собою. Маса низькошвидкісних складових біполярних потоків значно перевищує маси високошвидкісних, а величини їх кінетичної енергії подібні.

Низькошвидкісна складова біполярного потоку в об'єкті IRAS 22267+6244 виявилася надзвичайно масивною. Її маса більше, ніж в сто разів перевищує масу високошвидкісної складової. Показано, що швидкість низькошвидкісної складової біполярного потоку в об'єкті IRAS 22267+6244 лінійно збільшується з відстанню від центрального джерела.

Знайдено, що відношення маси біполярних потоків до маси всієї хмари відрізняється у різних об'єктів і становить 30% для потоку G122.0-7.1(ASO1) і 76% для IRAS 22267+6244.

Знайдене, що енергія біполярних потоків в об'єктах G122.0-7.1(ASO2) і G122.0-7.1(ASO1) набагато менше енергії зв'язку їх батьківських молекулярних хмар і ці потоки не можуть дестабілізувати ці хмари. В об'єкті IRAS 22267+6244 енергія біполярного потоку більше турбулентної енергії та порівнянна з енергією зв'язку молекулярної хмари. Отже, цей потік може сприяти підтримці турбулентного руху в хмарі та бути причиною його гравітаційної нестійкості в майбутньому.

Біполярні потоки в об'єктах G122.0-7.1 (ASO1) і G122.0-7.1 (ASO2) суттєво відрізняються по своїх властивостях. Спектральні лінії в об'єкті ASO1 більш широкі, ніж в ASO2. Біполярний потік в ASO1 проявляється в основному в крилах ліній ^{12}CO . В ASO2 біполярний потік спостерігається в лінії ^{13}CO , як зміщення усього спектру молекули ^{13}CO . Показано, що центри біполярних потоків в обох об'єктах ASO1 і ASO2 співпадають з положенням максимуму інтегральної інтенсивності випромінювання молекули ^{13}CO і розташовані поблизу максимуму

континуального випромінювання на частоті 4850 МГц. Маса біполярного потоку об'єкта ASO2, визначеного за лініями $J=1-0$ молекули ^{13}CO становить $\sim 27\%$ від маси всієї молекулярної хмари. Енергія біполярного потоку набагато менше турбулентної кінетичної енергії й енергії зв'язку молекулярної хмари.

При виконанні роботи радіотелескоп РТ-22 був оснащений сучасним високочутливим приймальним комплексом і розпочаті регулярні спектральні спостереження в короткохвильовій частині міліметрового діапазону в широкому інтервалі частот від 85 ГГц до 115 ГГц.

Визначено параметри антени на частоті 87,7 ГГц. Показано, що якість поверхні головного дзеркала телескопа РТ-22 у період з 1979 по 2007 рік практично не змінилося. Уперше визначені параметри антени на частоті 110,2 ГГц. Показане, що в діапазоні кутів висоти від 45° до 60° на цій частоті коефіцієнт використання діаграми спрямованості дорівнює 0.15.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових журналах

1. Antyufeyev A. Bipolar outflow in the vicinity of IRAS 05345+3157 in ^{13}CO line / Antyufeyev A., Shulga V. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2011. – Vol. 27, № 6. – p. 282-290.
Антюфеев А.В. Біполярний потік в області звездоутворення IRAS 05345+3157 в лінії молекули ^{13}CO / Антюфеев А.В., Шульга В.М. // Кинематика и физика небесных тел. – 2011. – Том. 27, № 6. – с. 18-30.
2. Antyufeyev A. Bipolar molecular outflows in the star forming region IRAS 22267+6244 / Antyufeyev A., Shulga V. // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012. Vol. 3, № 1. – P. 27-32
3. Antyufeyev A. Large-scale mapping of the IRAS 0042+5530 region in the ^{12}CO ($J=1-0$) and ^{13}CO ($J=1-0$) molecular lines / Antyufeyev A., Toriseva M., Shulga V. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2008. – Vol. 24, № 5. – P. 229-235.
Antyufeyev A. Large-scale mapping of the IRAS 0042+5530 region in the ^{12}CO ($J=1-0$) and ^{13}CO ($J=1-0$) molecular lines / Antyufeyev A., Toriseva M., Shulga V. // Кинематика и физика небесных тел – 2008. – Том. 24, № 5. – с. 333-344.
4. Antyufeyev A. Method for calculating low-velocity bipolar outflow parameters in massive star formation regions / Antyufeyev A., Shulga V. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2014. – Vol. 30, № 3. – P. 137-146.
5. Антюфеев А.В. Использование интерфейса АТА для связи с внешним устройством / Антюфеев А.В. // Схемотехника. – 2004. – №1. – стр. 42-45.
6. Антюфеев А.В. Спектроанализатор на базе персонального компьютера для радиоастрономических исследований / Антюфеев А.В., Шульга В.М. // Радиотехника. – 2005. – № 10. – с. 145-148
7. Антюфеев А.В. Многоканальное 16-бит устройство сбора/передачи данных / Антюфеев А.В., Королев А.М., Поладич А.В. // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – №4. – с.163-165.

8. Антюфеев А.В. Аппаратурный комплекс для спектральных наблюдений в диапазоне частот 85-116 ГГц на радиотелескопе РТ-22 КрАО / Антюфеев А.В., Зубрин С.Ю., Король А.Н., Королев А.М., Мышенко В.В., Подьячий В.И., Поладич А.П., Шкодин В.И, Шульга В.М. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. т. 15, № 4. – с. 369-375.
9. Антюфеев А.В. Исследование параметров антенны РТ-22 КрАО на длине волны 3,42 мм / Антюфеев А.В., Зубрин С. Ю., Мышенко В.В., Зинченко И.И., Вольвач А. Е., Шульга В. М. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – т.14, № 4. – с. 345-352

Публікації в матеріалах конференцій

10. Antyufeyev A. A spectroscopic study of the IRAS 05345+3157 bipolar outflow source / Antyufeyev A., Shulga V. // Proc. 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. – Kharkov. Ukraine. – 21-26 June 2010.
11. Антюфеев А. В. Биполярный поток в области звездообразования IRAS 22267+6244 / Антюфеев А. В., Шульга В. М. // Proc. 12th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School – Odessa. Ukraine. – 2012. – с. 33.
12. Антюфеев А. В. Фурье-спектроанализатор на базе персонального компьютера Athlon-1000 / Антюфеев А. В., Шульга В. М. // Тезисы докладов 2-й Харьковской конференций молодых ученых. – Харьков. Украина. – 2002. – с. 5-6.
13. Вольвач А.Е. Спектроанализатор для изучения на РТ-22 КрАО мазерных источников / Вольвач А.Е., Стрепка И.Д., Никитин П.С., Вольвач Л.Н., Шульга В.М., Антюфеев А.В., Мышенко В.В. // Тезисы докладов 13-й Международной Крымской конференций ”СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь, Украина. – 2003. – с. 776-777.
14. Peskovatskii S. A. A cryogenic 3 mm schottky diode mixer receiver. / Peskovatskii S. A., Shulga V. M., Piddiachii V. I., Koroliov A. M., Myshenko V. V., Antyufeyev A. V., Lavrik I. V. // Proc. The Fourth International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves”. – Kharkov. Ukraine. – 2001. – P. 741-743.
15. Антюфеев А. В. Радиоспектрометр диапазона частот 85...115 ГГц для наблюдения мазерных линий на РТ-22 / Антюфеев А. В., Зубрин С. Ю., Королёв А. М., Мышенко В. В., Мышенко А. В., Шульга В. М. // Тезисы докладов 16 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, Украина. – 2006. – с. 944-945.
16. Антюфеев А.В. Спектральные наблюдения на радиотелескопе РТ-22 (КрАО) в 3-х мм диапазоне длин волн / Антюфеев А.В., Зубрин С. Ю., Мышенко В. В., Шульга В. М. // Тезисы докладов XXIV конференции «Актуальные проблемы внегалактической астрономии». – Пуццино, Россия. – 24-26 апреля 2007. – с. 1.

Список цитованої літератури

17. Arce H. Outflow-Infall Interactions in Early Star Formation and Their Impact on the Mass-assembling Process in L1228 / Arce H., Sargent A. // *Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol. 612, No. 1. – P. 342-356.
18. Gomez J. On the nature of the bipolar molecular outflow in AFGL 437 / Gomez J., Torrelles J., Estalella R., Anglada G., Verdes-Montenegro L., Ho P. // *Astrophysical Journal*. – 1992. – Vol. 397, No. 2. – P. 492-499.
19. Arce H. The Episodic, Precessing Giant Molecular Outflow from IRAS 04239+2436 (HH 300) / Arce H., Goodman A. // *Astrophysical Journal*. – 2001. – Vol. 554, No. 1. – P. 132-151.
20. Tafalla M. A Study of the Mutual Interaction between the Monoceros R2 Outflow and Its Surrounding Core / Tafalla M., Bachiller R., Wright M., Welch W. // *Astrophysical Journal*. – 1997. – Vol. 474, No. 1. – P. 329-345.
21. Tafalla M. Velocity Shifts in L1228: The Disruption of a Core by an Outflow / Tafalla M., Myers P. // *Astrophysical Journal*. – 1997. – Vol. 491, No. 2. – P. 653-662.
22. Martin H. CO emission from fragmentary molecular clouds - A model applied to observations of M17 SW / Martin H., Hills R., Sanders D. // *MNRAS*. – 1984. vol. 208, No 1, P. 35-55.
23. Zhang Q. Search for CO Outflows toward a Sample of 69 High-Mass Protostellar Candidates. II. Outflow Properties / Zhang Q., Hunter T., Brand J. et al. // *Astrophysical Journal*. – 2005. – 625, No 2. – P. 864-882.
24. Kim K. Occurrence Frequency of CO Outflows in Massive Protostellar Candidates / Kim K., Kurtz S. // *Astrophysical Journal*. – 2006. – Vol. 643, No 2. - P. 978-984.

АНОТАЦІЯ

Антюфєєв О. В. Біполярні молекулярні потоки в областях зореутворення IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. Радіоастрономічний інститут НАН України, Харків, 2015.

Дисертація присвячена вивченню низькошвидкісних складових біполярних потоків у масивних областях зореутворення. Проведено картографування областей зореутворення великої маси IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1 у лінії молекули ^{13}CO ($J=1-0$). Встановлено, що в цій лінії біполярні потоки проявляються у вигляді систематичного зміщення спектру лінії зі зміною відстані від центру хмари.

Розроблено новий метод визначення параметрів низькошвидкісної складової біполярних потоків у молекулярних хмарах. Метод ураховує всі можливі прояви біполярного потоку в спектрах ліній – асиметрію спектрів ліній, наявності крил ліній і систематичне зміщення всього профілю лінії уздовж осі потоку. За допомогою цього методу розраховані параметри біполярних потоків в об'єктах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 і G122.0-7.1.

Показано, що маси низькошвидкісних складових потоків набагато більші мас високошвидкісних, а їх енергії подібні. Розраховано співвідношення між масами біполярних потоків і масами молекулярної хмари. Знайдено, що відношення мас біполярних потоків до мас молекулярної хмари може сильно різнитись від об'єкта до об'єкта (30 % – в об'єкті G122.0-7.1, 76% – в об'єкті IRAS 22267+6244).

Радіотелескоп РТ-22 обладнано новим високочутливим приймальним комплексом для астрономічних спостереження в діапазоні частот 85...115 ГГц. Визначені параметри радіотелескопа РТ-22 на частоті 110,2 ГГц.

Ключові слова: зореутворення, молекулярні біполярні потоки, приймальні системи, радіотелескоп

АННОТАЦІЯ

Антюфеев А. В. Біполярные молекулярные потоки в областях звездообразования IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 и G122.0-7.1. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, 2015.

Диссертация посвящена изучению низкоскоростных компонентов биоплярных потоков в массивных областях звездообразования. Проведено картографирование областей звездообразования большой массы IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 и G122.0-7.1 в линии молекулы ^{13}CO ($J=1-0$). Установлено, что в этой линии биоплярные потоки проявляются в виде систематического сдвига спектра линии с изменением расстояния от центра облака.

Представлен новый метод расчета параметров низкоскоростной части биоплярных потоков в молекулярных облаках. Метод учитывает все возможные проявления биоплярного потока в спектрах линий – асимметрию профилей линий, наличия крыльев линий и систематический сдвиг всего профиля линии вдоль оси потока. С помощью этого метода рассчитаны параметры биоплярных потоков в источниках IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 и G122.0-7.1.

Показано, что массы низкоскоростной части потоков намного больше масс высокоскоростной части, а их энергии сравнимы. Рассчитаны соотношения между массами биоплярных потоков и массами молекулярного облака. Показано, что отношение масс биоплярных потоков к массам молекулярного облака может сильно меняться от объекта к объекту (30 % – в источнике G122.0-7.1, 76% – в источнике IRAS 22267+6244).

Радіотелескоп РТ-22 оснащений новим приймальним комплексом для астрономічних спостереження в діапазоні частот 85...115 ГГц. Визначені параметри радіотелескопа РТ-22 на частоті 110,2 ГГц.

Ключевые слова: звездообразование, молекулярный биоплярный поток, приемные системы, радиотелескоп

ABSTRACT

Antyufeyev A. V. Bipolar molecular outflows in the star forming regions IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244, G122.0-7.1. – Manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences by specialty 01.03.02 – astrophysics, radio astronomy. Institute of Radio Astronomy of Ukrainian Academy of Sciences, Kharkov, 2015.

Thesis is devoted to the study of low velocity components of bipolar outflows in massive star-forming regions. Mapping of the high-mass star-forming regions IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 and G122.0-7.1 has been performed in the J=1-0 line of ^{13}CO . It has been found that a systematic drift of the line profiles are observed in those outflows. It varies monotonically with a distance from origin of outflows.

A new method for calculating the parameters of the low velocity bipolar outflows in molecular clouds is presented. The method takes into account all observed features of the bipolar outflow in the line spectra: asymmetry of line profiles, existence of line wings and systematic drift shift of the profile along the outflow axis. Parameters of bipolar outflows observed in the line of ^{13}CO (J=1-0) molecule in IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 and G122.0-7.1 sources, have been calculated with this method.

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. Masses of the low-velocity parts are much larger than the high-velocity parts of the bipolar outflow. The mass ratio of bipolar outflows to the masses of the molecular cloud can vary from object to object (30% – in the G122.0-7.1, 76% – in the IRAS 22267 + 6244).

Radio telescope RT-22 is equipped with a new receiving complex for astronomical observations in the frequency range of 85 ... 115 GHz. The parameters of the radio telescope RT-22 were determined at the frequency of 110,2 GHz.

Keywords: star forming region, molecular bipolar outflow, receiver systems, telescope.

Відповідальний за випуск Мищенко В. В.