

На правах рукопису

СІЛІЧ Сергій Олександрович

**Галактичні оболонки.
Числове моделювання методом тонкого
шару**

01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ 1997

AB 37.157

Дисертацією є рукопис
Робота виконана у Головній астрономічній обсерваторії
Національної Академії Наук України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Бісноватий-Коган Геннадій Семенович
(Інститут космічних досліджень РАН,
м. Москва)

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Бочкарьов Микола Геннадійович
(ДАШ Московського державного
університету, м. Москва)

доктор фізико-математичних наук, професор
Климшин Іван Антонович
(Прикарпатський університет,
м. Івано-Франківськ)

доктор фізико-математичних наук, професор
Конторович Віктор Мойсейович
(Радіоастрономічний інститут НАН України,
м. Харків)

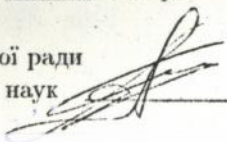
Провідна організація: Астрокосмічний центр ФІ РАН
м. Москва)

Захист відбудеться 28 березня 1997 року на засіданні Спеціалізованої
ради Д01.74.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України
(252650, Київ-22, Голосіїв), початок засідання о 9 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Головної астрономічної
обсерваторії Національної Академії Наук України.

Автореферат розісланий "17" лютого 1997 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
кандидат фізико-математичних наук



Гусева Н. Г.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00752012 (H)

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми.

Проведені наприкінці семидесятих років радіоогляди нашої галактики призвели до відкриття десятків великих оболонок та схожих на неповні оболонки структур, характерні розміри яких складають сотні і тисячі парсеків, а кінетичні енергії сягають $\sim 10^{53}$ ергів. Це відкриття дало поштовх новому осмисленню міжзоряного середовища (МЗС) як такого, що є динамічною системою, стан якої регулюється потужними локальними джерелами енергії.

Пізніше схожі об'єкти були виявлені у Великій та Малій Магеллановій Хмарах, Туманності Андромеди (М31), іншій розташованій поруч спіральній галактиці М33, неправильній галактиці Holmberg II (UGC 4305) та інших системах.

Екстремальним проявом такого роду структур є оболонки, що виникають при спалахах зореутворення в навколядерних зонах галактик. Загальна енергія, що може бути виділена при такому вибуху, сягає $10^{56} - 10^{57}$ ерг і, таким чином, наближується до енергетики квазарів. При цьому частота вибухів наднових у локальній області простору з характерними розмірами у декілька сотен парсеків досягає 0.1 - 1 НН/рік. Пов'язані з вибухами зореутворення оболонки та великомасштабні потоки газу виявляються у видимому ($H\alpha$), рентгенівському та радіодіапазонах і простежуються до відстані у декілька десятків кілопарсеків від ядер галактик.

Актуальність обраної теми обумовлена тим, що

- Оболонки, що розширюються, є фундаментальними структурами у розподілі МЗС в галактиках різних морфологічних типів.
- Фізичні причини, що призводять до виникнення оболонок і особливості їхньої еволюції в значній мірі визначають великомасштабну структуру, динаміку, енергетичний баланс МЗС, а, можливо, і загальний кругообіг речовини в галактиках.
- Для виявлення основних закономірностей у розвитку таких оболонок конче необхідне вивчення особливостей будови МЗС в галактиках різних морфологічних типів та порівняння великої кількості спостережень з результатами чисельного моделювання еволюції оболонок при різноманітних початкових умовах.
- Оскільки розміри оболонок, що спостерігаються, перевищують ха-

рактерні розміри неоднорідностей галактичних дисків, для їх правильного опису необхідне проведення тривимірних чисельних розрахунків, що одночасно беруть до уваги як неоднорідність розподілу газу, так і диференціальність обертання галактичних дисків та вплив загального гравітаційного поля галактики.

- Для проведення таких розрахунків та побудови на їх основі широкого спектра числових моделей необхідний розвиток універсального числового методу, що є відносно простим, не потребує дуже великих витрат комп'ютерного часу, але адекватно відображує основні закономірності цього явища.

Метою даної роботи є:

- Розвиток аналітичних та числових методів розрахунку динаміки багатовимірних оболонок, що виникають в неоднорідному МЗС під впливом потужних локальних джерел енергії.
- Вивчення основних закономірностей еволюції таких оболонок у галактиках різних морфологічних типів на базі великої серії числових експериментів. Побудова числових моделей цього явища та оцінка спостережуваних проявів оболонок у різних спектральних діапазонах. Дослідження можливого зв'язку оболонок з процесами стимульованого зорутворення.
- Порівняння результатів числового моделювання з наявними спостережуваними даними.

Наукова новизна роботи.

Незважаючи на значний прогрес у спостереженнях і велику кількість теоретичних досліджень, до цього часу не вдавалося побудувати загальну кількісну модель еволюції оболонок в галактиках. Передусім це пов'язано із величезною складністю наявних тривимірних гідродинамічних схем і неможливістю проведення на їхній базі великої кількості числових експериментів, які одночасно моделюють всі основні фізичні фактори, що визначають розвиток оболонок, а також велику кількість можливих початкових умов. Це є причиною того, що лише у дуже невеликій кількості робіт результати числового моделювання доводились до порівняння з конкретними спостережуваними даними і, тим більше, до аналізу великої сукупності цих даних. Новизна роботи полягає в тому, що

- Розвинуто відносно простий метод розрахунку багатовимірних ударних хвиль. На його основі побудований достатньо гнучкий числовий алгоритм. Це дозволило перейти до побудови масових числових моделей еволюції оболонок в галактиках різних морфологічних типів з великою кількістю початкових параметрів: темпу надходження енергії, параметрів міжзоряного середовища, кривих обертання та гравітаційних полів галактик. Вперше на спільній основі вивчені динаміка, морфологія та наведені оцінки основних спостережуваних параметрів *тривимірних* оболонок в галактиках різних морфологічних типів. Показана принципова можливість виникнення в оболонках, що розширюються, умов, які необхідні для переходу нейтрального водню в молекулярну форму та утворення молекулярних хмар - центрів утворення зір наступної генерації.
- Аналіз та порівняння результатів чисельного моделювання із спостереженнями зон із дефіцитом нейтрального водню в суміжних галактиках дозволили запропонувати новий метод усунення невизначеності при аналізі просторової орієнтації кутових моментів обертання галактик.
- Отримано нові точні аналітичні розв'язки рівнянь Компанейця для розповсюдження потужної ударної хвилі в експоненційній атмосфері, що переходить у галу постійної густини, та рівнянь руху оболонок в гравітаційних полях, зокрема рівняння руху самогравітуючої оболонки у полі випромінювання зір галактики. Аналіз отриманих розв'язків та проведені числові розрахунки показали, що на розвинутих стадіях еволюції оболонок динамічний вплив гравітації та протяжних галу малої густини набуває роль визначальних факторів еволюції. Тому для аналізу розвинутих стадій еволюції великих оболонок принципового значення набувають дані про загальний розподіл речовини у галактиках, зокрема параметри газових корон малої густини.
- У наближенні тонкого шару отримані аналітичні вирази, що відображають зміну параметрів пазирів з радіусом при степеневій залежності темпу енергії, яка надходить до порожнини, від часу. Показано, що у випадку, коли відомі два основних спостережуваних параметри - радіус та швидкість розширення оболонки - рентгенівська світність пазиря слабо залежить від параметра, що визначає зміну залежності темпу енергії, яка надходить до порожнини, від часу.

● Розглянуто еволюцію оболонок, що виникають у випадку асиметричного вибуху наднової. Числові моделювання проведено для двох ЗН, які найбільш ясно виявляють "бочкоподібну" структуру - ЗН 1006 та G296.5+10.0. Показано, що модель асиметричного вибуху, який містить більшість речовини, що викидається, поблизу екваторіальної площини, за умов неоднорідного навколишнього середовища надає можливість відтворити основні морфологічні особливості ЗН 1006. Морфологія радіозалишка G296.5+10.0 може бути результатом вибуху наднової в тунелі, який має густину, що зменшується вздовж осі симетрії Z, якщо точка вибуху розташована поза площиною симетрії навколишнього газу.

Апробація роботи

Основні результати дисертації доповідались на семінарах відділу "Фізика зірок та галактик" ГАО НАНУ та інших наукових установ СНД (ДАШ, ФІ РАН, АКЦ ФІ РАН, Інституту астрономії АН СРСР, Кафедри астрофізики ЛДУ, РІ НАНУ, АО Одеського університету, виїзному засіданні Відділення фізики та астрономії НАНУ), республіканських та всесоюзних нарадах та конференціях. На традиційних нарадах в Пушино до фізики міжзоряної речовини та активності галактичних ядер у 1985, 1987, 1989 та 1992 роках; Всесоюзній нараді "Сверхновые-89", Ленінград, 1989; Всесоюзній школі з космічної фізики, Суздаль, 1990; конференції, присвяченій 225-ій річниці Астрономічної обсерваторії Львівського університету, Львів, 1994. На міжнародних конференціях, Радянсько-американській зустрічі по астрофізиці великих енергій, Тбілісі, 1989; конференціях "Астрофізика та космологія після Гамова", Одеса, 1994; "Современные проблемы астрофизики", Москва, 1996; ESO/EIPC Workshop "SN 1987A and other supernovae". Isola d'Elba (Italy), 1990; CTS Workshop N1. "Evolution of Interstellar Matter and Dynamics of Galaxies", Prague, 1991; IAC-RGO meeting "Violent Star Formation. From 30 Doradus to QSOs", Spain, 1993; First UNAM-CRAY Supercomputing Workshop "Numerical Simulations in Astrophysics: Modelling the Dynamics of the Universe", Mexico, 1993; The "Guillermo Haro" International Workshop "Starburst and AGNs". Mexico, 1996.

Основні результати дисертації надруковані у 27 наукових статтях в провідних астрономічних виданнях. Зокрема, у двох великих оглядових роботах.

Особистий внесок дисертанта

Автору належить розвиток методу розрахунку багатовимірних оболонок, заснованого на наближенні тонкого шару, та його послідовне застосування до вивчення крупних галактичних оболонок, що пов'язані із областями активного зореутворення – нових астрономічних об'єктів, які були відкриті наприкінці 70-х років. Роботи [9, 24] базуються на підході запропонованому Г.С. Бісноватим-Коганом та С.І. Блінніковим для розрахунків адіабатичних ударних хвиль з аксіальною симетрією. Авторіві належить узагальнення алгоритму на випадок радіаційних ударних хвиль, врахування руху навколишнього середовища, зовнішнього гравітаційного поля та безупинного надходження енергії до порожнини. В роботах [13, 14, 16, 22, 27] розрахунки виконані С.Я. Машенком. Автору належать постановка задач, спільне обговорення та інтерпретація результатів. В решті спільних робіт розрахунки виконані самим автором. В цих роботах він також приймав активну участь в обговоренні та інтерпретації результатів. Постановка задач [7, 8, 17, 23] належить авторіві.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, доповнення та висновків. Загальний об'єм дисертації складає 285 сторінок, включаючи 44 рисунки, 10 таблиць та 298 назв бібліографічних джерел. Кожна глава дисертації закінчується коротким висновком, де сформульовані результати проведених в данному розділі досліджень.

Зміст дисертації

Вступ.

У вступі відображено актуальність теми дисертації, сформульовано мету дослідження, наукову новизну отриманих результатів та основні положення, що виносяться на захист. Приведений перелік нарад, семінарів та конференцій, на яких отримані в дисертації результати пройшли апробацію, та перелік основних публікацій, де ці результати були надруковані. Подано стислий зміст дисертації.

1. Огляд проблеми.

Спостережувані дані. Перша глава за характером оглядова. Вона містить обговорення колективних ефектів, що виникають під час взаємодії великих угруповань зір великої світності з навколишнім середовищем.

Підкреслюється значення цих ефектів у розвитку великомаштабної структури та в енергетичному балансі МЗС, переході міжзоряної речовини з дифузного атомарного стану в густу молекулярну фазу та стимулюванні процесу утворення зір наступної генерації, перерозподілу збагаченого важкими елементами газу, виникненні та підтримці гарячого галактичного гало.

Середину 1970-х років можна охарактеризувати як новий етап у вивченні газової підсистеми галактик. Це є час переходу від спостережень окремих цікавих областей до систематичного вивчення розподілу та кінематики нейтрального водню на базі спостережень з високою просторовою та частотною роздільною здатністю. Нові уявлення про міжзоряне середовище як *динамічну систему*, що регулюється сукупністю потужних локальних джерел енергії, заступають розвинену наприкінці 60-х років *рівноважну* двофазну модель. Іноді динамічну модель МЗС для більшої наочності називають моделлю "вируючих галактичних дисків". Розвиток цієї моделі потребує вивчення складних газодинамічних процесів, що виникають при колективній взаємодії масивних зір з навколишнім середовищем та вивчення загального кругообігу речовини в галактиках. Визначальною рисою таких великомаштабних рухів є їх складна геометрична структура.

Визначення та ототожнення оболонок у нашій галактиці є дуже складною спостережною задачею, що ускладнюється впливом потужної фонові радіації галактичного диска. Вивчення подібних до оболонок структур у розташованих поруч галактиках має суттєві переваги. Тому природно, що з удосконаленням приймачів випромінювання та підвищенням просторової роздільної здатності радіотелескопів, центр тяжіння спостережних програм змістився до вивчення розташованих поруч галактик. Лише після відкриття великої кількості областей з дефіцитом нейтрального водню в галактиках М31, М33, НопІ та інших, що належать до групи галактик М81, а також гігантських та надгігантських оболонок іонізованого водню в Великій та Малій Магелланових Хмарах стало остаточно зрозуміло, що

- Великі оболонки, що розширюються, є характерною структурною одиницею, яка визначає морфологію МЗС як у великих спіральних, так і в іррегулярних карликових галактиках. Найбільш імовірно, що походження більшої частини таких оболонок пов'язане з утворенням компактних угруповань масивних зір та подальшим колективним

впливом спалахів наднових на навколишній газ.

- Оболонки, що спостерігаються, являють собою складні тривимірні утворення. Для їх адекватного опису необхідний розвиток тривимірних газодинамічних схем та побудова числових моделей з урахуванням великого розкиду початкових параметрів як у межах однієї галактики, так і серед галактик різних морфологічних типів.

Теорії виникнення та еволюції оболонок. Наведений короткий історичний огляд розвитку теорії виникнення та еволюції великих галактичних оболонок. Визначено два основних підходи до проблеми. Перший ґрунтується на концепції одиничних, можливо пекулярних джерел енергії. Інший пов'язує походження таких структур з колективною дією на навколишній газ компактних угруповань масивних зір (див. огляди Теноріо-Тагле і Боденхеймера, 1988 та [1]).

Автор дотримується другої точки зору і вважає, що походження більшої частини великих порожнин, що заповнені гарячим газом та оточені оболонками нейтрального чи іонізованого водню, пов'язано з колективною дією на оточуючий газ зоряного вітру та спалахів НН в компактних угрупованнях масивних зір.

Перші двовимірні числові розрахунки, що моделюють розвиток галактичних оболонок, виконані Томісакою та Ікеучі в 1986 році і набули подальшого розвитку в роботах цілого ряду дослідників. Двовимірний числовий алгоритм, що заснований на наближенні тонкого шару, був запропонований Бісноватим-Коганом та Блінніковим (1982) і потім розвинутий в наших спільних роботах.

Вплив диференціального обертання галактики на еволюцію оболонок у двовимірному наближенні вперше був розглянутий в роботі Теноріо-Тагле та Палоуша (1987).

Характерні розміри оболонок, проте, є такого ж порядку й навіть перевищують характерні масштаби неоднорідності в розподілі міжзоряної речовини вздовж Z-координати. Тому для побудови адекватної фізичної моделі явища необхідне проведення тривимірних числових розрахунків, що є дуже складною проблемою. Метод розв'язання цієї задачі, що заснований на наближенні тонкого шару, розвинутий незалежно в наших [11, 12] та Я.Палоуша (1990, 1992) роботах.

2. Одновимірні сферично-симетричні оболонки.

Друга глава присвячена розгляду задач із сферичною симетрією. Коротко розглянуто основні результати *автомодельної теорії точкового вибуху*. Формулюються фізичні принципи та базові рівняння наближення тонкого шару, що впливають з цієї теорії.

Наближення тонкого шару. Метод ґрунтується на двох спрощуючих припущеннях. Перше полягає в тому, що весь захоплений ударною хвилею газ вважається зосередженим у нескінченно тонкому шарі безпосередньо за фронтом ударної хвилі. Друге спрощення пов'язане з високою температурою нагрітого ударною хвилею газу та швидким розсмоктуванням вишкочаючих у ньому неоднорідностей. Воно полягає в тому, що тиск газу всередині порожнини вважається однорідним у всіх випадках, коли впливом магнітних полів можна знехтувати. У цьому випадку нелінійні рівняння у часткових похідних, що описують рух ударного фронту, можна звести до системи звичайних диференціальних рівнянь. Ця система рівнянь описує закони збереження маси, імпульсу та енергії оболонки, що виникає за фронтом ударної хвилі (див., напр., Імшеннік, 1977). Безумовно, у цьому наближенні втрачається інформація про розподіл газодинамічних величин всередині залишка і використовується середнє значення внутрішнього тиску P_m . Це наближення, однак, дозволяє описати такі важливі властивості міжзоряних оболонок, як їх морфологія, швидкість руху та розподіл поверхневої густини, а при деяких додаткових припущеннях оцінити й інші спостережні прояви міжзоряних бульбашок.

Рух оболонок у зовнішньому гравітаційному полі. Однією з відзнак космічної газодинаміки є вплив гравітації на рух міжзоряного газу. Тому далі розглядається рух оболонок, що вишкочають за фронтами великомасштабних ударних хвиль, у зовнішньому гравітаційному полі.

Показано, що сформульована у наближенні тонкого шару система рівнянь зводиться до одного лінійного неоднорідного рівняння першого степеня і знайдений його розв'язок. Аналіз отриманого розв'язку приводить до висновку про наявність двох режимів руху. У першому випадку вплив зовнішнього гравітаційного поля є несуттєвим. У другому гравітаційний вплив зоряної компоненти настільки великий, що швидкість руху оболонки різко зменшується, а ударна хвиля затухає.

Динаміка оболонок, що рухаються під впливом тиску випромінювання зір поля. Розглядається рух оболонки, обумовлений різ-

ністю потоків фотонів, що попадають в оболонку зсередини порожнини та від розташованих поза оболонкою зір. Така можливість виникнення велетенських оболонок, що розширюються, була запропонована Елмергіном і Чіангом (1986). Вони отримали рівняння руху оболонки та його числовий розв'язок. Було показано, що за будь-яких значень густини енергії випромінювання U , тиску зовнішнього газу P_c та початкового числа Маха M_0 існують такі початкові розміри оболонки, що її швидкість безперервно зростає. Для великих оболонок цей висновок здається не зовсім обґрунтованим через те, що їх рух в значній мірі визначається впливом гравітації. Ми отримали аналітичний розв'язок задачі про рух сферичних оболонок під впливом тиску випромінювання зір поля з урахуванням їхньої самогравітації. Аналіз отриманого розв'язку показує, що кінцева швидкість розширення самогравітуючих оболонок завжди прямує до нуля, що принципово змінює отримані раніше результати. Фаза прискорення може виникнути тільки в тих випадках, коли густина енергії поля випромінювання галактики U перевищує критичне значення $U_c \approx 2 \times 10^{-11}$ ерг см $^{-3}$. Це значення набагато перевищує середню густину енергії випромінювання в нашій галактиці. Тому для таких систем як наша галактика механізм прискорення оболонок тиском випромінювання зір поля не є ефективним.

Оболонки, що видуваються зоряним вітром. Теорія взаємодії зоряного вітру постійної потужності з навколiшнім газом була розвинута у 70-х роках (див. монографію Лозінської, 1986). При аналізі спостережних даних було встановлено, однак, що темп втрати маси та потужність енергії, що виділяється одиночною зорею чи компактним скупченням зірок, змінюється з часом. Це надає теорії додаткового вільного параметра. Досліджується вплив цього параметра на динаміку та спостережувані параметри оболонок, що виникають навколо джерела зі степенною $L = L_0 t^\epsilon$ залежністю потужності енергії від часу. У наближенні тонкого шару сформульовані рівняння, що описують динаміку таких оболонок в однорідному середовищі. Знайдені їх аналітичні розв'язки, які співпадають з отриманими раніше Острайкером і Мак-Кі (1988) іншим методом. Зростання темпу надходження енергії в порожнину з часом призводить до суттєвої зміни швидкості розширення оболонки. Змінюється також залежність температури газу, що знаходиться всередині порожнини, від часу. При $\epsilon < 0.75$ вона зменшується, а при $\epsilon > 0.75$ зростає. Це призводить до зміни темпу випаровування оболонки та спостережуваних параметрів туманності. Виникають питання: наскільки можуть відрізнятися

світності оболонок, якщо їх кінематичні параметри (радіуси та швидкості) відомі? Чи не можна пояснити розбіжності між стандартною теорією та рентгенівськими емісіями, що виявлені у розташованих у Великій Магелановій Хмарі зонах III, змінністю колективного зоряного вітру від розташованих всередині порожнини вір? Розрахунки показують, однак, малу залежність рентгенівської світності від параметра, що визначає зміну потужності зоряного вітру, якщо радіус і швидкість розширення оболонки фіксовані. Таким чином, пояснити надлишки рентгенівської емісії від туманностей N51D, N44 та інших зростанням темпу надходження енергії в порожнину з часом не вдається.

2. Двовимірні оболонки.

Третя глава дисертації присвячена теорії розповсюдження ударних хвиль в стратифікованих середовищах.

Наближення Компанейця. Розглянуто відоме *рівняння Компанейця* та його розв'язок для точкового вибуху в середовищі з густиною, що змінюється за експоненційним законом. Знайдено новий аналітичний розв'язок цього рівняння у випадку розповсюдження адіабатичної ударної хвилі у середовищі, в якому густина змінюється за законом

$$\rho = \rho_0 [\exp(-z/Z_0) + \alpha] \quad (1)$$

і відмінна від нуля на нескінченності. Розв'язок, що отриманий, описує структуру фронту ударної хвилі у параметричному вигляді. Він поділяється на три різних вирази для областей, що примикають до верхнього, нижнього полюсів оболонки та до її екватора. Виявилось, що описати середню (примикаючу до екватора) частину поверхні можна тільки при відмінній від нуля функції $b(\eta)$, яка виникає при розв'язку рівняння Компанейця методом розподілу змінних. Виникнення цієї "проміжної" області не є очевидним, оскільки сферично-симетричні початкові умови потребують $b(\eta) = 0$.

Аналіз отриманого розв'язку показує, що при будь-яких малих, але відмінних від нуля α поведінка ударної хвилі якісно інша порівняно з випадком чисто експоненційного розподілу густини. Розміри охопленої ударною хвилею порожнини вздовж осі Z та в площині $z = 0$ стають порівняними. Їхня різниця при великому "часі" $y \rightarrow \infty$ прямує до постійної

величини

$$Z_{top}(y) - r_0(y) \rightarrow 2Z_0/\sqrt{\alpha}, \quad (2)$$

а відношення - до одиниці. "Прорива" хвилі на безмежність не настає.

Наближення тонкого шару для аксіально-симетричних течій. Проведено узагальнення метода тонкого шару на випадок двовимірних вісесиметричних течій та дано опис побудованого на його базі числового алгоритму. Проведені для тестування числової схеми розрахунки показують цілком зодовільну згоду з наявними аналітичними апроксимаціями та результатами розрахунків повними різнцевими схемами.

Аксіально-симетричні залишки наднових. Аналіз радіоастрономічних даних свідчить про те, що у більшості залишків наднових форма відрізняється від сферичної. Велика кількість залишків має аксіальну симетрію з характерними рисами "бочкоподібної" структури: вісю симетрії, малою яскравістю оболонок в полярних областях та зміною радіояскравості вздовж оболонки. Така морфологія спостерігається як у молодих, так і у старих об'єктів. У деяких випадках ці риси виявляються також в оптичному та рентгенівському діапазонах. Аналіз різних можливих механізмів виникнення складної морфології ЗН є таким чином досить актуальною задачею.

Нами розглянута еволюція оболонок, що виникають при асиметричному вибуху надгової і при сферичному вибуху зорі у порожнині з циліндрично-симетричним розподілом навколозоряної речовини. Побудовані числові моделі еволюції двох ЗН з найбільш чіткими ознаками аксіальної симетрії: залишка історичної надгової 1006 року (G327.6+14.6) та об'єкту G295.5+10.0. Асиметрія вибуху моделювалась залежністю поверхневої густини викинутої речовини σ_{ej} від лагранжевої координати λ . У початковий момент часу ця залежність мала вигляд

$$\sigma_{ej} = \sigma_0(A \sin^2 \lambda + B \sin \lambda + C). \quad (3)$$

Розрахунки показують, що модель асиметричного вибуху з концентрацією викиненої речовини до екваторіальної площини попередника надгової в неоднорідному МЗС дає змогу відтворити основні морфологічні особливості ЗН 1006, що спостерігаються. Залишок набуває характерної форми "яблука" з заглибленнями поблизу полюсів. Розподіл поверхневої густини вздовж оболонки має максимум в екваторіальній площині і зберігається неоднорідним на протязі великого часу. Морфологія радіо-

залишка $G296.5+10.0$ може бути наслідком сферичного вибуху надкової в тунелі з густиною, що зменшується вздовж осі Z . Точка вибуху при цьому повинна бути зміщена відносно площини симетрії навколишнього газу.

Спалахи зореутворення в карликових галактиках. Розглядаються пізні стадії еволюції оболонки, що виникають при спалахах зореутворення в центральних областях карликових галактик з протяжними газовими коронами. Ударна хвиля починає прискорюватися, коли її розміри вздовж осі Z досягають 2 - 3 характерних масштабів неоднорідності. В оболонці починає розвиватися Релей-Тейлорівська нестійкість, і вона розвалюється на окремі фрагменти. Гарячий газ, що знаходиться всередині порожнини, виривається у навколишнє середовище. Всередину порожнини розповсюджується хвиля розвантаження, що вирівнює тиск газу всередині порожнини й у навколишньому середовищі.

В останні роки з'явилися, однак, переконливі дані на користь того, що навколо дисків галактик існують протяжні газові корони малої густини. Розподіл густини галактичного газу, що розглядався у попередніх роботах (де до уваги бралася тільки дискова компонента) є, таким чином, вельми великою ідеалізацією. Врахування динамічного впливу газової корони є природним наступним кроком у розвитку газодинамічних моделей активних галактик.

Розподіл газу в галактиці задавався спрощеною моделлю Томісаки і Іксучі (1988) і складався з трьох ізотермічних компонент. Перша та друга моделюють нейтральну дискову та іонізовану проміжну компоненти. Третя має високу дисперсію хаотичних швидкостей і моделює корону галактики. Гравітаційна модель галактики включає гравітаційне поле темної речовини. Розрахунки показують, що на пізніх стадіях еволюції динамічний вплив газового гало та гравітаційних полів стає вирішальним. Газова підсистема галактики може залишатися гравітаційно зв'язаною навіть у тому випадку, коли швидкість оболонки, що "прориває" галактичний диск, перевищує параболічну. Пошук газових гало малої густини навколо карликових галактик становить, таким чином, принципово важливу спостережну задачу.

Тривимірні оболонки.

Основні рівняння. Формулюються основні рівняння, які описують динаміку й дозволяють оцінити спостережні прояви *тривимірних* оболонки,

що формуються за фронтами ударних хвиль у МЗС. На базі цих рівнянь побудований числовий алгоритм, який бере до уваги неоднорідність МЗС, диференціальне обертання галактичного диска, вплив гравітації. Наближено враховується внутрішня структура залишка. Дискутуються засоби опису спостережуваних параметрів оболонки: їх морфології, побудови зображень у картинній площині галактики, оцінки болометричної та рентгенівської світлостей. Для розрахунків вся оболонка розбивається на N лагранжевих елементів. Рух кожного елемента описується системою з 7 звичайних нелінійних диференціальних рівнянь, які виражають закони збереження маси та імпульсу та зміну координат лагранжевого елемента з часом. В кожний момент часу розраховуються площа поверхні кожного лагранжевого елемента, об'єм та тиск всередині порожнини. Для розрахунку тиску використовуються закон збереження енергії та рівняння стану газу. Рух всієї оболонки описується системою з $7N+1$ звичайних диференціальних рівнянь. Ця система рівнянь розв'язується чисельно, за допомогою методу Адамса до 12-го порядку.

Адіабатичні залишки наднових. Для перевірки схеми та демонстрації її можливостей розглянуто рух адіабатичної ударної хвилі в речовині з еліпсоїдальним розподілом густини та рух в однорідному середовищі ударної хвилі, що має початкову форму тривісного еліпсоїда.

Розповсюдження оболонки у МЗС, яке містить малі холодні згущення. В абсолютній більшості робіт, що були надруковані, еволюція міжзоряних оболонок розглядалась в однорідному (без урахування міжзоряних хмарок) МЗС. Спостереження, однак, вказують, що дифузні міжзоряні хмарки з радіусами 2-5 пк та концентрацією частинок $n \sim 10 \text{ cm}^{-3}$ можуть містити суттєву частку маси міжзоряного газу, хоч і займають дуже малу частину об'єму галактики. Всередині порожнини такі хмарки стають додатковим джерелом маси й суттєво впливають на енергетичний баланс та спостережувані параметри оболонки. В дисертації розглядається МЗС, яке складається з двох компонентів - дифузного газу та щільних сферичних хмарок з радіусами R_{cl} , густинами ρ_{cl} та фактором заповнення за масою f_M . Густина газу та величина f_M є функціями трьох просторових координат. Враховуються випаровування холодної щільної оболонки, випаровування та гідродинамічне руйнування хмарок, які проникають всередину порожнини. Темп випаровування хмарок і оболонки розраховувався з використанням класичної теорії теплопровідності. Використовуючи середню просторову густину числа хмарок і приймаючи

до уваги стискання хмарок великим тиском всередині порожнини, можна знайти критичний радіус оболонки, починаючи з якого темп випаровування хмарок перевищує темп випаровування оболонки:

$$R_{s,cr} = 2R_{cl} \sqrt{\frac{1}{f_M} \frac{R_{cl}}{R_{cl,s} < \rho_l >} \frac{\rho_{cl}}{}} = 2R_{cl} \left(\frac{P_{in}}{P_{ext}} \right)^{1/6} \left(\frac{\rho_{cl}}{f_M < \rho_l >} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Для типових для МЗС параметрів величина $R_{s,cr}$ заключена у межах 50 - 100 пк. Це джерело надходження маси у порожнину вимикається, коли поверхнева густина оболонки перевищує поверхневу густину хмарок і останні починають "застрявати" в оболонці.

Як основні механізми динамічного руйнування хмарок розглядалися гідродинамічні нестійкості, що розвиваються у зовнішніх шарах хмарок. Темп випаровування перевищує темп надходження маси за рахунок гідродинамічного руйнування хмарок тоді, коли температура навколишнього газу перевищує критичну.

$$T_{cr} \simeq 2.5 \times 10^6 \left[\frac{n_{in}}{\beta} \frac{R_{cl}}{1 \text{ pc}} \frac{V_r}{100 \text{ km s}^{-1}} \right]^{2/5} \left(\frac{\rho_{cl}}{\rho_{in}} \right)^{1/5} \left(\frac{P_{ext}}{P_{in}} \right)^{1/15} \text{ K}. \quad (5)$$

Тут n_{in} , P_{in} густина й тиск розрідженого газу всередині порожнини, V_r - швидкість його руху, P_{ext} - тиск зовнішнього газу, β - постійна, що визначає ефективність гідродинамічного обдирання зовнішніх шарів хмарок. Порівняння з числовими розрахунками приводить до значення $\beta \geq 10$. Це означає, що випаровування хмарок домінує у внутрішніх, гарячих шарах порожнини, а гідродинамічні нестійкості у зовнішніх, холодних (де температура нижче приблизно $\sim 10^6 \text{ K}$).

Підвищення густини газу всередині порожнини за рахунок випаровування й руйнування хмарок веде до збільшення болометричної світності бульбашки. На ранніх стадіях еволюції рентгенівська світність також підвищується. Додаткове надходження маси призводить, однак, до того, що температура у зовнішніх шарах порожнини стає нижче за температуру відсікання рентгенівського випромінювання ($\sim 5 \times 10^5 \text{ K}$). Завдяки тому, що в цих шарах зосереджена основна частка розташованого всередині газу, це веде до різкого падіння рентгенівської світності. Внаслідок цього максимальне значення рентгенівської світності при наявності хмарок підвищується, але тривалість рентгенівської фази зменшується.

Для нашої галактики розрахунки проведені для галактоцентричних

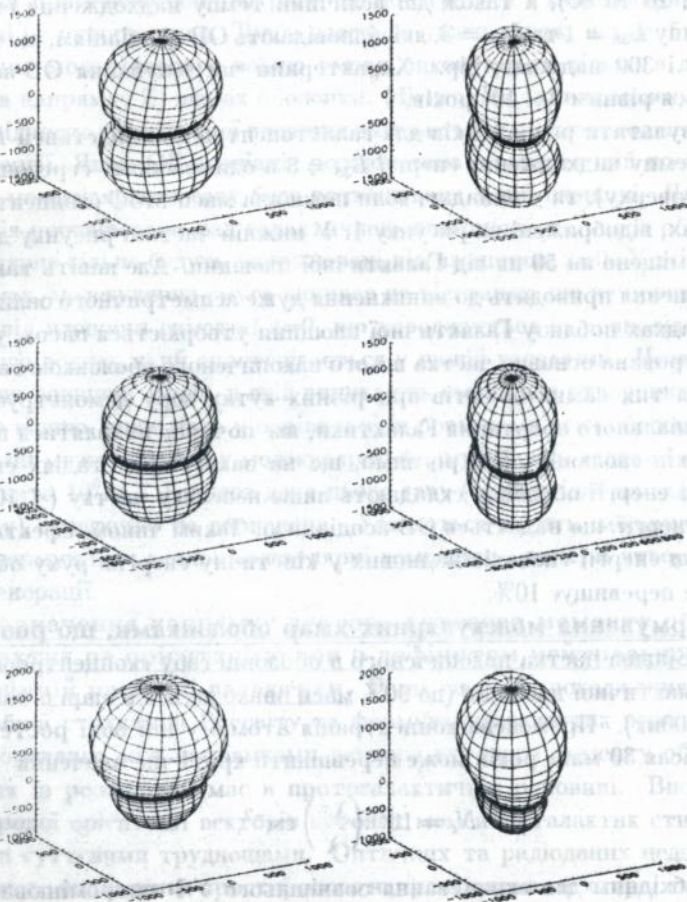


Рисунок 1: Форма оболонок при різних кутах зору спостерігача. Зверху - однофазне середовище без згущень, далі - половина маси МЗС сконцентрована у міжзоряних хмарках. Знизу - джерело енергії розташоване у 50 пк над площиною Галактики.

відстаней $R = 5, 8.5$ та 15 кпк і різних положень ОВ-асоціації відносно галактичної площини $z_0 = 0$ та 50 пк. Розглядалися два склади МЗС (однорідне з $f_M = 0$ та з фактором заповнення хмарками за масою $f_M = 0.5$), три значення параметра β , що визначає темп руйнування хмарок ($\beta = 10, 20$ та ∞), а також дві величини темпу надходження енергії в порожнину $L_{38} = 1$ та $L_{38} = 3$, які відповідають ОВ-асоціаціям, що містять біля 100 і 300 наднових зір. Характерний час існування ОВ-асоціації приймався рівним 3×10^7 років.

Результати розрахунків для галактоцентричних відстаней $R = 8.5$ кпк та темпу надходження енергії $L_{38} = 3$ в однофазному середовищі без хмарок (зверху), та у випадку, коли половина маси МЗС сконцентрована в хмарках, відображені на рисунку 1. У нижній частині рисунку джерело енергії зміщено на 50 пк від Галактичної площини. Але навіть таке невелике зміщення приводить до виникнення дуже асиметричного залишку. У всіх випадках поблизу Галактичної площини утворюється пасок, у якому сконцентрована основна частка всього накопиченого оболонкою газу. Зображення тих самих об'єктів при різних кутах зору демонструє вплив диференціального обертання Галактики, яке починає виявлятися після 10 млн. років еволюції. Підкреслимо, що на заключних стадіях еволюції кінетичні енергії оболонок складають лише невелику частку ($\leq 10\%$) загальної енергії, що надається ОВ-асоціацією. Таким чином, ефективність переробки енергії спалахів наднових у кінетичну енергію руху оболонок ніколи не перевищує 10% .

Формування молекулярних хмар оболонками, що розширюються. Більша частка накопиченого в оболонці газу сконцентрована поблизу Галактичної площини (до 90% маси знаходиться в шарі з напівтовщиною 200 пк). Променева концентрація атомів у цій зоні росте і приблизно після 30 млн. років може перевищити критичне значення

$$N_c = 10^{21} \left(\frac{\chi_{\odot}}{\chi} \right) \text{ см}^{-2}, \quad (6)$$

що є необхідним для екранування зовнішнього УФ випромінювання та переходу газу, який сконцентрований в оболонці, у молекулярну форму. Умови, що є необхідними для утворення молекулярного водню, однак, реалізуються тільки у внутрішніх областях Галактики. У наших розрахунках - на відстанях 5 та 8.5 кпк від центра Галактики. На відстані $R=15$ кпк від центра променева концентрація не досягає критичного зна-

чення. Умов для утворення молекулярних хмарок у оболонках не виникає. Можливість утворення молекулярного газу також залежить від відстані джерела енергії до Галактичної площини. Якщо ОВ-асоціація зміщена від площини $z=0$ на відстань, що перевищує приблизно 100 пк, то критичне значення променевої концентрації не досягається і молекулярний газ в оболонці не утворюється. Треба взяти до уваги також, що необхідні для утворення молекулярного водню умови виконуються тільки в дуже вузьких (в напрямку Z) шарах оболонки. Місцезнаходження молекулярного кільця відносно галактичної площини залежить від місцезнаходження джерела енергії. Якщо ОВ-асоціація розташована у галактичній площині, то і смуга молекулярного газу буде розташована у цій площині. Якщо ОВ-асоціація розташована над галактичною площиною, то пасок оболонки і молекулярне кільце будуть розташовані під площиною $z=0$. У всіх випадках, однак, молекулярна смуга виникає на відстанях, що не перевищують 100 пк від площини симетрії $z=0$, що узгоджується із розподілом молекулярного водню, який спостерігається у нашій галактиці. Незважаючи на те, що товщина смуги, в якій виникають умови для утворення молекулярного водню, дуже мала у порівнянні із розмірами всієї оболонки, маса газу, який може перейти у молекулярну форму, досить велика і може перевищувати $10^6 M_{\odot}$. Кінцева доля цього газу (який осідає на галактичну площину) остаточно не визначена. Уявляється досить імовірним, що з нього формуються великі молекулярні комплекси - центри утворення зір нової генерації.

Визначення напрямку вектора кутового моменту обертання галактик за орієнтацією зон з дефіцитом нейтрального водню у картинній площині галактики. Різні сценарії походження великомасштабної структури Всесвіту та формування галактик передбачають різну кореляцію між напрямками вектора кутового моменту обертання галактик із розподілом мас в протогалактичній речовині. Визначення просторової орієнтації векторів кутових моментів галактик стикається, однак, з суттєвими труднощами. Оптичних та радіоданих недостатньо для повного визначення просторового напрямку цього вектора, який може бути орієнтованим по відношенню до променя зору чи під кутом $i' = i$, чи під кутом $i' = 180^\circ - i$, де i - кут нахилу галактики.

Нами запропонований новий метод усунення цієї невизначеності, який ґрунтується на ефекті спотворення форми оболонок диференціальним обертанням галактики і є незалежним від будь-яких додаткових при-

пушень (про напрямок закручення спірального візерунка галактики, наявність галактичного балджа тощо). Наш метод потребує тільки вивчення орієнтації "дір" у розподілі нейтрального водню і, таким чином, є найбільш прямим засобом усунення вказаної вище невизначеності.

Розрахунки були проведені для галактик двох вкрай різних морфологічних типів: великої спіральної системи M31 та неправильного карлика HoII (UGC 4305). У розрахунках використовувався розвинутий нами алгоритм, який був доповнений процедурою числової проекції оболонок і розрахунку розподілу променевої концентрації HI в картинній площині галактики.

Для галактики HoII розрахунки були проведені для трьох значень галактоцентричної відстані (2; 4 та 6 кпк) та двох значень темпу надходження енергії в порожнину $(0.1 \text{ та } 0.3) \times 10^{38} \text{ ерг с}^{-1}$. Для кожного значення галактоцентричної відстані, темпу надходження енергії та позиційного кута, що визначає місцезнаходження джерела енергії, через кожні 20 млн. років розраховувались мапи розподілу променевої концентрації HI. Контур діри апроксимувався еліпсом. Для визначення орієнтації діри розраховувався кут φ між великою віссю еліпса та напрямком на галактичний центр. Ця процедура виконувалась для обох можливих положень вектора кутового моменту й повторювалась для різних значень кута нахилу галактики $i = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ і 80° . Максимальні розміри оболонок наприкінці розрахунків складали 1.7 кпк у діаметрі та 2.6 кпк у напрямку нормальному до галактичної площини. Відношення малої та великої осей еліпсів було у межах $0.5 \leq b/a \leq 0.9$.

В галактиці M31 як OB-асоціації, так і області з дефіцитом HI, сконцентровані у відносно вузькому інтервалі галактоцентричних відстаней. Тому розрахунки були виконані тільки для двох відстаней від центра галактики: $R = 10$ кпк і $R = 15$ кпк. Передбачалось, що темп надходження енергії складає $(0.25, 0.5 \text{ та } 1.0) \times 10^{38} \text{ ерг с}^{-1}$. Це відповідає 25 - 100 вибухам наднових за час життя OB-асоціації, що складав 30 млн. років. Проекції оболонок на картинну площину будувались через кожні 5-10 млн. років. Процедура проектування була виконана для чотирьох значень кута нахилу галактики $i = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ та 77.5° . В цій галактиці оболонки мають значно більші розміри у напрямку Z та значно більше спотворюються диференціальним обертанням галактичного диска. Їхні максимальні розміри у напрямку Z складали 4 кпк, а в галактичній площині лише 0.5 кпк. Відношення малої та великої осей еліпсів складало $0.1 \leq b/a \leq 0.9$.

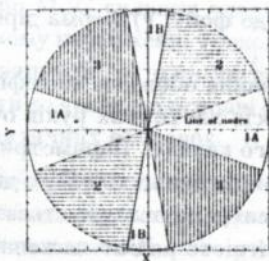


Рисунок 2: Схематичне розташування різних зон "вірогідності" в площині галактики.

Результати розрахунків викривають наявність трьох різних зон, що схематично відображені на рисунку 2. В зоні 1, яка включає зону 1A і 1B, орієнтація великої осі діри в розподілі НІ насправді визначається напрямком вектора кутового моменту галактики. Ці зони можна назвати зонами "повної вірогідності". Тут всі зображення оболонок, що були розраховані, зберігають "правильну" орієнтацію. Кут φ містяться у межах $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, якщо вектор кутового моменту галактики спрямований від спостерігача, й $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$, якщо вектор кутового моменту обертання галактики спрямований до спостерігача. В зонах 2 і 3 орієнтація дір у розподілі НІ в картинній площині не відповідає їх справжній орієнтації у площині галактики і визначається в основному ефектами проекції. Більшість дір в зоні 2 мають кути φ у межах $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ незалежно від напрямку вектора кутового моменту галактики. В зоні 3 кути φ містяться у межах $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$. Ці результати легко зрозуміти, якщо взяти до уваги, що ефекти проекції намагаються орієнтувати великі осі дір вздовж лінії вузлів галактики, і це спотворення істинної орієнтації оболонок тим більше, чим більшим є кут нахилу галактики.

Порівняння проведених розрахунків з даними спостережень призводить до висновку, що вектор кутового моменту обертання галактики Н011 спрямований від, а галактики М31 - до спостерігача.

Побудова зображень НІ оболонок в різних частотних каналах. Проведений аналіз чотирьох спостережних критеріїв, які використовуються для ототожнення оболонок на мапах розподілу нейтрального

водню, а саме: а) область з дефіцитом НІ повинна спостерігатися щонайменш як у трьох послідовних частотних каналах; б) положення центра діри у різних каналах повинно співпадати; в) діра повинна мати достатній контраст по відношенню до фону; г) форма діри повинна бути близькою до еліпса.

Процедура проектування оболонок модифікується таким чином, що беруться до уваги дисперсія хаотичних рухів оточуючого оболонку газу та кінцева ширина кожного каналу. Параметри частотних каналів моделюються гаусовими ваговими функціями W_j з дисперсією σ_j . Отриманий розподіл променевої концентрації згладжується з тим, щоб взяти до уваги просторову роздільну здатність радіотелескопа.

Результати числових розрахунків, що були проведені для декількох оболонок у галактиках M31 та HoII, призводять до висновку, що критерій а) добре виконується у більшості випадків за винятком тих, коли оболонки належать до галактик з великим кутом нахилу та розташовані у областях з полярними кутами θ , що є близькими до 90° . Критерій б) може порушуватись. Особливо у тих випадках, коли оболонки розташовані поодаль від лінії вузлів галактики. Використання цього критерію може призвести до похибкового ототожнення одного і того ж об'єкту з різними оболонками. З другого боку, частина оболонок, що є реальними, може бути виключена з аналізу. Критерій в) краще виконується для оболонок, що розташовані поблизу лінії вузлів. Критерій г) добре виконується для всіх розрахунків, що були проведені.

Висновки

У висновках коротко наводяться основні результати, отримані в дисертаційній роботі та обговорюються перспективи їхнього подальшого розвитку.

Додаток

Наводяться початкові моделі Чумацького Шляху, Туманності Андромеди та галактики HoII, що були використані для розрахунків.

Результати, які виносяться на захист

- 1 Метод розрахунку динаміки тривимірних оболонок, що виникають при розповсюдженні по МЗС сильних ударних хвиль. Метод ґрунтується на добре відомому наближенні тонкого шару. Сформульовані основні рівняння, розвинутий гнучкий числовий алгоритм, який дозволяє рівночасно взяти до уваги всі основні фактори, що визначають динаміку великих галактичних оболонок.
- 2 Числове моделювання еволюції оболонок в галактиках різних морфологічних типів (Чумацькому шляху, Туманності Андромеди, неправильній карликовій галактиці Holmberg II) при широкому виборі енергій, що надходять до порожнини, та параметрів МЗС. Розрахунок спостережуваних параметрів оболонок. Їх морфології, швидкостей, мас, зображень у картинній площині галактики та оцінка болометричної та рентгенівської світлостей. Аналіз впливу попадаючих всередину порожнини хмарок та виявлення їх ролі, як домінуючого джерела надходження маси у порожнину, на певних стадіях еволюції оболонок. Можливість утворення в оболонках, що розширюються, умов, які необхідні для переведу нейтрального водню у молекулярну фазу та виникнення велетенських молекулярних хмар - центрів утворення зір наступної генерації.
- 3 Новий точний аналітичний розв'язок рівняння Компанейця для розповсюдження сильної адиабатичної ударної хвилі у речовині з експоненційним розподілом густини, яке у далечині від точки вибуху перетворюється у гало з постійною густиною. Аналітичні розв'язки рівнянь, які в наближенні тонкого шару описують рух оболонок, що створюються ударними хвилями, в гравітаційних полях, зокрема рух самогравітуючої оболонки в полі випромінювання зір галактики.
- 4 Новий метод усунення невизначеності, що виникає при аналізі просторової орієнтації вектора кутового моменту обертання галактик. Метод ґрунтується на ефекті спотворення оболонок диференціальним обертанням галактичного диска та аналізі орієнтації дір у розподілі нейтрального водню у картинній площині галактики.

Наукова та практична цінність

- Розвиток нового методу розрахунку *тривимірних* оболонок, що ґрунтується на наближенні тонкого шару, та його послідовне залучення до вивчення нових астрономічних об'єктів - велетенських галактичних оболонок, які пов'язані з областями активного зореутворення. Дослідження, що були проведені, призвели до чіткого розуміння ролі колективного впливу масивних зір на газову підсистему галактик, виявили основні закономірності еволюції великих оболонок, що виникають навколо компактних угруповань масивних зір, їх місце у великомасштабній структурі МЗС та загальному кругообігу речовини в галактиках.
- Новий аналітичний розв'язок рівняння Компанейця поширив вкрай вузьке коло газодинамічних задач, які мають аналітичний розв'язок, і продемонструвало принципову роль корон малої густини при аналізі розповсюдження ударних хвиль у плоско-стратифікованих середовищах.
- Аналітичні розв'язки рівнянь, які описують рух оболонок у зовнішніх гравітаційних полях та самогравітуючих оболонок у полі випромінювання зір галактики, виявили роль гравітації в розвитку цих об'єктів і дозволили зменшити кількість можливих механізмів їх походження.
- Розвинутий в дисертації підхід може бути використаний (як це продемонстровано у самій роботі) і вже використовується колегами із Нідерландів для аналізу великої кількості накопичених спостережуваних даних та виявлення оболонкових структур у новому списку близьких галактик. Запропонований нами метод у теперешній час є, певно, єдиним числовим методом, що дозволяє одночасно взяти до уваги всі основні фактори, які впливають на розвиток великих галактичних оболонок, широкий спектр початкових умов та побудувати достатню кількість числових моделей при розумних загальних витратах обчислювального часу.
- Автор має надію, що з поліпшенням роздільної здатності радіотелескопів набуде широкого застосування запропонований метод усунення невизначеності, що виникає при аналізі просторової орієнтації вектора кутового моменту обертання галактик. Це твердження

ґрунтується на тому, що запропонований метод є незалежним від будь-яких додаткових припущень про властивості галактик, потребує тільки вивчення орієнтації "дір" в розподілі нейтрального водню і, таким чином, є найбільш прямим засобом усунення вказаної вище невизначеності у галактиках різних морфологічних типів.

- Ідеологія, що набула розвитку в дисертації, може бути залучена до вивчення великих оболонок та чарункової структури МЗС в інших спектральних діапазонах (видимому, рентгенівському) і тому може використовуватись для опрацювання нових спостережних програм.

Автор вдячний проф. Г.С. Біснатовому-Когану за тривалі і щасливі години спільної праці та багаторазові дискусії, що надали розуміння багатьом питанням, які порушені в дисертаційній роботі, своєму першому вчителю, проф. П.І.Фоміну, співавторам Т.О. Лозинській, С.І. Бліннікову, С.Я. Машенко, G. Tenorio-Tagle, J.Franco, J. Palouš, спілкування з якими завжди було корисне, а дискусії плідними. Автор вдячний також всім учасникам семінарів ГАО НАНУ, РІ НАНУ, ДАШ, ФІ РАН, АКЦ ФІ РАН, Інституту астрономії РАН за багаторазові дискусії, обговорення та постійну зацікавленість до результатів, що доповідались.

Проведені у дисертації дослідження були підтримані грантом UC 9000 Міжнародного наукового фонду, грантом UC 9200 спільної програми Міжнародного наукового фонду та Уряду України, Малим грантом Американського астрономічного товариства. Часткова фінансова підтримка була отримана через Національну космічну програму України та грант 93-02-17106 Російського фонду фундаментальних досліджень. Частина розрахунків була виконана в ІКД РАН, Instituto de Astronomía UNAM (México), Instituto de Astrofísica de Canarias (Spain), Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (México) під час роботи автора у цих наукових центрах.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах

Оглядові роботи

1. Силич С.А., 1990, Гигантские оболочки HI, связанные с областями звездообразования // в кн. Строение и эволюция областей звездообразования. Киев: Наук. думка, с.161-202.
2. Bisnovatyi-Kogan, G. S. and Silich, S. A., 1995, Shock wave propagation in the nonuniform interstellar medium // *Rev.Mod.Phys.* **67**, 661-712.

Статті в наукових виданнях

3. Силич С.А., Фомин П.И., 1983, Точечный взрыв в экспоненциальной атмосфере с ненулевой асимптотой // *ДАН СССР*. **268**, N4, 861.
4. Силич С.А., 1985, К теории распространения сильных ударных волн в неоднородных гравитирующих средах. I. Адиабатическая стадия // *Кинем. физ. неб. тел.* **1**, N6, 37.
5. Силич С.А., 1985, К вопросу о форме расширяющихся сверхоболочек нейтрального водорода // *Астрофизика* **22**, N3, 563.
6. Силич С.А., 1985, О природе расширяющихся оболочек HI и спектре звездных масс OB-ассоциаций // *Астрофизика* **23**, N2, 289.
7. Пасько В.П., Силич С.А. 1986, К теории распространения сильных ударных волн в неоднородных гравитирующих средах. II. Радиационная стадия // *Кинем. физ. неб. тел.* **2**, N3, 15.
8. Пасько В.П., Силич С.А. 1988, Динамика самогравитирующих оболочек, движущихся под действием лучистого давления звезд поля // *Кинем. физ. неб. тел.* **4**, N2, 85.
9. Bisnovatyi-Kogan G.S., Blinnikov S.I. & Silich S.A., 1989, Supernova remnants and expanding supershells in inhomogeneous moving medium. Thin layer approximation. *Astrophys. Space. Sci*, **154**, 229.
10. Bisnovatyi-Kogan G.S., Lozinskaya T.A. & Silich S.A., 1990, Barrel-like supernova remnants, *Astrophys. Space. Sci*, **166**, 277.
11. Бисноватый-Коган Г.С., Силич С.А. 1991, Трехмерные адиабатические остатки сверхновых // *Астрон. журн.* **68**, 749.

12. Silich S.A., 1992, Three-dimensional supershells in differentially-rotating galactic disks. *Astrophys. Space Sci.* **195**, 317.
13. Машенко С.Я., Силич С.А. 1994, Об образовании молекулярных облаков в трехмерных расширяющихся оболочках // *Астрон. ж.* **71**, 237.
14. Машенко С.Я., Силич С.А. 1995, Расширяющиеся оболочки в галактике HoII: сравнение результатов численного моделирования с данными наблюдений // *Астрон. ж.* **72**, 660.
15. Silich S.A., 1996, Interstellar bubbles with a variable energy input rate, *Astron. Astrophys. Transactions*, **9**, 85.
16. Silich S.A., Mashchenko S.Ya., Tenorio-Tagle G. and Franco J., 1996, Supershells as probe particles for the study of the galactic spin orientation. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **280**, 711.
17. Silich S.A., Franco J., Palouš J., Tenorio-Tagle G., 1996, 3-D Calculations of the Evolution of Superbubbles in a Cloudy Medium. *Astrophys. J.* **468**, 722.
18. Silich S.A., Mashchenko S.Ya., 1996, Large-scale structures in the ISM with correlated SNe explosions. *Astron. Astrophys. Transactions*, **10**, 225.
19. Bisnovatyi-Kogan, G. S. & Silich, S. A. "Three-dimensional adiabatic supernova remnants". 1991, Proceedings ESO/EIPC Workshop "*Supernova 1987A and other supernovae*", ed. by I.J.Danziger and K.Kjar (ESO, Garching, Germany) p657.
20. Bisnovatyi-Kogan G.S., Lozinskaya T.A. & Silich S.A., 1991, Barrel-like supernova remnants. Proceedings ESO/EIPC Workshop "*Supernova 1987A and other supernovae*", ed. by I.J.Danziger and K.Kjar (ESO, Garching, Germany), p653.
21. Silich S.A., 1992, 3D Supershells. in "*Evolution of Interstellar matter and dynamics of galaxies*", edited by J. Palouš, W. B. Burton, and P.O. Lindblad (Cambridge: Cambridge University Press), p.72.
22. Mashchenko S.Ya., Silich S.A., 1994, Formation of molecular clouds in expanding supershells: 3D models. in "*Numerical Simulations in Astrophysics*", ed. J. Franco, S. Lizano, L. Aguilar and E. Daltabuit, (Cambridge: Cambridge University Press), p.202

23. Silich S.A., Franco J., Palouš J. & Tenorio-Tagle G., 1994, Galactic supershells. in *Violent star formation from 30 Doradus to QSOs*, ed. G. Tenorio-Tagle, (Cambridge: Cambridge University Press), p.162.
24. Бисноватый-Коган Г.С., Блишников С.И., Силч С.А. 1988, Эволюция остатков сверхновых и расширяющихся сверхоболочек в неоднородных движущихся средах. Приближение бесконечно тонкого слоя // Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1406, 32с.
25. Бисноватый-Коган Г.С., Лозинская Т.А., Силч С.А. 1990, Аксиально-симметричные остатки вспышек сверхновых // Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1637, 31с.
26. Силч С.А., 1991, Трехмерные оболочки в дифференциально вращающихся галактических дисках // Препринт ИТФ АН УРСР, ИТФ-91-42Р, 23с.
27. Машенко С.Я., Силч С.А. 1996, Проявление HI оболочек в разных частотных каналах // Препринт Главной астрономической обсерватории НАН Украины ГАО-96-23, 20с.

Літературні джерела

- Бисноватый-Коган Г.С., Блишников С.И. 1982, *Астрон. ж.* **59**, 876.
- Имшенник В.С. в кн. Численные методы в физике плазмы. М.: Наука, 1977.
- Лозинская Т.А. 1986, "Сверхновые звезды и звездный ветер. Взаимодействие с газом галактики." М.: Наука, 304с.
- Elmegreen B.G., Chiang W.-H. 1982, *Ap. J.* **253**, 666.
- Ostriker, J.P., C.F. McKee, 1988, *Rev. Mod. Phys.* **60**, 1.
- Palouš J. 1990, in *The Interstellar Disk-Halo Connection in Galaxies*, edited by H. Bloemen (Srrewacht, Leiden) p. 101.
- Palouš, J. 1992, in *Evolution of Interstellar Matter and Dynamics of Galaxies*, edited by J. Palouš, W. B. Burton, and P. O. Lindblad (Cambridge Univ. Press, Cambridge) p.65.
- Tenorio-Tagle, G., Palouš, J. 1987, *Astron. Astrophys.*, **186**, 287.
- Tenorio-Tagle, G., P. Bodenheimer, 1988, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **26**, 145.
- Tomisaka K., Ikeuchi S. 1986, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **38**, 697.
- Tomisaka K., Ikeuchi S. 1988, *Ap. J.* **330**, 695.

Аннотация

Силич С.А. Галактические оболочки. Численное моделирование методом тонкого слоя. Диссертационная работа (рукопись) на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и радиоастрономия. Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 1997.

Защищаются 27 научных работ, посвященных развитию аналитических и численных методов описания динамики многомерных оболочек, возникающих в неоднородной межзвездной среде под воздействием мощных локальных источников энергии. В приближении тонкого слоя найдены решения уравнений движения оболочек в гравитационных полях, в том числе движения самогравитирующей оболочки в поле излучения звезд галактики. Получено новое точное аналитическое решение уравнения Компанейца для распространения сильной адиабатической ударной волны в экспоненциальной атмосфере, переходящей в гало постоянной плотности. На основе приближения тонкого слоя развит метод расчета динамики трехмерных оболочек, возникающих при прохождении по МЗС сильных ударных волн. Разработан гибкий численный алгоритм, позволяющий одновременно учесть все основные факторы, определяющие динамику крупных галактических оболочек. Построены численные модели эволюции оболочек в галактиках разных морфологических типов. На основании проведенных расчетов предложен новый метод устранения неопределенности в пространственной ориентации вектора углового момента вращения галактик.

Ключові слова: галактики, міжзоряне середовище, ударні хвилі, наднові, міжзоряні оболонки.

Abstract

Silich S.A. Galactic shells. Numerical simulations by the thin layer method. Thesis (a manuscript) is applied on adjudge for research degree doctor of Physical and Mathematical Sciences on specialty 01.03.02 - Astrophysics and Radioastronomy. Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1997.

27 scientific papers are defended. The development of analytical and numerical methods for the multidimensional shells calculations in the inhomogeneous ISM are presented. Shell expansion in the external gravitational field and self-gravitating shell expansion in the radiation field of a galaxy stars are defined by the analytic solutions. A new parametric solution for Kompaneets equation in the case of plane-stratified exponential atmosphere with an extended homogeneous halo is found. The numerical method based on the thin layer approximation is developed to calculate the three-dimensional galactic interstellar bubbles evolution. The method takes into account simultaneously all the principal factors, which are important for the large interstellar shells evolution. The numerical models are calculated for the shell evolution in the galaxies of different morphological types. A new method to remove the uncertainty in the determination of the galaxy angular momentum space orientation is proposed.

Key words: galaxies, interstellar medium, shock waves, supernovae, interstellar shells.

Зам. 13 Формат 60×84/16. Обл.-вид. арк. 1.7
Підписано до друку 12 .02. 1997р. Тираж 100.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України

435359

AB 37.137