

На правах рукопису

Мащенко Сергій Ярославович

**Тривимірні моделі галактичних надоболонок**

01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія

Автореферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ 1996

AB 35.527

Робота виконана у Головній астрономічній обсерваторії Національної Академії Наук України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук  
Слишч Сергій Олександрович  
(ГАО НАН України, Київ)

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
член-кореспондент НАН України  
Фомін Петро Іванович  
(ІТФ НАН України, Київ)

кандидат фізико-математичних наук  
Гнатик Богдан Іванович  
(ІППММ НАН України, Львів)

Провідна організація: Інститут космічних досліджень  
Російської Академії Наук (Москва)

Захист відбудеться 4 жовтня 1996 року на засіданні Спеціалізованої ради Д01.74.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України (252650, Київ-22, Голосіїв), початок засідання об 9 годині.

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

Автореферат розісланий "3" Вересня 1996 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради  
кандидат фізико-математичних наук \_\_\_\_\_ Гусева Н. Г.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00759924 (-)

## Актуальність теми

Відкриті приблизно 15 років тому надоболонки нейтрального водню, що розширюються в міжзоряному середовищі, є в останні роки об'єктом прискіпливої уваги як спостерігачів, так і теоретиків. В сучасній картині будови міжзоряного середовища, що знаходиться в динамічній рівновазі під впливом потужних локальних джерел енерговиділення, надоболонки грають ведучу роль. Феномен індукованих ОВ-асоціаціями надоболонки, що розширюються, використовується для пояснення таких рівних проблем в сучасній астрофізиці, як стимульоване зіркоутворення, обгащення гал галактик важкими елементами, дефіцит газу в деяких карликових галактиках, утворення високошвидкісних хмар HI. Для найбільш коректного рішення цих питань необхідний розвиток тривимірних числових газодинамічних схем. Дуже ефективним в цьому випадку є лагранжевий по суті метод розрахунку еволюції надоболонки, який ґрунтується на наближенні тонкого шару.

В останні роки накопичується багатий спостережувальний матеріал по надоболонках в сусідніх галактиках; також розвиваються тривимірні числові схеми для розрахунку їх еволюції. Це робить актуальною проблему подання результатів числових розрахунків у вигляді, максимально наближеному до даних спостережень. Розвиток подібних алгоритмів дозволив би проводити пряме співставлення результатів моделювання в областях з дефіцитом нейтрального водню, які спостерігаються в сусідніх галактиках. Подібний аналіз може підтвердити справедливість та адекватність моделей, якими користуються.

## Мета роботи

Метою даної роботи є:

1. Подальший розвиток методу тонкого шару для розрахунків еволюції тривимірних надоболонки, що розширюються, його адаптація для рівних моделей галактик.
2. Створення алгоритму, котрий дозволяє проектувати оболонки, що розраховані в наближенні тонкого шару, на картинку площину в рівних спектральних каналах. Береться до уваги кутлова роздільна здатність радіотелескопа та хаотичний рух у міжзоряному газі.

3. Проведення розрахунків еволюції надоболонок для нашої, та двох інших галактик — NGC та M31, порівняння із спостереженнями.

## Структура та обсяг дисертаційної роботи

Робота складається із вступу, чотирьох розділів та висновків. Загальний об'єм дисертації складає 106 сторінок, включаючи 27 малюнків, 9 таблиць та 95 назв бібліографічних джерел.

## Зміст дисертації

### Вступ

У вступі відображено актуальність теми дисертації, мету дослідження, основні положення, що виносяться на вахист, вказана їх наукова новизна та практична цінність. Також описано, на яких семінарах та конференціях робота пройшла апробацію, та подано короткий зміст дисертації.

### 1. Надоболонки в нашій та сусідніх галактиках

#### 1.1 Дані спостережень

Перші надоболонки нейтрального водню в нашій Галактиці були відкриті наприкінці 70-х років Хейлесом (Heiles, 1979) на підставі аналізу проведеного ним з високою роздільною здатністю радіоогляду розподілу HI в лінії надтонкої структури водню 21 см. Маса виявлених холодних густих оболонок досягали  $2 \times 10^7 M_{\odot}$ , їх розміри — 2.4 кпс. Багато об'єктів показували ознаки розширення з кінетичною енергією до  $10^{63}$  ерг. Подальші рентгенівські спостереження виявили усередині деяких надоболонок дуже гарячий рооріджений газ.

Спостереження нейтрального водню в інших галактиках, виконані за допомогою радіоінтерферометрів, показали присутність в них великої кількості областей з дефіцитом HI, які були інтерпретовані як прояви надоболонок. В спіральних галактиках M31 (Brinks & Bajaja, 1986) та M33 (Deul & den Hartog, 1990) виявлено 141 та 148 дір в розподілі нейтрального водню, в неправильних галактиках Велика Магеланова Хмара (Meaburn, 1980) та Холмберг II (Puche et al., 1992) — 94 та 51 така діра.

Розміри каверн в цих галактиках досягають 1700 пс, маса виметеного газу —  $10^7 M_{\odot}$ , кінематичний вік оцінюється в 2.5 – 150 млн. років.

## 1.2 Теоретичні моделі

На сьогоднішній день найбільш поширеним поясненням феномену надоболонки нейтрального водню, що розширюються, є вплив ОВ-асоціацій на навколишній газ. Механізм утворення оболонки за рахунок комбінованої дії зоряного вітру та спалахів наднових був вперше запропонований Брувейлером (Bruchweiler *et al.*, 1980) та Томісакою і Ікеучі (Tomisaka & Ikeuchi, 1981). В цих моделях початкова стадія зоряного вітру від О-зірок описувалась рішенням Уівера та інших (Weaver *et al.*, 1977). Приблизно через 5 млн. років головним джерелом енергії ставали послідовні спалахи наднових від В-зірок.

Одновимірні моделі еволюції оболонки (Bruchweiler *et al.*, 1980, Tomisaka & Ikeuchi, 1981, McCray & Kafatos, 1987) не могли коректно описувати великі валишки з розмірами, більшими ніж масштаб неоднорідності галактичного газу ( $\sim 150$  пс), тому в подальшому були розвинуті двохвимірні алгоритми (Tomisaka & Ikeuchi, 1986, Tenorio-Tagle & Palouš, 1987, Mac Low & McCray, 1988, Mac Low *et al.*, 1989, Igumentshchev *et al.*, 1990, та інші). Теноріо-Тягле та Палоуш (Tenorio-Tagle & Palouš, 1987) і Мак Лоу та Маккрей (Mac Low & McCray, 1988) в своїх числових схемах використовували наближення тонкого шару.

Щоб одночасно брати до уваги як диференційність обертання галактичного газу, так і стратифікованість розподілу газу та  $Z$ -компоненту гравітаційного поля галактики, необхідні вже тривимірні числові коди. Такі коди, що ґрунтуються на наближенні тонкого шару, були запропоновані Біснотатим-Коганом і Силічем (1991), Силічем (Silich, 1992) та незалежно Палоушем (Palouš 1990).

## 2. Утворення молекулярних хмар в тривимірних оболонках, що розширюються

### 2.1 Індуковане віркоутворення та походження молекулярних хмар

Накопичуються дані — як спостережувальні, так і теоретичні — на користь того, що еволюція оболонки нейтрального водню тісно пов'язана з проблемою віркоутворення (Dopita *et al.*, 1985, Elmegreen, 1987, McCray & Kafatos, 1987, та інші). Із спостережень слідує, що вірки утворю-

ються переважно в велетенських молекулярних хмарах. Маккрей і Кафатос (McCray & Kafatos, 1987) та Теноріо-Тягле і Палоуп (Tenorio-Tagle & Palouš, 1987) показали, що надоболонки на пізніх стадіях своєї еволюції можуть формувати молекулярні хмари значної маси. Але ці результати були отримані в одно- та двохвимірних моделях, тому є дуже наближеними. Таким чином, надоболонки можуть служити основою для механізму індукованого віркутворення, що саморозповсюджується. Підтвердженням цьому може бути той факт, що в деяких надоболонках спостерігається градієнт віку вірок, які знаходяться усередині валишку (Dopita *et al.*, 1985, Elmegreen, 1987).

В цьому розділі розглядається питання про можливість утворення молекулярних хмар значної маси внаслідок еволюції тривимірних надоболонок для конкретних умов нашої Галактики.

## 2.2 Еволюція тривимірних надоболонок в Галактиці

Для розрахунків еволюції надоболонок використовувалась числова газодинамічна схема, розвинута Біснотатим-Коганом і Силічем (1991) та Силічем (Silich, 1992), що ґрунтується на наближенні тонкого шару. В цьому наближенні є два головних спрощення: 1) вважається, що весь газ, який нагрібається, знаходиться безпосередньо за фронтом ударної хвилі; 2) тиск усередині валишка вважається однорідним. Уся оболонка розбивається на  $M$  лагранжевих елементів. Для кожного з них записуються закони збереження маси та імпульсу. Зміна імпульсу лагранжевого елемента пов'язана з роботою сил тиску, імпульсом газу, що "налипає", та роботою проти сил гравітації. Для усієї оболонки записується закон збереження енергії, в якому береться до уваги внутрішнє джерело енергії. Отримана система з  $7M + 1$  нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку замикається рівнянням стану ідеального газу.

Алгоритм розрахунку еволюції надоболонок в наближенні тонкого шару був адаптований до параметрів нашої Галактики. Бралась до уваги диференційність обертання галактичного диску та внесок до гравітаційного поля як дискової компоненти, так і гала. Розподіл газу по  $Z$ -координаті задавався у вигляді суми трьох компонент — двох гаусових та однієї експоненціальної. Початкові швидкість розширення і радіус оболонки та теплова енергія валишка задавались аналітичним рішенням Уївера та інших (Weaver *et al.*, 1977). Усього було розраховано 12 варіантів еволюції надоболонки з різними значеннями галактоцентричної відстані

( $R = 5, 8.5, 15$  кпс), відстані джерела енергії від галактичної площини ( $Z_0 = 0, 50, 100$  пс) та темпу надходження енергії від спалахів наднових ( $L = (0.3, 1, 3) \times 10^{38}$  ерг/с). Через 30 млн. років джерело енергії вимикалось, так як до цього часу усі масивні вірки в ОВ-асоціації вибухають як наднові.

Розрахунки показують, що на пізніх стадіях еволюції надоболонки в них утворюється вузька зона поблизу галактичної площини, в якій променева концентрація лагранжевих елементів починає швидко зростати. Цей ефект обумовлений головним чином впливом  $Z$ -компоненти гравітаційного поля галактики, який приводить до осідання значної частини оболонки на площину  $Z = 0$  через 25 – 60 млн. років (в залежності від галактоцентричної відстані) після її утворення. Якщо ОВ-асоціація розміщена над галактичною площиною, вона збільшеної концентрації утворюється під нею. Для варіантів з відставню від центру Галактики  $R < 15$  кпс та висотою над галактичною площиною  $Z_0 < 100$  пс променева концентрація  $N$  в цій зоні зростала настільки, що для деяких лагранжевих елементів починав виконуватись критерій екранування атомарного водню від зовнішнього поля УФ випромінювання, що є необхідною умовою для його переходу в молекулярну форму:  $N > N_{\text{крит}}$ , де  $N_{\text{крит}} = 10^{21} (1/\chi')$  см $^{-2}$ . (Тут  $\chi'$  — вміст тяжких елементів в газі відносно навколосонячного вмісту.) Маса  $\text{H I}$ , який може перейти у молекулярну форму, досягає  $10^6 M_{\odot}$ , що перевищує маси типових велетенських молекулярних хмар. Умови для утворення  $\text{H}_2$  виконуються для тих елементів надоболонки, які розташовані не далі 100 пс від галактичної площини, що угоджується із спостережувальним розподілом молекулярного водню в нашій Галактиці.

### 3. Надоболонки як пробні частки для знаходження орієнтації галактичного спіну

#### 3.1 Постановка задачі

Рісні сценарії походження великомасштабної структури Всесвіту та формування галактик передбачають різну кореляцію між напрямками вектора кутового моменту обертання (чи спіну) галактик із розподілом мас в протогалактичній хмарі. Положення галактичної площини в просторі може бути знайдено, якщо нам відомі відношення великої і малої осей спостережувального диску галактики та те, яка з половин великої осі до нас наближується. Але в такому аналізі невизначеність в знаходженні

напрямку галактичного спіну —  $i' = i$  чи  $i' = 180^\circ - i$  — залишається. (Тут  $i$  — кут нахилу галактики,  $i'$  — кут між спіном галактики та променем вору.) Для усунення цієї невизначеності вараз використовують два методи: знаходження напрямку закручення спірального візерунку галактики (в припущенні, що усі спіралі є відстаючими), та аналіз розподілу пилової матерії в галактичному диску (для галактик із середнім кутом нахилу, що мають балдж). Як бачимо, ці методи непридатні для багатьох галактик (наприклад — для неправильних галактик з малим кутом нахилу).

В даному розділі пропонується новий метод усунення невизначеності в знаходженні галактичного спіну, який ґрунтується на аналізі орієнтації областей з дефіцитом нейтрального водню, та використовує спотворення оболонок диференціальним обертанням галактичного диску.

### 3.2 Числова схема

Для моделювання еволюції надоболонки використовувалась 2.5-вимірна числова схема, яка була описана в попередньому розділі. Алгоритм був модифікований з тим, щоби врахувати ефекти теплопровідності, які приводять до випаровування внутрішніх шарів холодної густої оболонки, встановлення степеневого розподілу температури та густини газу водовж радіусу та обільшення втрат енергії за рахунок випромінювання цього газу (Castor *et al.*, 1975).

Для порівняння результатів числового моделювання з даними спостережень необхідно знайти розподіл променевої концентрації нейтрального водню в картинній площині із врахуванням внесків як оболонки, так і навколишнього міжзоряного газу. На пізніх стадіях еволюції надоболонки мають складну тривимірну морфологію, тому була розвинена процедура числової проєкції оболонок на картинну площину. В отриманому розподілі променевої концентрації нейтрального водню контур, який відповідає половині глибини діри, апроксимувався еліпсом, що дозволяло знайти орієнтацію діри — кут  $\varphi$  в картинній площині між продовженням радіуса-вектора від центру галактики та великою віссю еліпса.

### 3.3 Напрямок вектора кутового моменту обертання галактик

Числові розрахунки еволюції надоболонки та проєкції отриманого розподілу нейтрального водню на картинну площину були проведені для моде-

лей двох галактик: неправильного карлика HoII (UGC 4305) і велетенської спіралі M31. Для опису гравітаційного поля галактики HoII була використана модель Кінга, параметри якої були отримані в апроксимації кривої обертання, що спостерігається, модельною кривою. Вертикальний розподіл HI для цієї галактики задавався у вигляді гаусіани в шкалою висот  $H = 625$  пс. Розподіл маси в галактиці M31 моделювався як сума двох експоненціальних (у  $R$  та  $Z$  напрямках) диску та сферичного баджу, що дуже добре описує криву обертання, яка спостерігається (Vgaun, 1991). Розподіл густини газу у  $Z$ -напрямку для M31 був отриманий на підставі припущення про гідростатичну рівновагу та постійність теплоємності галактичного газу.

Усього було розраховано 6912 проєкцій оболонок на картинну площину для моделі галактики HoII, і стільки ж — для галактики M31. Кут  $\varphi$  були обчислені для надоболонок різного віку, які знаходяться на різних відстанях від центру галактики, з різною потужністю центрального джерела енергії  $L$ , різними полярними кутами  $\theta$  (який характеризує положення оболонки в площині галактики відносно лінії вузлів) та для різних кутів нахилу галактики  $i$ .

Результати розрахунків показують, що є дві зони поблизу лінії вузлів галактики та перпендикулярної до неї лінії, в яких орієнтація переважної більшості областей з дефіцитом нейтрального водню залежить від напрямку спіну галактики: якщо для більшості дір в цих зонах  $90^\circ \leq \varphi < 180^\circ$ , то спін повинен бути спрямований до спостерігача; для протилежного випадку  $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$  спін спрямований від спостерігача. Ширина зон залежить від кута нахилу та морфології галактики. Таким чином, надоболонки можуть слугувати індикатором напрямку спіну галактик. Аналіз орієнтації дір, які спостерігаються, підтверджує те, що спін галактики M31 спрямований в бік спостерігача, і вказує на те, що вектор кутового моменту обертання галактики HoII спрямований від спостерігача.

## 4. Прояви надоболонок в різних спектральних каналах

### 4.1 Постановка задачі

При складанні каталогів областей з дефіцитом нейтрального водню в інших галактиках, як правило, використовують наступні критерії (Brinks & Vajaja, 1986, Deul & den Hartog, 1990, Puche et al., 1992): 1) діра в

Ні повинна спостерігатися щонайменш в трьох послідовних спектральних каналах; 2) центр діри в цих каналах не повинен зміщуватись; 3) діра повинна мати добрий контраст в усіх відповідних каналах; 4) форма діри повинна бути близькою до еліпсу. Ці критерії не є строго обґрунтованими, а ґрунтуються на інтуїтивному уявленні про те, як повинна виглядати оболонка, що розширюється. В даному розділі вони аналізуються в точки зору результатів числового моделювання еволюції оболонок.

#### 4.2 Числова схема

Для моделювання еволюції надоболонки був використаний описаний в двох попередніх розділах алгоритм, який ґрунтується на наближенні тонкого шару, та описані в третьому розділі моделі галактик HoII і M31. Процедура проєкції оболонок на картинну площину (розділ 3) була модифікована в тим, щоб замість розподілу інтегральної променевої концентрації можливо було отримувати розподіл променевої концентрації в різних спектральних каналах. Пропускна здатність спектральних фільтрів задавалась у вигляді гаусіани з дисперсією  $\sigma_f$ . Припускалось, що неутурбований газ має постійне значення одновимірної дисперсії хаотичних рухів (теплових та турбулентних)  $\sigma_g$  вздовж променя зору. Отриманий розподіл променевої концентрації огладжувався в тим, щоб узяти до уваги просторову роздільну здатність радіотелескопа.

#### 4.3 Результати розрахунків

Було розглянуто два варіанти еволюції надоболонки: один в галактиці M31, та інший в галактиці HoII. Після 25 млн. років еволюції в галактиці M31 оболонка проєктувалась на картинну площину в різних спектральних каналах для чотирьох значень полярного кута  $\theta$  —  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  і  $90^\circ$ . В галактиці HoII проєкції були виконані для моменту часу  $t = 40$  млн. років для полярних кутів  $\theta = 0^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $90^\circ$ . Характеристики спектральних фільтрів та роздільна здатність радіотелескопа були вибрані близькими до параметрів реальних спостережень розподілу нейтрального водню в цих галактиках.

Аналіз отриманих мап розподілу НІ в різних спектральних каналах показує, що надоболонки проявляють себе як діри в розподілі нейтрального водню щонайменш в трьох сусідніх каналах майже в усіх розглянутих варіантах (в єдиним винятком  $\theta = 90^\circ$  для M31, де діра спостерігається

лише в одному каналі). В усіх цих випадках добре виконується четвертий спостережувальний критерій (еліпсоподібність форми діри). Але перші три критерії добре описують лише оболонки, які знаходяться поблизу лінії вузлів галактики ( $\theta \sim 0^\circ$ ), і значно гірше — оболонки з полярними кутами  $\theta \rightarrow 90^\circ$ . Це необхідно брати до уваги при складанні списків дір в розподілі НІ в сусідніх галактиках.

## Висновки

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

## Літературні джерела

- Braun, R., 1991, *Astrophys. J.* **372**, 54  
Brinks, E. & Bajaja, E., 1986, *Astron. Astrophys.* **169**, 14  
Bruchweiler, F. G., Gull, T., Kafatos, M. & Sofia, S., 1980, *Astrophys. J.* **258**, L27  
Castor, J., McCray, R. & Weaver, R., 1975, *Astrophys. J.* **200**, L107  
Deul, E. R. & den Hartog, R. H., 1990, *Astron. Astrophys.* **229**, 362  
Dopita, M. A., Mathewson, D. S. & Ford, V.L., 1985, *Astrophys. J.* **297**, 599  
Elmegreen, B. G., 1987, in *IAU Symposium No.115*, ed. M. Peimbert and J. Jugaku (Dordrecht, Reidel), p. 457  
Heiles, C., 1979, *Astrophys. J.* **229**, 533  
Igumentshchev, I. V., Shustov, B. M. & Tutukov, A. V., 1990, *Astron. Astrophys.* **234**, 396  
Mac Low, M.-M. & McCray, R., 1988, *Astrophys. J.* **324**, 776  
Mac Low, M.-M., McCray, R. & Norman, N. L., 1989, *Astrophys. J.* **337**, 141  
McCray, R. & Kafatos, M., 1987, *Astrophys. J.* **317**, 190  
Meaburn, J., 1980, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **192**, 365  
Palouš, J., 1990, in *The Interstellar Disk-Halo Connection in Galaxies*, ed. H. Bloemen (Srerrewacht, Leiden), p. 101  
Puche, D., Westpfahl, D., Brinks, E. & Roy, J.-R., 1992, *Astron. J.* **103**, 1841  
Silich, S. A., 1992, *Astrophys. Space Sci.* **195**, 317  
Tenorio-Tagle, G. & Palouš, J., 1987, *Astron. Astrophys.* **186**, 287  
Tomisaka, K. & Ikeuchi, S., 1981, *Astrophys. Space Sci.* **78**, 273  
Tomisaka, K. & Ikeuchi, S., 1986, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **38**, 697

Weaver, R., McCray, R., Castor, J., Shapiro, P. & Moore, R., 1977, *Astrophys.*

*J.* **218**, 377

Бисноватый-Коган Г. С., Силич С. А., 1991, *Астрон. журн.* **68**, 749

## Наукова новизна

У роботі отримані наступні нові результати:

1. Проведено числове моделювання еволюції тривимірних оболонок, які утворюються навколо потужних ОБ-асоціацій, при різних положеннях останніх відносно центру Галактики та відстанях до екваторіальної площини Галактики.
  - а). Показано, що на пізніх стадіях еволюції великих оболонок в них можуть реалізовуватись умови, необхідні для утворення молекулярного водню загальною масою до  $\sim 10^6 M_{\odot}$ . Велетенські оболонки, які утворюються навколо великих ОБ-асоціацій, можуть слугувати, таким чином, ефективним механізмом переведення атомарного водню у молекулярну форму та утворення велетенських молекулярних комплексів — центрів формування вірок наступного покоління.
  - б). Розрахунки показують, що молекулярний газ може утворюватись тільки в оболонках, котрі знаходяться на відстанях, менших 15 кпс від центру Галактики, і тільки в тому випадку, коли ОБ-асоціація розміщена на невеликих (менших 100 пс) відстанях від площини Галактики.
  - в). Умови, необхідні для утворення молекулярного газу, реалізуються лише в дуже вузьких по  $Z$ -координаті частинах оболонок. Молекулярні кільця чи сегменти та хмари, що в них утворюються, можуть виникнути тільки в тих частинах оболонок, котрі віддалені від площини Галактики на відстань не більше 100 пс. Більша частина молекулярного газу накопичується в двох протилежних кінцях молекулярного кільця, що приблизно відповідають напрямку галактичного обертання.
2. Запропоновано новий метод усунення невизначеності в знаходженні істинного напрямку вектора кутового моменту обертання галактики,

що ґрунтується на порівнянні результатів моделювання еволюції надоболонок з даними спостережень про напрямки витягнень дір в розподілі нейтрального водню.

- а). Показано, що вектор кутового моменту обертання галактики повинен бути спрямований в бік спостерігача, якщо витягнення більшості дір в секторах поруч з великою та малою віссю диску галактики орієнтовані в інтервалі  $90^\circ \leq \varphi < 180^\circ$ . Тут  $\varphi$  — кут між напрямком витягнення і радіусом-вектором діри у картинній площині. Якщо ж оболонки орієнтовані так, що спостережувальні кути сконцентровані в інтервалі  $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ , то спір галактики повинен бути спрямований від спостерігача.
- б). Ширина секторів, в яких знаходження істинного напрямку спіру галактики можливе з високою достовірністю, змінюється в широких межах в залежності від морфології та кута нахилу галактики.
- в). Аналіз витягнень дір в зонах достовірності вказує на те, що спір галактики HoII спрямований від спостерігача, та підтверджує напрямок вектора кутового моменту обертання галактики M31 в бік спостерігача.

### 3. На прикладі галактик HoII і M31 вивчені прояви надоболонок в різних спектральних каналах.

- а). Побудовано алгоритми, що дозволяє отримувати мапи розподілу променевої концентрації HI в різних частотних каналах, в якому береться до уваги кутова роздільна здатність радіотелескопа та хаотичні рухи в міжзоряному середовищі. Розроблений алгоритм дозволяє перейти до безпосереднього порівняння числових моделей еволюції тривимірних оболонок з даними радіоастрономічних спостережень.
- б). На прикладі декількох надоболонок в галактиках M31 і HoII показано, що при моделюванні спостережувальних проявів оболонок (таких, як присутність замкнених контурів в розподілі променевої концентрації в спектральних каналах та "двохгорбистість" спектральних ліній) принципово необхідно враховувати розширення лінії HI 21 см, яке відбувається за рахунок хаотичних рухів у міжзоряному газі.

в). В результаті аналізу теоретично розрахованих проєкцій надоболонок виявлено, що центр діри, котра спостерігається в розподілі HI, може зміщуватись в різних спектральних каналах. Цей ефект обумовлений головним чином впливом диференціального обертання міжзоряного газу та найбільш значимий для надоболонок, котрі знаходяться далеко від лінії вузлів галактики. Але в цих каналах контраст діри дуже падає, що ускладнює її виділення на фоні навколишнього газу.

г). Числові розрахунки декількох оболонок в галактиках M31 та HoII показують, що три із чотирьох критеріїв відбору областей із дефіцитом HI, якими звичайно користуються при аналізі радіоастрономічних даних, — можливість спостерігати діру щонайменш в трьох послідовних спектральних каналах, нерухомість центру діри у відповідних каналах та достатньо високий контраст діри — добре виконуються для надоболонок, які розміщені поблизу лінії вузлів галактики. При переході до полярних кутів, близьких до  $\theta = 90^\circ$ , їх застосовуваність погіршується; ідентифікувати аналогічні надоболонки з використанням даних критеріїв стає значно складніше. Четвертий спостережувальний критерій (наближенність форми краю діри до еліпсу) виконується задовільно в усіх розглянутих прикладах.

### **Результати, які виносяться на захист**

1. Показана можливість утворення хмар молекулярного водню ві значними масами в результаті еволюції в Галактиці тривимірних надоболонок, що розширюються.
2. Розроблена процедура проєктування результатів числових розрахунків еволюції надоболонок, котрі виконані в наближенні тонкого шару, на картину площину.
3. Отримано новий метод усунення невизначеності в знаходженні істинного напрямку вектора кутового моменту обертання галактик.
4. Виячені прояви надоболонок в різних спектральних каналах.

## Наукова та практична цінність

- Алгоритм для розрахунків еволюції надоболонок в наближенні тонкого шару, адаптований під умови Галактики та галактик HoII і M31, може бути в подальшому використаний для проведення різних числових експериментів як в цих, так і в інших галактиках. Серед найближчих можливих задач — розрахунок еволюції надоболонок в галактиці M33; отримання мал рентгенівської світності надоболонок для нашої та сусідніх галактик; моделювання оболонки, котрі виникають усередині велетенської молекулярної хмари.
- Для Галактики знайдено умови, при яких в результаті еволюції тривимірних надоболонок можливе утворення молекулярних хмар в маси, близькими до мас велетенських молекулярних хмар.
- Розроблений алгоритм розрахунку мал розподілу променевої концентрації HI в спектральних каналах, в якому береться до уваги кутова роздільна здатність радіотелескопа, може бути в подальшому використаний для порівняння результатів числового моделювання еволюції надоболонок в сусідніх галактиках з різними даними спостережень. Він також може бути адаптований для отримання радіомап об'єктів в Галактиці та для побудови мал рентгенівської світності оболонки.
- Отримано принципово новий метод усунення невизначеності в знаходженні істинного напрямку вектора кутового моменту обертання галактик, що ґрунтується на аналізі орієнтації дір в розподілі HI, показано можливість його застосування для галактик з різною морфологією та різними кутами нахилу.
- Визначено напрямки векторів кутового моменту обертання галактик HoII та M31.

## Апробація роботи

Основні результати дисертації доповідались: на семінарах відділу "Фізика зірок та галактик" ГАО НАНУ; на конференції "Numerical Simulations in Astrophysics" (Мехіко, Мексика, 1993р.); в Четвертій літній школі в спостережувальній астрофізики при Ватиканській обсерваторії

(Кастел Гандольфо, Італія, 1993р.); на конференції "Astrophysics and cosmology after Gamow" (Одеса, 1994р.); на конференції, присвяченій 225-ій річниці Астрономічної обсерваторії Львівського університету (Львів, 1994р.).

## Основні результати дисертації опубліковані в роботах

1. Mashchenko, S. Ya. & Silich, S. A. "Formation of molecular clouds in expanding supershells: 3-D models", 1994, in Numerical Simulations in Astrophysics, edited by J. Franko, S. Lizano, L. Aguilar and E. Daltabuit (Cambridge Univ. Press, Cambridge), p. 202.
2. Мащенко С. Я., Сялич С. А. "Об образовании молекулярных облаков в трехмерных расширяющихся оболочках", 1994, Астрон. журн. **71**, 237.
3. Мащенко С. Я., Сялич С. А. "Расширяющиеся оболочки в галактике Н01: сравнение результатов численного моделирования с данными наблюдений", 1995, Астрон. журн. **72**, 660.
4. Silich, S. A., Mashchenko, S. Ya., Tenorio-Tagle, G. & Franco, J. "Supershells as probe particles for the study of the galactic spin orientation", 1996, Mon. Not. R. Astron. Soc. **290**, 711.
5. Мащенко С. Я., Сялич С. А. "Проявление HI оболочек в разных частотных каналах", препринт ГАО-96-2Р, Киев, 1996, 20 с.

В наукових статтях, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належать: обговорення постановки задач, розробка алгоритмів та проведення розрахунків, спільна інтерпретація отриманих результатів.

Автор дуже вдячний науковому керівнику С. А. Сяличу за постійну поміч та підтримку при виконанні цієї роботи, а також Г. Теноріо-Тягле та Дж. Франко за плідне співробітництво. Дисертаційна робота була частково підтримана грантами UC9000 ISF, UC9200 ISF та уряду України і PSU052088 ISSEP.

**Мащенко С. Я.** Трехмерные модели галактических сверхоболочек. Диссертационная работа (рукопись) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия. Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 1996.

Защищаются 5 научных работ, посвященных моделированию трехмерных расширяющихся сверхоболочек нейтрального водорода и сравнению результатов расчетов с данными радионаблюдений.

Численная трехмерная гаводинамическая схема для расчета эволюции расширяющихся сверхоболочек нейтрального водорода, основанная на приближении тонкого слоя, была адаптирована для различных галактических окружений. Из результатов вычислений показано, что на поздних стадиях эволюции Галактические сверхоболочки могут формировать массивные молекулярные облака. Такие облака могут образовываться только в сверхоболочках, расположенных на расстоянии не более 15 кпс от центра Галактики, и не далее 100 пс от галактической плоскости. Таким образом, сверхоболочки могут служить эффективным механизмом перевода межзвездного атомарного водорода в молекулярную форму.

Получен новый метод устранения неопределенности в определении направления вектора галактического углового момента. Он основан на сравнении направления вытянутостей наблюдаемых дыр в распределении HI с результатами моделирования эволюции трехмерных сверхоболочек. Подтверждено, что спин галактики M31 направлен в сторону наблюдателя, и получено, что спин галактики HoII направлен от наблюдателя.

Описан алгоритм, позволяющий строить изображения трехмерных сверхоболочек нейтрального водорода в картинной плоскости в различных спектральных каналах. Принимаются во внимание уширение линии 21 см, вызванное хаотическими движениями в газе, и угловое разрешение радиотелескопа. На примере нескольких сверхоболочек для моделей галактик M31 и HoII проанализированы критерии, обычно применяемые при составлении каталогов областей с дефицитом HI в близких галактиках. Показано, что три из них — наблюдаемость “дыры” не менее чем в трех соседних частотных каналах, неподвижность центра “дыры” и ее хороший контраст с фоном во всех соответствующих каналах — хорошо выполняются для сверхоболочек, находящихся вблизи линии узлов галак-

тики, и значительно хуже — для расположенных вдали от нее.

## Abstract

**Mashchenko S. Ya. Three-dimensional models of the galactic supershells.** Candidate of Sciences (Physics and Mathematics) in 01.03.02 — Astrophysics and Radioastronomy, a manuscript. Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1996.

Five papers on simulating the three-dimensional expanding HI supershells and comparing the results obtained with observational data are defended.

Numerical 3D hydrodynamic scheme based on thin layer approximation to simulate the superbubble evolution has been adopted for different galactic environments. From the results of simulations it has been shown that Milky Way supershells can form massive molecular clouds at the late stages of evolution. Such clouds can be formed only in the superbubbles with galactocentric radii  $R < 15$  kpc and if the distance of parental OB-association to the plane of Galaxy is  $Z < 100$  pc. Thus, the supershells can be an efficient mechanism for transferring the interstellar atomic hydrogen to molecular form.

New method to remove the uncertainty in the galactic angular momentum determination has been obtained. It is based on comparison of elongation directions of the observed holes in HI distribution with the results of 3D supershell evolution simulations. It has been confirmed that the M31 galaxy spin is directed to observer, and has been shown that the HoII galaxy spin is directed outwards.

A procedure allowing to project the results of 3D supershell simulations on the plane of view in different velocity channels has been introduced. It takes into account a widening of the 21 cm spectral line due to chaotic motions in the ISM, and radiotelescope beam smoothing. For a few supershells in the M31 and HoII model galaxies the criteria usually used for compiling the HI deficit regions lists have been analyzed. It has been shown that three of these criteria — presence of hole in at least three successive velocity channels, stationarity of the hole center and good contrast of the hole to its surroundings in all the relevant channel maps — describe very well supershells located near the galactic line of nodes, and much worse — the ones being far away from this line.

---

Зам. 57      Формат 60×84/16.  
Підписано до друку 29.04.1996р.

Обл.-вид. арк. 1.0  
Тираж 100.

---

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

438680

AB 35.527