

УДК 524.7

PACS number(s): 98.58.Hf, 98.52.Wz, 98.54.Ep, 98.56.Wm

ДЕТАЛЬНЕ ФОТОЙОНІЗАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СВІТІННЯ ОКОЛИЦЬ СПАЛАХУ ЗОРЕУТВОРЕННЯ

М. Сокіл, Б. Мелех

*Львівський національний університет ім. І.Франка
кафедра астрофізики
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: melekh@physics.wups.lviv.ua*

Розглянуто два методи: фотойонізаційного моделювання світіння (ФМС) та хемодинамічних симуляцій околиць області зореутворення. У статті ми об'єднали ці методи з метою розрахунку синтетичного емісійного лінійчастого спектра зони НІІ навколо спалаху зореутворення. Суть об'єднання полягає у використанні результатів хемодинамічного моделювання (просторового розподілу густини газу та хемічного вмісту за об'ємом зони НІІ) у детальному фотойонізаційному моделюванні окремих частин туманності з подальшою компіляцією їх модельних спектрів із метою порівняння з відповідними даними спектроскопічних спостережень. Розпочато застосування цього методу для тестування результатів хемодинамічних симуляцій процесів зореутворення у карликовій галактиці NGC 1569. Для реалізації методу був написаний і протестований мультикомпонентний код.

Ключові слова: фотойонізаційне моделювання світіння, хемодинамічні симуляції, космічна гідродинаміка, області НІІ, спалах зореутворення.

Сучасне моделювання небулярних об'єктів розвинулось до так званих оптимізованих фотойонізаційних моделей світіння (ОФМС). Під час розрахунку ОФМС алгоритм оптимізатора шукає оптимальну фотойонізаційну модель світіння, яка відтворювала б такі спостережувані характеристики, як емісійний лінійчастий спектр та радіус іонізаційного фронту небулярного об'єкта [1–3]. При цьому вільними параметрами у наших ОФМС є вхідні параметри ФМС, подані у табл. 1. Із ОФМС отримуємо такі характеристики, як густина газу, йонізуючий спектр та хемічний вміст.

Метод хемодинамічних симуляцій [4] ґрунтується на нестационарних рівняннях гідродинаміки:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = \alpha \rho_*,$$
$$\frac{\partial q^i}{\partial t} + \nabla(q^i \mathbf{v}) = \alpha^i \rho_*,$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla(m\mathbf{v}) = \rho g - (\gamma - 1)\nabla\varepsilon + \alpha\rho_*\mathbf{v},$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\varepsilon\mathbf{v}) = -(\gamma - 1)\varepsilon\nabla\mathbf{v} - L + \alpha\rho_*\varepsilon_0 + \frac{1}{2}v^2,$$

де ρ , m , ε – густина, імпульс і внутрішня енергія газу; q^i – густина відповідного елемента; ρ_* – середня зоряна густина; α^i – частка маси конкретного елемента, яку зірки викидають у міжзоряне середовище; α – частка загальної маси газу, яка викидається зірками; $\gamma = 5/3$ – показник адиабати; g і \mathbf{v} – гравітаційне пришвидшення і швидкість флюїду; ε_0 – енергія, яка вноситься у міжзоряне середовище на одиницю маси, що походить від хаотичного руху зірок і вибухів наднових.

Таблиця 1

Вільні параметри для ФМС

Внутрішній радіус	R_{in}
Іонізаційний потік для 1Ry	R_{1Ry}
Іонізаційний потік для 1,8 Ry	$R_{1,8Ry}^1$
Іонізаційний потік для 1,8 Ry	$R_{1,8Ry}^2$
Іонізаційний потік для 2,5 Ry	$R_{2,5Ry}^2$
Іонізаційний потік для 4 Ry	R_{4Ry}^1
Іонізаційний потік для 4 Ry	R_{4Ry}^2
Іонізаційний потік для 30 Ry	R_{30Ry}
Загальна кількість іонізуючих квантів	Q_{tot}
Густина газу для R_{in}	$n_H [R_{in}]$
Ступінь закону радіального розподілу густини	γ
Фактор наповнення	ε
Вміст	He/H
Вміст	O/H
Вміст	Ne/H
Вміст	S/H
Вміст	Ar/H
Вміст	Fe/H

Хочемо звернути особливу увагу на L – це швидкість охолодження одиниці об'єму газу за рахунок випромінювання. Це єдиний доданок, який представляє випромінювання у хемодинамічному моделюванні, і він є дуже наближений.

Ці рівняння дають змогу обчислити не лише просторовий розподіл вмісту елементів, які викидаються у навколишнє середовище зірками, а також описують перманентний викид енергії у простір.

Для інтегрувань цих рівнянь використовують двовимірний гідродинамічний код, описаний у праці Бедогні та ін. [5]. Цей код адаптував С. Рекі [4] та інший для розрахунку неоднорідної циліндричної сітки.

Отже, хемодинамічне моделювання дає нам параметри, які є базовими (вхідними) для ФМС. Більше того, унаслідок хемодинамічного моделювання ми отримуватимемо розподіл вмісту кожного хімічного елемента за об'ємом туманності, а у звичайному ФМС вміст кожного елемента вважається постійним за об'ємом туманності. Однак, правильність таких хемодинамічних симуляцій перевірити важко, бо вони не дають емісійного лінійчатого спектра. Тому постала ідея об'єднання цих двох моделей. І першим об'єктом, на прикладі якого планується розпочати застосування об'єднаного методу: хемодинамічних симуляцій і ФМС, є NGC 1569. Для цього планується провести ФМС цього об'єкта, яке ґрунтується на просторовому розподілі температури, густини та хімічного вмісту. Результати хемодинамічних симуляцій вище зазначеного об'єкта наведено у праці С. Рекі та ін. [4]. На рис. 1 показано порівняння результатів визначення вмісту кисню та азоту за допомогою хемодинамічного моделювання у припущенні одного епізоду зореутворення для двох значень швидкості зореутворення ($SFR = 0,1 M_{\odot} yr^{-1}$ та $SFR = 0,5 M_{\odot} yr^{-1}$) із даними, отриманими із спостережень діагностичними методами у праці [6].

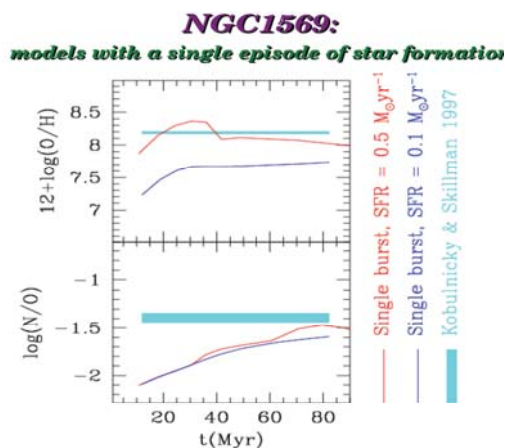


Рис. 1. Порівняння результатів визначення вмісту кисню і азоту за допомогою хемодинамічного моделювання у припущенні одного епізоду зореутворення для двох значень швидкості зореутворення (SFR) із даними, отриманими зі спостережень діагностичними методами у праці [6]

З рис. 1 видно, що жодна з моделей одинарного епізоду зореутворення не спроможна одночасно відтворити вмісти кисню та азоту, отримані зі спостереження. Також видно, що модель із $SFR = 0,5 M_{\odot} yr^{-1}$ показує максимум відносного вмісту кисню для віку 30–35 Myr з подальшим його зменшенням. Така поведінка пов'язана з перемішуванням газу від зоряного вмісту, збагаченого киснем з навколишнім газом із низьким вмістом важких елементів. Унаслідок такого перемішування, по-перше, збільшується вміст водню в одиниці об'єму і, по-друге, витісняється кисень за межі йонізаційного фронту, де йони кисню перестають світитися.

У праці Анджеретті та інших [7] запропоновано модель із декількома епізодами зореутворення, відповідно до рис. 2, що розділені періодами з відсутністю процесів зореутворення.

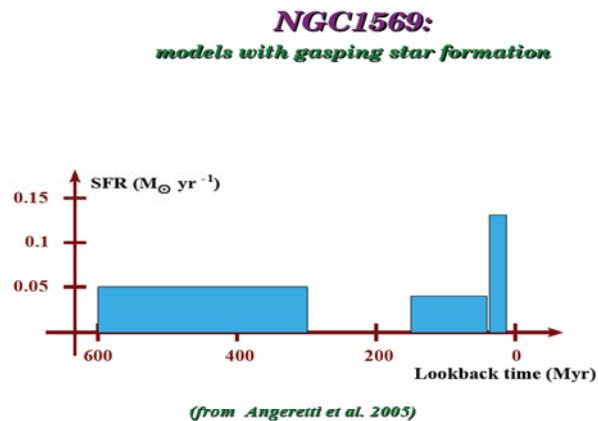


Рис. 2. Модель із праці Анджеретті та інших [7], що характеризується декількома епізодами зореутворення

Результати визначення відносного вмісту кисню та азоту для моделі з декількома епізодами зореутворення та їх порівняння із відповідними даними, отриманими зі спостережень, показані на рис. 3. Видно, що відносний вміст кисню для двох значень віку галактики досягає значення, отриманого зі спостережень. Відносний вміст азоту щодо кисню теж перекривається з відповідними даними, отриманими для спостережень, хоча збігу за часовими інтервалами O/H та N/O не має.

Також зазначимо, що автори [6] визначали іонний вміст діагностичними методами, а для обчислення повного хімічного вмісту використовували іонізаційно-корекційні множники, що враховують неспостережувані стадії іонізації. Діагностичні методи припускають однаковість електронних концентрацій і температур, а також, і іонного вмісту за повним об'ємом відповідної зони йонізації. Це припущення може значно відхилитися від реальності в умовах сильної неоднорідності газу і випромінювання, які маємо в околицях спалахів зореутворень. Отож розбіжності між вищезазначеними даними можуть бути спричинені і похибками визначення хімічного вмісту із спостережуваних спектрів.

NGC1569:
models with gasping star formation

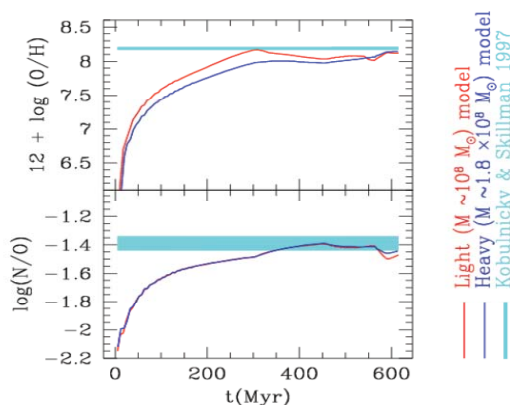


Рис. 3. Порівняння результатів визначення вмісту кисню та азоту за допомогою хемодинамічного моделювання у припущенні декількох епізодів зореутворення для двох значень маси речовини в області зореутворення із даними, отриманими із спостережень діагностичними методами у праці [6]

Точний шлях розрахунку синтетичних спектрів має базуватися на розрахунку перенесення іонізуючого випромінювання (тобто на ФМС) з урахуванням усіх похідних процесів. Саме тому ми розпочали роботу з метою об'єднання двох методів: хемодинамічного та фотойонізаційного моделювання. Однак, для уникнення хибних усереднень зони НП навколо області зореутворення варто розбити на невеликі ділянки, світіння кожної з яких моделюватимемо окремо. Для демонстрації неоднорідності розподілу густини газу на рис. 4 показано зріз, отриманий з хемодинамічних симуляцій у праці [4]. Світлі області відповідають більшій густині.

У праці [8] подано результати поверхневої фотометрії і спектроскопії, а також досліджено динаміку вітру в неправильній галактиці NGC 1569. У праці [6] наведено результати оптичної панорамної спектроскопії цього об'єкта. На рис. 4 прямокутниками показані області, звідки отримували спектр, а також напрям на спостерігача (Line of sights). Чітко видно, що у наближенні аксіальної симетрії внутрішні частини зони НП, сформовані дією зоряного вітру, є стінами правильного циліндра – зовнішні частини каверни супервітру (cavity walls).

На рис. 5 показано схематичне зображення карликової галактики NGC 1569 з праці [8]. Місця зореутворення показані біля центра темними кружечками. Унаслідок обертання галактики навколо областей зореутворення сформувався диск, внутрішні частини якого є зоною НП, а зовнішні – зоною НІ. Унаслідок дії зоряного вітру над і під диском сформувалися протяжні області розрідженого гарячого газу, який випромінює головню в Х-діапазоні, що було підтверджено результатами спостережень на космічному рентгенівському телескопі Chandra [8].

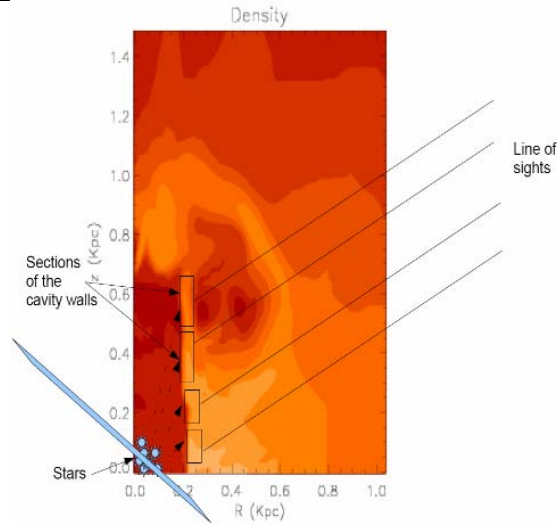


Рис. 4. Зріз мапи густини області навколо спалаху зореутворення. Показано напрям на спостерігача (Line of sights). Прямокутниками показано області, звідки отримували спектр

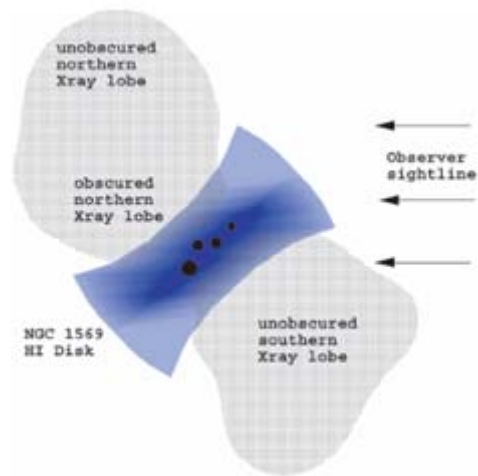


Рис. 5. Схематичне зображення карликової галактики NGC 1569

На підставі проаналізованого спостережуваного матеріалу ми прийшли до такого модельного плану. На рис. 6 показано схематичне зображення процесу фотойонізаційного моделювання на основі результатів хемодинамічних симуляцій. Ми будемо працювати у наближенні аксіальної симетрії. Область моделювання ми розбили на окремі сектори.

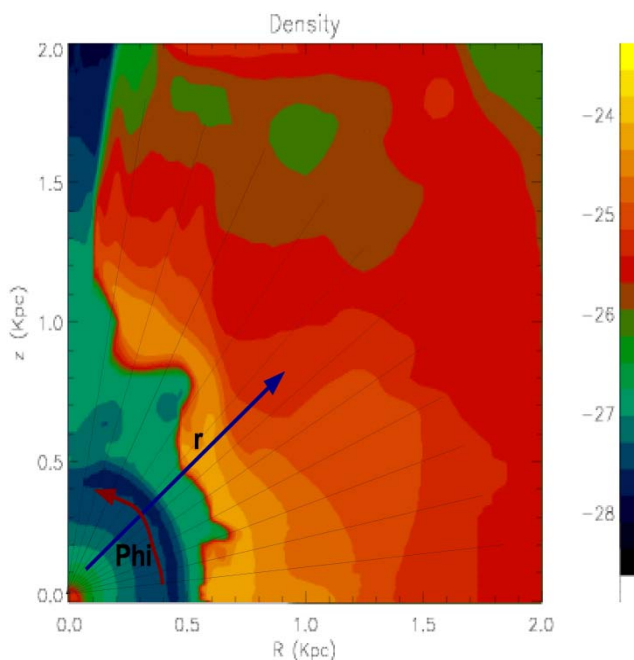


Рис. 6. Схематичне зображення процесу фотоіонізаційного моделювання на основі результатів хемодинамічних симуляцій. Шкала відтінків відповідає густинам в г/см^3

За результатами хемодинамічного моделювання весь цей циліндричний об'єм буде розбитий на окремі конусні сектори, у кожному з яких моделюватиметься перенос випромінювання. Дифузне йонізуюче випромінювання буде моделюватися у наближенні *outward only* (лише назовні), тобто ми не враховуватимемо проникнення випромінювання в сусідні сектори. Напрямок поширення йонізуючого випромінювання у моделі показаний на рис. 6 стрілкою. Таке припущення є частково виправдане тим, що ми моделюємо гігантську зону НІІ, в якій, через великі розміри, роль дилуції є великою, а відносний шлях вільного пробігу дифузного фотону малий.

Кожний із вище згаданих конусів теж ділиться у радіальному напрямі на окремі частини завтовшки близько 5 пк. Перенесення випромінювання у кожній частині моделюватиметься окремо. При цьому у кожній з них буде задаватися (за результатами хемодинамічного моделювання) густина газу і хемічний уміст. Для найглибшого внутрішнього шару (в кожному з секторів) світіння збуджуватиметься *L_{yc}*-спектром (лайманівським континуальним), яке проходить безпосередньо від спалаху зореутворення. У наступному шарі світіння збуджуватиметься *L_{yc}*-спектром, трансформованим у першому і так далі, поки модель не вийде на йонізаційну межу (електронна температура: $T_e < 4000\text{K}$). Тому кожний із цих шарів даватиме свій спектр. Отож перенесення випромінювання у кожному з секторів, з урахуванням всіх важливих

елементарних процесів у газовій плазмі, має характер мультикомпонентного фотойонізаційного моделювання.

Для розрахунку лайманівського іонізуючого спектра спалаху зореутворення ми використали код *Starburst99* [9]. При цьому модель спалаху зореутворення була розрахована за такими параметрами:

- розподіл кількості зір за масами є у межах $M_{low} = 0,1M_{Sun}$, $M_{up} = 60M_{Sun}$;
- функція розподілу мас задається степеневим законом із показником степеня $-2,35$;
- швидкість зореутворення $SFR = 0,13M_{Sun}yr^{-1}$;
- вік спалаху 24 млн років.

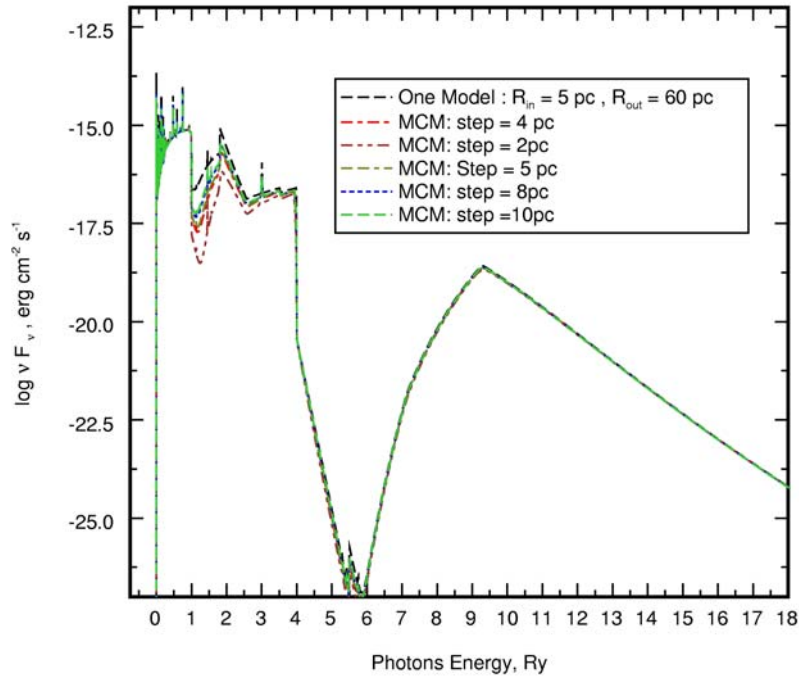


Рис. 7. Порівняння результуючих спектрів одно- та мультикомпонентних ФМС

Мультикомпонентні ФМС, що розраховуються у наближенні *outward only*, мають давати точніші результати, ніж однокомпонентні. Це пов'язане з тим, що під час розрахунку однокомпонентної ФМС програма самостійно ділить туманність на частини, встановлюючи ширину модельованого шару (чи елемента об'єму), за яким значення фізичних характеристик вважаються сталими. Зазвичай отримуємо товщини зовнішніх шарів набагато більші, ніж внутрішніх. Мультикомпонентне моделювання є послідовністю фотойонізаційних моделей окремих шарів з фіксованою відносно невеликою товщиною. Тому неточності від усереднень за об'ємом (чи радіусом) у мультикомпонентному моделюванні є набагато меншими, ніж у випадку однокомпонентного. З метою підтвердження останнього твердження, ми обчислили одно- і мультикомпонентну модель сектора з внутрішнім радіусом 5 і зовнішнім – 60 пк.

Зовнішній радіус обрано меншим, ніж радіус іонізаційної межі, тому іонізуюче випромінювання виходить за межі туманності. Саме результуючі (на зовнішньому радіусі туманності) спектри порівнюються на рис. 7. Було обчислено декілька мультикомпонентних моделей з різними товщинами шарів (від 2 до 10 пк). Як видно з рисунка, чим менша товщина шарів у мультикомпонентній моделі (більша кількість компонент), тим більше результуючий спектр однокомпонентної моделі відхиляється від відповідного спектра мультикомпонентної.

На сьогодні ведеться співпраця із Г. Генслером (Австрія) та С. Рекі (Італія), які завершують хемодинамічні симуляції NGC 1569 і готують конкретні результати для ініціалізації фотойонізаційного моделювання.

1. *Мелех Б.Я.* Оптимізоване фотойонізаційне моделювання світіння НІІ зони в блакитній компактній карликовій галактиці SBS 0940+544 // Журн. фіз. досл. 2006. Т. 11. № 2. С. 148–159.
2. *Мелех Б.Я.* Оптимізоване фотойонізаційне моделювання світіння НІІ зони в блакитній компактній карликовій галактиці SBS 0335-052 // Журн. фіз. досл. 2007. Т. 11. № 3. С. 353–365.
3. *Melekh B.Ya., Holovaty V.V., Izotov Yu.I.* Determination of the Physical Parameters, Lyman Continua, and Chemical Compositions of HII Regions in Blue Compact Dwarf Galaxies // Astron. Reports. 2008. Vol. 52. N 3. P. 184–200.
4. *Recchi S., Hensler G., Angeretti L., Matteucci F.* Dynamical and chemical evolution of NGC 1569 // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2001. Vol. 322. P.800–820.
5. *Bedogni R., D'Ercole A.* Limits of interacting stellar winds model of planetary nebulae. A numerical study // Astron. and Astrophys. 1986. Vol. 157. N 1. P. 101–112.
6. *Kobulnicky H. A., Skillman E.D.* Elemental abundance variations and chemical enrichment from massive stars in starbursts. II. NGC 1569 // The Astrophys. J. 1997. Vol. 489. P. 636–655.
7. *Angeretti L., Tosi M., Greggio L., Sabbi E. et al.* The Complex Star Formation History of NGC 1569 // The Astronom. J. 2005. Vol. 129. P.2203—2216.
8. *Martin C. L., Kobulnicky H.A., Heckman T.M.* The metal content of dwarf starburst winds: results from Chandra observations of NGC 1569 // The Astrophys. J. 2002. Vol. 574. P. 663–692.
9. *Leitherer C., Schaerer D., Goaldader J.D. et al.* Starburst 99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation // Astrophys. J. Supplement ser. 1999. Vol. 123. P. 3–40.

DETAILED PHOTOIONIZATION MODELLING OF THE STARBURST VICINITIES**M. Sokil, B. Melekh**

*Ivan Franko National University of Lviv
Department of Astrophysics
8 Kyryla and Mefodija Str., UA-79005 Lviv, Ukraine
e-mail: melekh@physics.wups.lviv.ua*

The two methods were considered: the photoionization modelling (PhM) and the chemodynamical symulation of the starburst vicinities. In this paper we combined these methods with calculation purpose of the emission lines spectrum of the HII regions surrounding of the starburst. The sense of the combining is in the using of the chemodynamical symulations (spatial density and chemical composition distributions in HII region) in the detailed photoionization modelling of the nebula several parts with following compilation of the corresponding model spectra with comparison purpose of the resulting modelling data with correspond ones obtained from spectroscopical observations. We start the using of this method to the testing of the chemodynamical symulations results of the star formation processes in dwarf galaxy NGC 1569. The multicomponent photoionization modelling code was developed and tested to the release of the above combined method.

Key words: photoionization modelling, chemodynamical symulations, cosmic hydrodynamics, HII regions, starburst.

**ДЕТАЛЬНОЕ ФОТОИОНИЗАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ
ОКОЛИЦ ВСПЫШКИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ****М. Сокол, Б. Мелех**

*Львовский национальный университет им. И. Франко
кафедра астрофизики
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 Львов, Украина
email: melekh@physics.wups.lviv.ua*

Рассмотрены два метода: фотоионизационного моделирования свечения (ФМС) и хемодинамических симуляций околиц области звездообразования. В данной работе мы объединили эти методы с целью расчета синтетического эмиссионного линейчатого спектра зоны HII вокруг вспышки звездообразования. Суть объединения заключается в использовании результатов хемодинамического моделирования (пространственного распределения плотности газа и химического содержания по объему зоны HII) в детальном фотоионизационном моделировании отдельных частей туманности с последующей компиляцией их модельных спектров с целью сравнения с соответствующими данными спектроскопических наблюдений. Начато применение данного метода для тестирования результатов хемодинамических симуляций процессов звездообразования в карликовой галактике NGC 1569. Для реализации метода был написан и протестирован мультикомпонентный код.

Ключевые слова: фотоионизационное моделирование свечения, хемодинамические симуляции, космическая гидродинамика, области HII, вспышка звездообразования.

Стаття надійшла до редколегії 01.07.2008

Прийнята до друку 20.07.2009