



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 218–225

УДК 524.523–36

## Методи визначення вмісту кисню в HII областях. Розподіл вмісту кисню в дисках спіральних галактик

Р.В. Шкварун, Л.С. Пілюгін

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

*Проведено аналіз різних методів визначення вмісту кисню в HII областях Галактики. Недавно запропонований Р-метод добре узгоджується з  $T_e$ -методом, а  $R_{23}$ -метод дає велику систематичну похибку. Визначено вміст кисню в HII областях спіральних галактик за допомогою Р-методу, використовуючи зібрані з літератури спектральні дані. Знайдені параметри радіального розподілу вмісту кисню в дисках цих галактик. Проведений пошук глобальної азимутальної асиметрії в розподілі вмісту кисню в дисках досліджуваних галактик. Розподіл вмісту кисню в дисках досліджуваних галактик є азимутально симетричним, принаймні в першому наближенні.*

*МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В HII ОБЛАСТЯХ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ДИСКАХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК, Шкварун Р.В., Пілюгін Л.С. — Проведен анализ разных методов определения содержания кислорода в HII областях Галактики. Недавно предложенный Р-метод хорошо согласуется с  $T_e$ -методом, а  $R_{23}$ -метод дает большую систематическую погрешность. Определено содержание кислорода в HII областях спиральных галактик при помощи Р-метода, используя собранные из литературы спектральные данные. Найденны параметры радиального распределения содержания кислорода в дисках этих галактик. Проведен поиск глобальной азимутальной асимметрии в распределении содержания кислорода в дисках исследуемых галактик. Распределение содержания кислорода в дисках исследованных галактик являются азимутально симметричными, по крайней мере в первом приближении.*

*METHODS OF DETERMINATION OF THE ABUNDANCE OF OXYGEN IN HII REGIONS. OXYGEN ABUNDANCE DISTRIBUTION IN DISKS OF SPIRAL GALAXIES, by Skvarun R.V., Pilyugin L.S. — The analysis of different methods of determination of the abundance of oxygen in HII regions of the Galaxy have been derived. Recently offered P-method well coordinated with  $T_e$ -method, and  $R_{23}$ -method gives a big regular error. Oxygen abundances in HII regions of spiral galaxies have been derived through the P-method using published spectrophotometric data. The values of the radial oxygen abundance gradients were determined. The search for a global asymmetry in oxygen abundance distributions over the disks of galaxies was carried out. We do not find a significant signs of global asymmetry with one exception. Distribution of the abundance of oxygen in disks of the investigated galaxies are azimuthal-symmetric.*

### 1. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВМ'СТУ КИСНЮ В HII ОБЛАСТЯХ

#### 1.1. $T_e$ -метод

Найнадійнішим методом визначення вмісту кисню в HII областях є  $T_e$ -метод. Цей метод визначення хімічного складу газових туманностей за відомою електронною температурою був запропонований декілька десятків років тому і детально описаний.  $T_e$ -метод застосовний, коли виміряно чутливі до температури відношення інтенсивностей ліній [OIII] $\lambda\lambda$ 4959, 5007/[OIII] $\lambda$ 4363. Згаданий метод визначення хімічного складу HII областей загально прийнято називати  $T_e$ -метод. Вміст кисню, визначений за допомогою  $T_e$ -методу ми позначаємо  $(O/H)_{T_e}$ .

В спектрах HII областей спіральних галактик лінія [OIII] $\lambda$ 4363 дуже слабка і, як правило, не спостерігається. Тому вміст кисню в більшості HII областей не визначається за допомогою  $T_e$ -методу. Згаданий факт слугував причиною розробки альтернативних методів визначення вмісту кисню в HII областях:  $R_{23}$ -метод [4], Р-метод [6, 7]. Використання різних методів визначення вмісту кисню в HII

областях породжує проблему, яка полягає в тому, що різні методи можуть давати значення вмісту кисню, які не узгоджуються між собою. Використання значень вмісту кисню, отриманих різними методами, має сенс тільки тоді, коли різні методи дають значення вмісту кисню, які узгоджуються, для одного і того ж об'єкта.

## 1.2. $R_{23}$ -метод

Вміст кисню в більшості НІ областей не може бути визначений за допомогою  $T_e$ -методу. Інтенсивності сильних емісійних ліній кисню [ОІІ]λλ3726, 3729 і [ОІІ]λλ4959, 5007 можуть бути виміряні достатньо точно в спектрах НІ областей в нашій та інших галактиках (такі інтенсивності відомі для декількох сотень НІ областей в неправильних і спіральних галактиках). Пейджел та інші [5] запропонували метод визначення вмісту кисню в НІ областях, в якому використовуються тільки інтенсивності сильних кисневих ліній – це припущення отримало широке визнання і застосування. Вони запропонували використовувати в якості індикатора вмісту кисню в НІ областях величину  $R_{23} = (I_{[OII]\lambda 3727, \lambda 3729} + I_{[OII]\lambda 4959, \lambda 5007}) / I_{H\beta}$ .

Метод визначення вмісту кисню в НІ областях за допомогою співвідношення між вмістом кисню і величиною  $R_{23}$  називають  $R_{23}$ -методом. Частіше від інших використовується калібровка запропонована Едмундсом і Пейджелом [4]. Ця калібровка показана на рис. 1 суцільною лінією. Для зручності використання ми апроксимували калібровку Едмундса і Пейджела для розповсюдженостей кисню  $12 + \log O/H > 8.2$  поліномом

$$12 + \log (O/H)_{R_{23}} = 9.302 - 0.403x - 0.675x^2 - 0.701x^3 + 0.666x^4 \quad (1)$$

де  $x = \log R_{23}$ . Визначений за допомогою  $R_{23}$ -методу вміст кисню в НІ областях позначається як  $(O/H)_{R_{23}}$ .

Вміст кисню у великій кількості НІ областей в спіральних галактиках визначений за допомогою  $R_{23}$ -методу. Однак, факт існування різних  $R_{23}$ -калібровок ([4] та інші) (поряд з  $R_{23}$ -методом, запропоновані методи, в яких постулюється відповідність між вмістом кисню в НІ області і деякою комбінацією інтенсивностей сильних ліній в її спектрі) породжує питання: наскільки узгоджується вміст кисню, отриманий за допомогою  $R_{23}$ -методу, з вмістом кисню, отриманим за допомогою  $T_e$ -методу? На даний момент відповідь на дане питання може бути отримана шляхом безпосереднього порівняння значень  $(O/H)_{T_e}$  і  $(O/H)_{R_{23}}$  для одних і тих же НІ областей. В  $T_e$ - і  $R_{23}$ -методах використовуються одні і ті ж виміри інтенсивностей ліній [ОІІ]λλ3726, 3729 і [ОІІ]λλ4959, 5007, що забезпечує коректність порівняння  $(O/H)_{T_e}$  і  $(O/H)_{R_{23}}$ .

Був отриманий однорідний (з точки зору методики визначення вмісту кисню) масив значень  $(O/H)_{T_e}$  [6–8]. Положення НІ областей на діаграмі  $O/H - R_{23}$  показані точками (рис. 1). Рис. 1 переконливо демонструє відсутність однозначної відповідності між вмістом кисню і величиною  $R_{23}$ . Більше того, різниця  $\Delta(O/H) = (O/H)_{R_{23}} - (O/H)_{T_e}$  залежить від параметра збудження НІ області [6, 7], тобто похибки значень вмісту кисню не є випадковими, а носять систематичний характер. Природа систематичної похибки  $R_{23}$ -методу доволі очевидна. В загальному випадку інтенсивності кисневих ліній в спектрі НІ області залежать від розповсюдженості кисню і фізичних умов в туманності. В  $T_e$ -методі різниця в фізичних умовах в різних туманностях з однаковими значеннями  $R_{23}$  враховується за допомогою електронної температури, в  $R_{23}$ -методі різниця в фізичних умовах в різних туманностях з однаковими значеннями  $R_{23}$  не враховується.

Таким чином, ми робимо висновок, що припущення про однозначне співвідношення між вмістом кисню і величиною  $R_{23}$ , покладене в основу  $R_{23}$ -методу, не підтвержується даними про НІ області, в яких вміст кисню визначено за допомогою  $T_e$ -методу.

## 1.3. Р-метод

Було показано, що різниця в фізичних умовах в різних туманностях з однаковими значеннями  $R_{23}$  може бути врахована за допомогою параметра збудження Р [6–8]. Використовуючи базову вибірку НІ областей, вміст кисню в яких надійно визначено за допомогою  $T_e$ -методу, було отримано співвідношення між вмістом кисню в НІ області і інтенсивностями сильних кисневих ліній в її

спектрі [6, 7],

$$12 + \log (\text{O}/\text{H})_P = \frac{R_{23} + 54.2 + 59.45P + 7.31P^2}{6.07 + 6.71P + 0.37P^2 + 0.243R_{23}}, \quad (2)$$

де  $R_{23} = R_2 + R_3$ ,  $R_2 = I_{[\text{OII}]\lambda 3727 + \lambda 3729} / I_{\text{H}\beta}$ ,  $R_3 = I_{[\text{OIII}]\lambda 4959 + \lambda 5007} / I_{\text{H}\beta}$ ,  $P = R_3 / R_{23}$ .

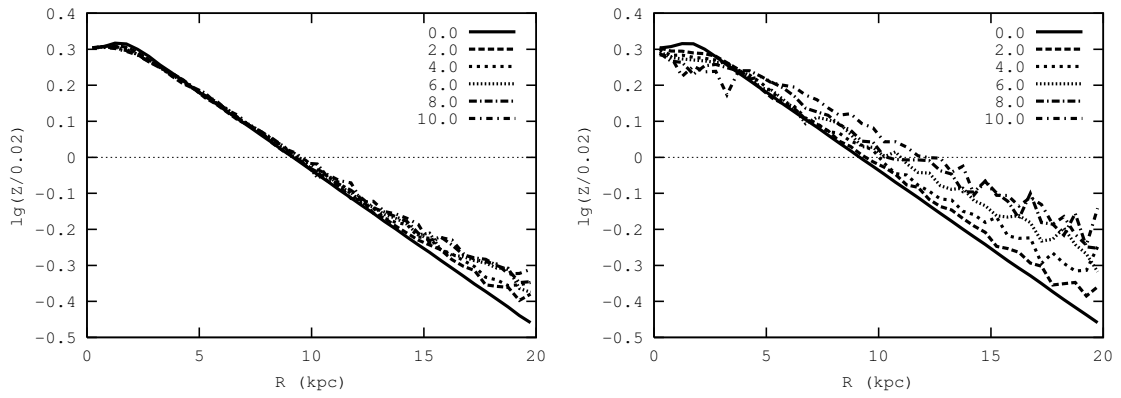
Різниця між  $R_{23}$ -методом і запропонованим  $P$ -методом полягає в тому, що в  $P$ -методі немає припущення про однозначне співвідношення між вмістом кисню і величиною  $R_{23}$ . Кожному значенню параметра збудження  $P$  відповідає своє співвідношення між вмістом кисню і величиною  $R_{23}$ . Співвідношення між вмістом кисню і величиною  $R_{23}$  для трьох значень параметра збудження  $P$  показані на рисунку 1 штрихованими лініями. В рамках  $P$ -методу використовується інтегральний параметр збудження  $P$ . Визначений за допомогою  $P$ -методу вміст кисню в НІІ області позначається як  $(\text{O}/\text{H})_P$ .

Основною перевагою  $P$ -методу є те, що в ньому використовуються тільки сильні кисневі лінії, які надійно вимірюються в НІІ областях багатьох галактик. При цьому  $P$ -метод забезпечує точність визначення вмісту кисню, співрозмірну з точністю  $T_e$ -методу.

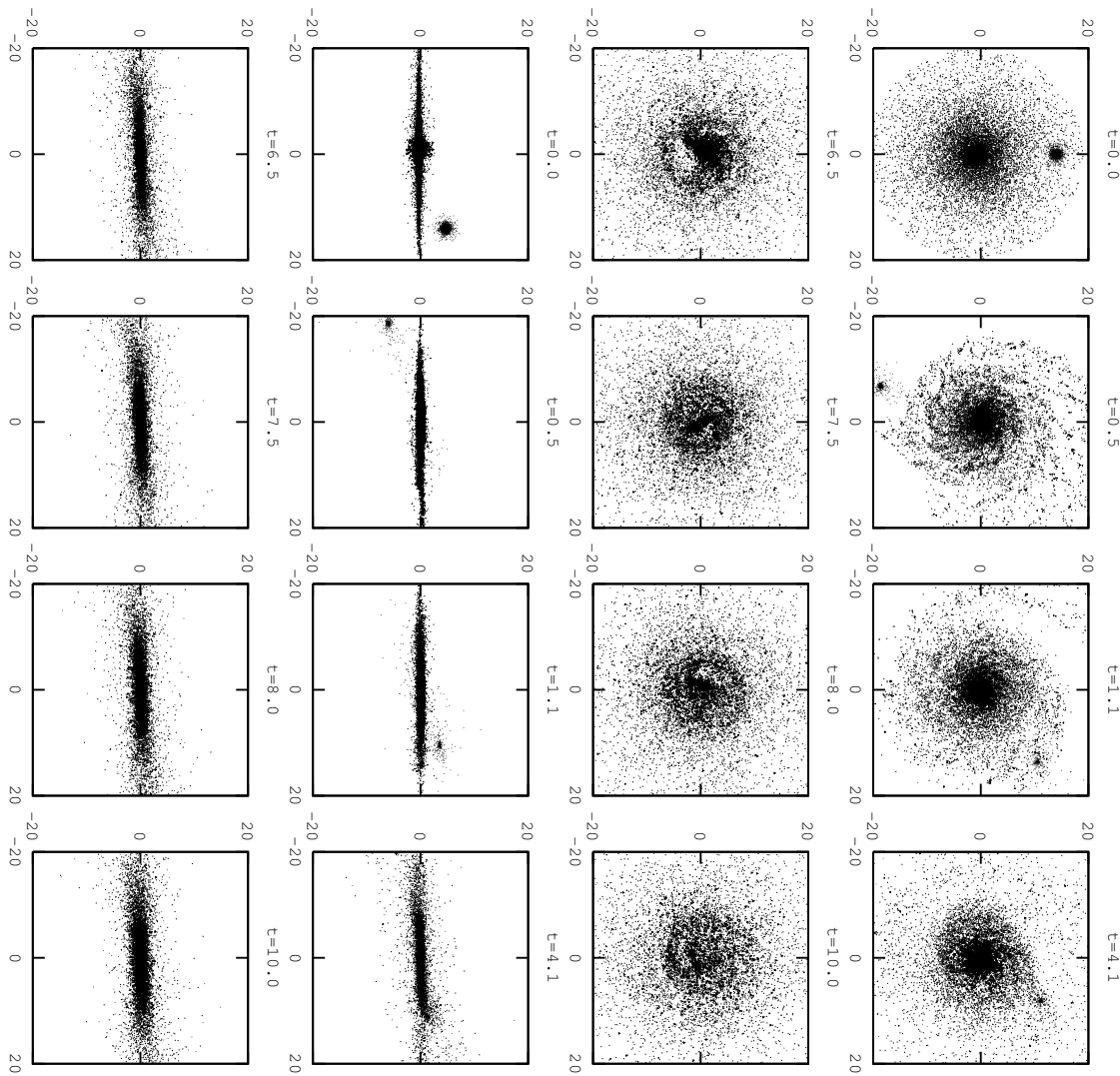
Детальніше з методами визначення вмісту кисню в НІІ областях і результатами порівняння методів можна ознайомитися в працях [1, 9].

#### 1.4. Висновки

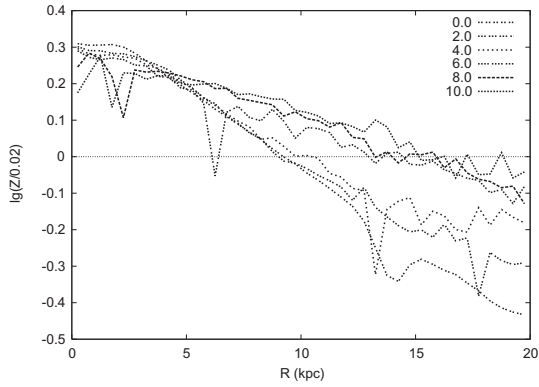
Проведено аналіз методів визначення вмісту кисню в НІІ областях Галактики за допомогою  $T_e$ -,  $R_{23}$ - та недавно запропонованого  $P$ -методу.  $P$ -метод добре узгоджується з  $T_e$ -методом, а  $R_{23}$ -метод дає велику систематичну похибку.



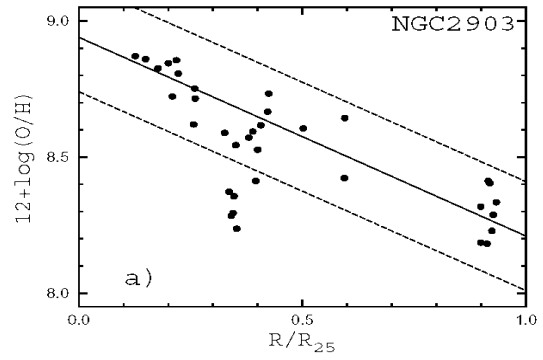
**Рис. 1.** Радиальные распределения содержания тяжелых элементов дисковой галактики (без спутника) без учета вязкости (а) и для значения диссипативного коэффициента  $1 - \text{coef}_{\text{coll}} = 0.10$  (б) соответственно в разные моменты времени  $t = 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$



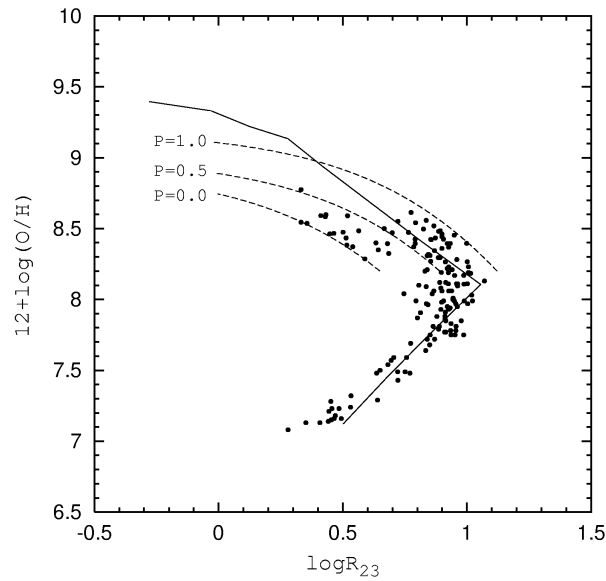
**Рис. 2.** Эволюция дисковой галактики при поглощении спутника для значения диссипативного коэффициента  $1 - \text{coef}_{\text{coll}} = 0.10$ . Верхние два ряда соответствуют проекции на ось XY, а нижние два ряда — на ось YZ.



**Рис. 3.** Радиальное распределение содержания тяжелых элементов для дисковой галактики со спутником и для значения диссипативного коэффициента  $1 - \text{coef}_{\text{coll}} = 0.10$  соответственно в разные моменты времени  $t = 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$



**Рис. 4.** Радиальное распределение содержания кислорода в дисковой галактике NGC 2903, полученное в работе [2].



**Рис. 1.**  $R_{23} - \text{O}/\text{H}$  діаграма. Точки положення НП областей, в яких вміст кисню визначений за допомогою  $T_e$ -методу. Суцільна лінія — співвідношення між величиною  $R_{23}$  і вмістом кисню, запропоноване Едмундсом і Пейджелом [4]. Штриховані лінії — співвідношення між вмістом кисню і величиною  $R_{23}$  в рамках  $P$ -методу для трьох значень параметра збудження  $P$

## 2. РОЗПОДІЛ ВМ'СТУ КИСНЮ В ДИСКАХ СПІРАЛЬНИХ ГАЛАКТИК

### 2.1. Вступ

Дослідження радіального розподілу вмісту кисню в дисках спіральних галактик показали, що розподіл  $O/H$  можна добре представити єдиною експоненціальною функцією [10–12]. Принято вміст кисню виражати в логарифмічній шкалі. Тому розподіл кисню в дисках спіральних галактик описується лінійним рівнянням:

$$12 + \lg(O/H) = a + b \times r, \quad (3)$$

де  $(O/H)$  — відношення вмісту кисню до вмісту водню за числом атомів на галактичній відстані  $r$ ;  $a$  і  $b$  — коефіцієнти прямої, яка описує співвідношення між  $(O/H)$  і  $r$ .

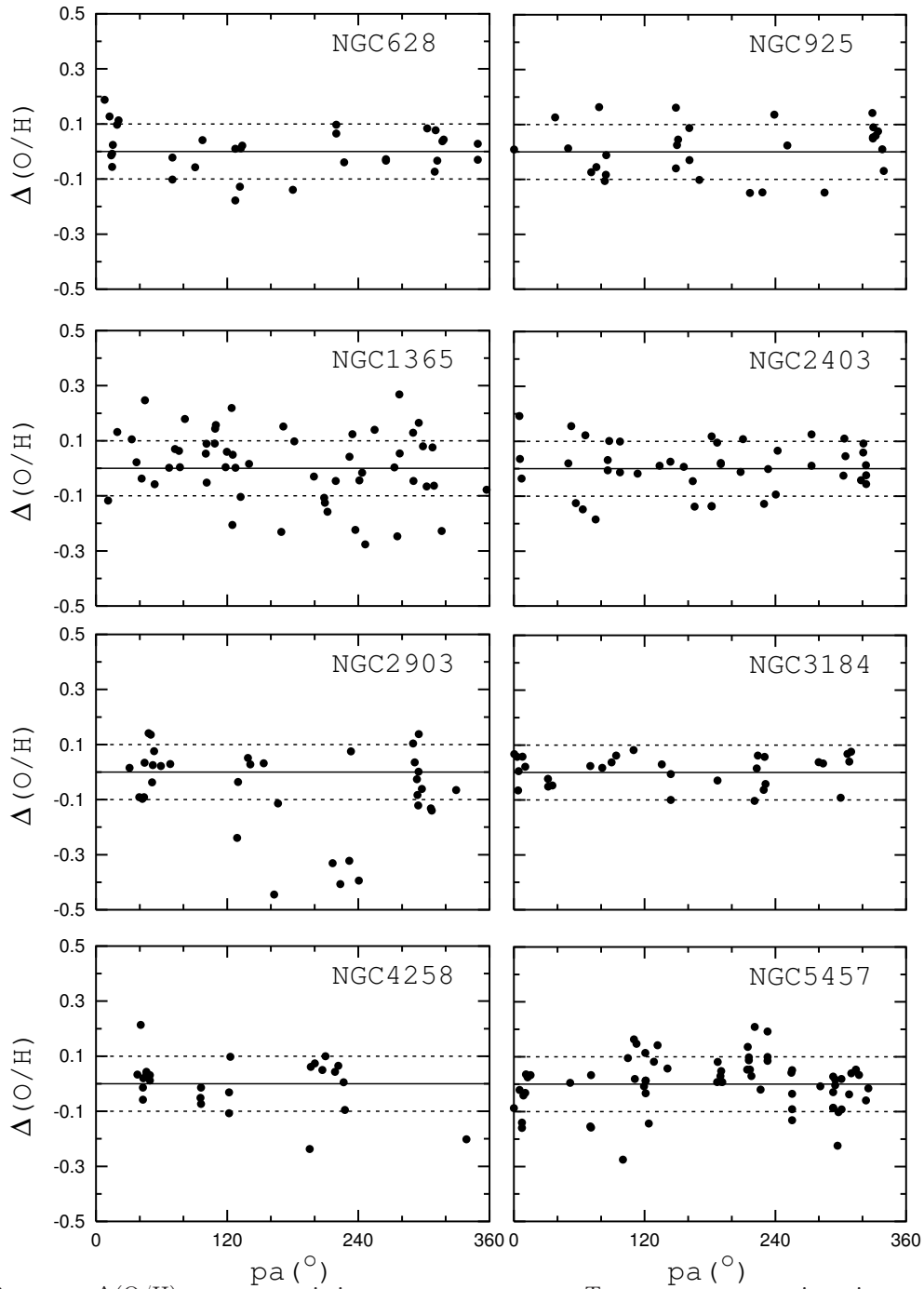
Дослідження розподілу вмісту кисню в дисках спіральних галактик показують, що в дисках всіх галактик існує розкид значень вмісту кисню в НІI областях з близькими галактоцентричними відстанями [3, 10–12]. Розкид частково (можливо більшою частиною) обумовлений похибками визначення вмісту кисню. При вивченні радіального розподілу вмісту кисню в дисках галактик неявно припускається азимутальна симетрія в розподілі вмісту кисню, тобто припускається, що НІI області з близькими галактоцентричними відстанями мають близькі вмісти важких елементів. В дійсності, дві області з галактоцентричними відстанями, скажімо 15 кпк, можуть бути просторово віддалені одна від одної на 30 кпк. Еволюціонувати ці області галактики будуть незалежно, і не виключено, що вони не будуть мати однаковий хімічний склад. Якщо існує азимутальна асиметрія в розподілі вмісту кисню, то це може давати вклад в розкид вмістів кисню в НІI областях з близькими галактоцентричними відстанями. Можливість існування азимутальної асиметрії була вперше зауважена Гарнеттом в його роботі [3] для галактики NGC 5457.

Вмісти кисню в НІI областях спіральних галактик визначались за допомогою  $P$ -методу. Для восьми спіральних галактик знайдені радіальні розподіли вмісту кисню і визначені параметри  $a$  і  $b$  (рівняння 3). Для кожної НІI області ми знаходили відхилення вмісту кисню від типового для даної галактоцентричної відстані  $\Delta(O/H) = \lg(O/H)_{obs} - \lg(O/H)_r$ , де  $(O/H)_{obs}$  — значення вмісту кисню, визначене за спектральними даними,  $(O/H)_r$  — значення вмісту кисню визначені за допомогою рівняння (3) для даної галактоцентричної відстані  $r$ . Якщо для НІI області величина  $\Delta(O/H)$  перевищує 0.1 dex, то таку НІI область ми відносили до областей з підвищеним вмістом кисню, якщо величина  $\Delta(O/H)$  нижче  $-0.1$  dex, то таку НІI область ми відносили до областей з пониженим вмістом кисню. На рисунку 2 показані значення  $\Delta(O/H)$  в залежності від азимутального кута.

### 2.2. Результати і обговорення

В дисках галактик NGC628, NGC925, NGC1365, NGC2403, NGC3184 і NGC4258 не виявлено відхилень від азимутальної симетрії в розподілі вмісту кисню. Дисперсія вмісту кисню в НІI областях з близькими галактоцентричними відстанями в галактиці NGC1365 вище, ніж в інших галактиках. Даний факт обумовлений тим, що у випадку цієї галактики інтенсивності емісійних ліній в НІI областях визначались шляхом фотографування галактики в певному фільтрі. Таким чином, авторам вдалось отримати інтенсивності ліній великої кількості НІI областей одночасно. Точність таких спостережень нижче точності, якби спектральні спостереження кожної НІI області проводились окремо, що і стало причиною великого розкиду значень вмістів кисню в НІI областях з близькими галактоцентричними відстанями.

Як видно з рисунка 2, в галактиці NGC2903 виявлена група НІI областей, в яких вміст кисню значно відрізняється від середнього для даної галактоцентричної відстані. Ця група НІI областей займає невелику площадку в галактиці. Походження пониженого вмісту кисню в цій групі НІI областей не відоме. Можна запропонувати декілька пояснень цього явища. Наприклад, локальний приток газу з пониженим вмістом кисню (та інших важких елементів) з міжгалактичного середовища (і/або захоплення галактикою маломасивної карликової галактики), що могло призвести до утворення в галактиці області з пониженим вмістом важких елементів. По-друге, ця група НІI областей може бути не в самій галактиці NGC2903, а знаходитись в близькій до NGC2903 карликовій галактиці,



**Рис. 2.** Значення  $\Delta(\text{O}/\text{H})$  в залежності від азимутального кута. Точки на рисунках відповідають НІІ областям. Суцільна лінія — це лінія, вздовж якої відхилення вмісту кисню дорівнюють нулю. Пунктирні лінії відповідають відхиленням вмісту кисню  $\pm 0.1 \text{ dex}$ .

проектуючись на галактику NGC2903. В цьому випадку очевидно, що в цих HII областях вміст елементів буде іншим, ніж в галактиці NGC2903.

В галактиці NGC5457 області з підвищеним вмістом кисню лежать в секторі позиційних кутів від  $\sim 110^\circ$  до  $\sim 240^\circ$ . Це можна розглядати як вказівку на існування азимутальної асиметрії в даній галактиці. В галактиці NGC5457 відхилення вмісту кисню не носять систематичного характеру. Надійні висновки про існування азимутальної асиметрії в галактиці можуть бути зроблені тільки після отримання більш точних спостережуваних даних.

Детальніше про досліджені галактики і інтенсивності ліній в спектрах HII областей можна ознайомитися в [2].

### 2.3. Висновки

Визначено вміст кисню за допомогою *P*-методу в HII областях 8 спіральних галактик. Визначені параметри радіального розподілу вмісту кисню для кожної галактики. На основі отриманих результатів ми робимо висновок, що розподіли вмісту кисню в досліджуваних галактиках азимутально симетричні, по крайній мірі в першому наближенні. В галактиці NGC2903 виявлена компактна група HII областей, в яких вміст кисню нижче середнього значення для даної галактоцентричної відстані на 0.3–0.4 dex. В галактиці NGC5457 HII області з підвищеним вмістом кисню концентруються в секторі з кутом розгортки  $\sim 130^\circ$ , що, можливо, свідчить про відхилення розподілу вмісту кисню від азимутальної симетрії.

1. *Пильогин Л.С., Феррини Ф., Шкварун Р.В.* О содержании кислорода в областях HII Галактики // Кинематика и физика небесных тел. — 2002. — **18**, № 1. — С. 55–68.
2. *Шкварун Р.В., Пильогин Л.С.* Распределение содержания кислорода в дисках восьми спиральных галактик // Кинематика и физика небесных тел — 2004. — **20**, № 1. — С. 59–67.
3. *Garnett D.R., Kennicutt R.C.* A very metal poor HII region in the outer disk of M101 // *Astrophys.J.* — 1994. — **426**, № 1. — P. 123–130.
4. *Edmunds M.G., Pagel B.E.J.* On the composition of HII regions in southern galaxies — III. NGC 2997 and 7793 // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* — 1984. — **211**, № 3. — P. 507–519.
5. *Pagel B.E.J., Edmunds M.G., Blackwell D.E., Chun M.S., Smith G.* On the composition of HII regions in southern galaxies. I. NGC300 and 1365 // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* — 1979. — **189**, № 1. — P. 95–113.
6. *Pilyugin L.S.* On the oxygen abundance determination in HII regions. The problem of the line intensities — oxygen abundance calibration // *Astron. and Astrophys.* — 2000. — **362**, № 2. — P. 325–332.
7. *Pilyugin L.S.* On the oxygen abundance determination in HII regions. High-metallicity regions // *Astron. and Astrophys.* — 2001. — **369**, № 3. — P. 594–604.
8. *Pilyugin L.S.* The oxygen abundance distribution in M 101 // *Astron. and Astrophys.* — 2001. — **373**, № 1. — P. 56–62.
9. *Pilyugin L.S., Ferrini F., Shkvarun R.V.* On the oxygen abundance in our Galaxy // *Astron. and Astrophys.* — 2003. — **401**, № 2. — P. 557–563.
10. *Pilyugin L.S., Vilchez J.M., Contini T.* Oxygen and nitrogen abundances in spiral galaxies. I. Radial distributions // *Astron. and Astrophys.* — 2003. — submitted.
11. *van Zee L., Salzer J.J., Haynes M.P., O'Donoghue A.A., Balonek T.J.* Spectroscopy of outlying HII regions in spiral galaxies: abundances and radial gradients // *Astron. J.* — 1998. — **116**, № 6. — P. 2805–2833.
12. *Zaritsky D., Kennicutt R.C., Huchra J.P.* HII regions and the abundance properties of spiral galaxies // *Astrophys. J.* — 1994. — **420**, № 1. — P. 87–109.

Надійшла до редакції 6.09.2004