ISSN 1024-588X. Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2014. Випуск 49. С. 116-123
Visnyk of the Lviv University. Series Physics. 2014. Issue 49. P. 116-123

УДК 524.37, 524.5, 524.7
PACS 98.38.Am, 98.38.Ly

ХІМІЧНИЙ СКЛАД ВОЛОКОН КРАБОВИДНОЇ ТУМАННОСТІ

В. Головатий, Б. Мелех, Н. Гаврилова

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна

Отримано хімічний склад волокон Крабовидної туманності за допомогою двох методів: використано нові іонізаційно-корекційні множники, які враховують неоднорідності густини небулярного газу, та новий 3-стадійний метод оптимізаційного фотоіонізаційного моделювання небулярного газу.

Ключові слова: Крабовидна туманність; небулярна діагностика; фотоіонізаційне моделювання.

Волокна Крабовидної туманності є залишком Наднової, що спалахнула у 1054 році. Спектр волокон нагадує спектр планетарних туманностей, світіння яких, як відомо, збуджується іонізуючим випромінюванням центральних зір. Світіння газу у волокнах збуджується іонізуючим випромінюванням "аморфної маси" Крабовидної туманності, що являє собою світіння релятивістських електронів в її магнітному полі.

Питання про хімічний склад газу у волокнах обговорюється астрофізиками вже багато років [1-4]. Виявилося, що дані про хімічний склад волокон, отримані різними авторами, сильно різняться між собою. Особливо це стосується гелію, вміст якого досить сильно відрізняється від "нормального". Така різниця хімічного складу не може бути зумовлена похибками спостережень чи існуючих методів його визначення і, очевидно, є реальною. Зокрема, в роботі В.Головатого та В.Проника [2] вперше було зроблено висновок про наявність радіальної дисперсії хімічного складу у волокнах цієї туманності.

В цій роботі приведено нові результати кількісного аналізу хімічного складу волокон Крабовидної туманності. Спостережуваною основою дослідження були спектри окремих волокон, опубліковані в роботах [5-7]. Також для точнішого визначення хімічного складу окремих волокон було використано нову методику, що полягає у багатостадійному оптимізаційному фотоіонізаційному моделюванні світіння небулярного газу [8]. В табл.1 приведено спектри окремих волокон туманності з роботи Р.Фесена та Р.Кіршнера [7], інтенсивності ліній яких були використані нами для визначення та аналізу хімічного складу при застосуванні обох методик.

Електронні температури T_e, електронні густини n_e, іонні вмісти та хімічний склад для окремих волокон Крабовидної туманності визначено за допомогою програми FREE DIAGN [9] з використанням нових іонізаційно-корекційних множників, що враховують наявність неоднорідностей небулярного газу [10] (Табл.2).

© Головатий В., Мелех Б., Гаврилова Н., 2014

Відстані від центру Крабовидної туманності до окремих волокон перераховано для відстані до туманності R=1800 пк. Для розрахунку відстаней до спостережуваних частин Крабовидної туманності використано іонні вмісти O^+/H^+ та O^{++}/H^+, усереднені за радіусом та зважені за електронною густиною. Нами була отримана наступна залежність відстаней до відповідних спостережуваних волокон від іонних вмістів кисню:

$$r = 689.70 \times \left(\frac{O^{++} + O^+}{H^+} - 7.02 \times 10^{-4} \right). \quad (1)$$

Досліджено радіальний розподіл хімічного складу у волокнах Крабовидної туманності. Зокрема, за результатами діагностичного методу зростання вмістів із відстанню від центру туманності підтверджено для He/H, O/H, Ne/H та не підтверджено для S/H and N/H (рис.1-3):

$He/H = -0.225(\pm 0.011) + 0.461(\pm 0.015) * R,$
$\log(O/H) = -4.39(\pm 0.43) + 0.80(\pm 0.48) * R,$
$\log(Ne/H) = -5.30(\pm 0.51) + 0.99(\pm 0.28) * R,$
$\log(N/H) = -4.51(\pm 0.63) + 0.09(\pm 0.73) * R,$
$\log(S/H) = -4.56(\pm 0.77) - 0.49(\pm 0.90) * R.$

Табл. 1: Спектри волокон Крабовидної туманності з роботи Р.Фесена та Р.Кіршнера [7].

Lines		Р.Фесен та Р.Кіршнер, 1982								
		Pos1	Pos2	Pos4	Pos5	Pos6	Pos7	Pos8	Pos9	Pos10
3727	[OII]	12.0	5.64	7.36	9.22	8.08	7.54	14.9	22.1	7.40
3869	[NeIII]	1.87	0.76	0.85	1.04	1.32	1.24	1.41	2.10	0.86
4068+76	[SII]	0.31	-	-	0.51	0.54	-	0.34	0.33	0.80
4102	Hδ	-	-	0.28	0.25	-	-	0.28	0.35	0.24
4340	Hγ	0.48	0.47	0.32	0.49	0.56	-	0.49	0.64	0.50
4363	[OIII]	0.26	-	-	$\leq$0.26	-	-	0.30	0.12	0.16
4471	HeI	0.24	-	-	-	-	-	0.17	0.36	0.18
4658	FeIII	-	-	-	0.18	-	-	0.19	0.09	0.18
4686	HeII	0.88	0.81	0.14	0.30	0.22	-	0.29	0.51	0.40
4861	Hβ	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4959	[OIII]	4.63	2.06	1.09	1.84	1.20	1.91	3.12	4.20	2.21
5007	[OIII]	15.1	5.97	3.64	6.40	4.05	6.28	9.82	12.8	6.75
5200	[NI]	$\leq$0.13	-	0.08	$<$0.11	-	$<$0.22	$<$0.09	-	-
5755	[NII]	$\leq$0.11	-	$\leq$0.07	0.10	0.22	$<$0.15	$<$0.07	-	-
5876	HeI	0.77	0.56	0.20	0.17	0.28	0.19	0.44	-	0.53
6300	[OI]	0.45	0.27	0.95	0.75	1.14	0.81	1.57	-	1.19
6312	[SIII]	-	-	$\leq$0.08	-	-	-	$<$0.13	-	-
6363	[OI]	0.12	-	0.43	0.28	0.35	0.28	0.51	-	0.41
6548	[NII]	1.24	0.28	0.99	2.33	2.12	3.52	0.94	-	-
6563	Hα	3.22	3.24	2.54	2.49	3.14	3.08	3.47	-	3.75
6584	[NII]	3.79	0.82	3.02	6.95	7.47	9.40	2.86	-	2.80
6678	HeI	0.12	-	0.08	-	-	-	-	-	0.22
6717	[SII]	1.42	1.81	2.11	2.18	2.44	2.06	2.53	-	6.13
6731	[SII]	1.72	1.69	2.67	2.10	3.14	2.29	3.05	-	6.38
7136	[ArIII]	0.30	0.61	-	0.23	0.28	-	0.17	-	0.61
7325	[OII]	-	-	0.17	-	-	-	0.45	-	0.42

Табл. 2: Хімічний склад волокон Крабовидної туманності: 1 - [5], 2 - [7], 3 - [6].

Дані	$\frac{He}{H}$	$\Delta\frac{He}{H}$	$\frac{O}{H}$	$\Delta\frac{O}{H}$	$\frac{N}{H}$	$\Delta\frac{N}{H}$	$\frac{Ne}{H}$	$\Delta\frac{Ne}{H}$	$\frac{S}{H}$	$\Delta\frac{S}{H}$
1-B1	0.354	0.018	$1.90e-4$	$2.14e-5$	$2.57e-5$	$3.33e-6$	$7.44e-5$	$4.07e-6$	$2.13e-6$	$3.17e-7$
1-B3	0.691	0.034	$3.00e-4$	$3.27e-5$	$1.07e-5$	$1.46e-6$	$9.66e-5$	$5.20e-6$	$5.43e-6$	$7.58e-7$
1-B6	0.181	0.009	$1.00e-4$	$1.16e-5$	$1.39e-5$	$1.87e-6$	$3.16e-5$	$1.81e-6$	$6.13e-6$	$8.49e-7$
1-B8	0.181	0.009	$6.38e-5$	$7.44e-6$	$1.44e-5$	$1.94e-6$	$2.09e-5$	$1.23e-6$	$5.72e-6$	$7.95e-7$
1-D1	0.128	0.006	$6.92e-5$	$8.03e-6$	$1.20e-5$	$1.63e-6$	$3.43e-5$	$1.95e-6$	$2.63e-6$	$3.85e-7$
1-D2	0.295	0.015	$1.40e-4$	$1.64e-5$	$3.86e-5$	$4.88e-6$	$4.57e-5$	$2.56e-6$	$2.44e-6$	$3.59e-7$
1-E2	0.213	0.011	$1.30e-4$	$1.54e-5$	$5.28e-5$	$6.57e-6$	$4.12e-5$	$2.33e-6$	$2.95e-6$	$4.29e-7$
1-C1	0.109	0.005	$6.57e-5$	$7.65e-6$	$3.04e-5$	$3.90e-6$	$1.86e-5$	$1.10e-6$	$2.56e-6$	$3.75e-7$
1-D3	0.213	0.011	$1.90e-4$	$2.16e-5$	$5.98e-5$	$7.38e-6$	$6.84e-5$	$3.75e-6$	$1.98e-6$	$2.96e-7$
2-pos1	0.229	0.011	$1.30e-4$	$1.52e-5$	$2.42e-5$	$3.14e-6$	$3.27e-5$	$1.87e-6$	$3.00e-6$	$4.36e-7$
2-pos10	0.173	0.009	$2.00e-4$	$2.26e-5$	$1.68e-5$	$2.23e-6$	$9.55e-6$	$5.88e-7$	$1.16e-5$	$1.54e-6$
2-pos4	0.091	0.004	$9.12e-5$	$1.04e-5$	$2.77e-5$	$3.57e-6$	$3.59e-5$	$2.04e-6$	$7.72e-6$	$1.05e-6$
2-pos5	0.057	0.003	$1.40e-4$	$1.56e-5$	$3.43e-5$	$4.36e-6$	$5.05e-6$	$3.50e-7$	$4.27e-6$	$6.05e-7$
2-pos6	0.100	0.005	$7.54e-5$	$8.71e-6$	$3.80e-5$	$4.81e-6$	$3.55e-5$	$2.02e-6$	$3.65e-6$	$5.23e-7$
2-pos7	–	–	$1.10e-4$	$1.30e-5$	$5.84e-5$	$7.22e-6$	$6.68e-5$	$3.67e-6$	$5.66e-6$	$7.87e-7$
2-pos8	0.144	0.007	$1.05e-3$	$1.06e-4$	$2.60e-4$	$3.01e-5$	$1.15e-5$	$6.99e-7$	$7.72e-5$	$9.20e-6$
3-pos1	0.245	0.012	$5.40e-5$	$6.35e-6$	$2.00e-5$	$2.62e-6$	$1.48e-5$	$8.87e-7$	$7.20e-6$	$9.87e-7$
3-pos2	0.301	0.015	$1.42e-3$	$1.40e-4$	$9.66e-5$	$1.16e-5$	$8.32e-5$	$4.51e-6$	$5.01e-3$	$4.80e-4$
2-pos2	0.213	0.011	$5.56e-5$	$6.53e-6$	$4.60e-6$	$6.63e-6$	$1.46e-5$	$8.77e-7$	$4.05e-6$	$5.76e-7$
2-pos9	0.371	0.018	$3.10e-4$	$3.33e-5$	–	–	$8.32e-5$	$4.51e-6$	$2.36e-6$	$3.48e-7$

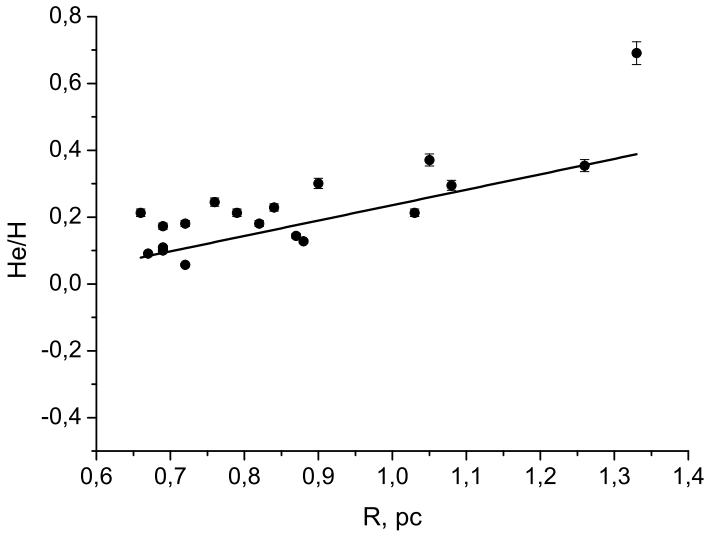

Рис. 1: Радіальний розподіл He/H у волокнах Крабовидної туманності.

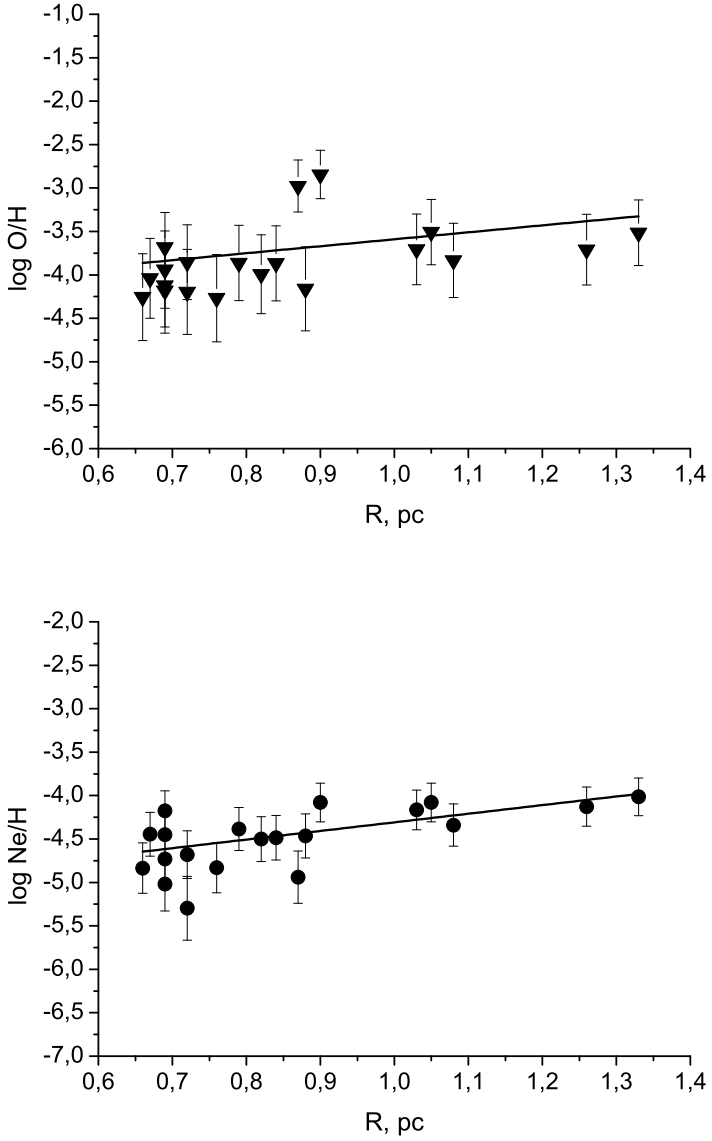

Рис. 2: Радіальні розподіли O/H та Ne/H у волокнах Крабовидної туманності.

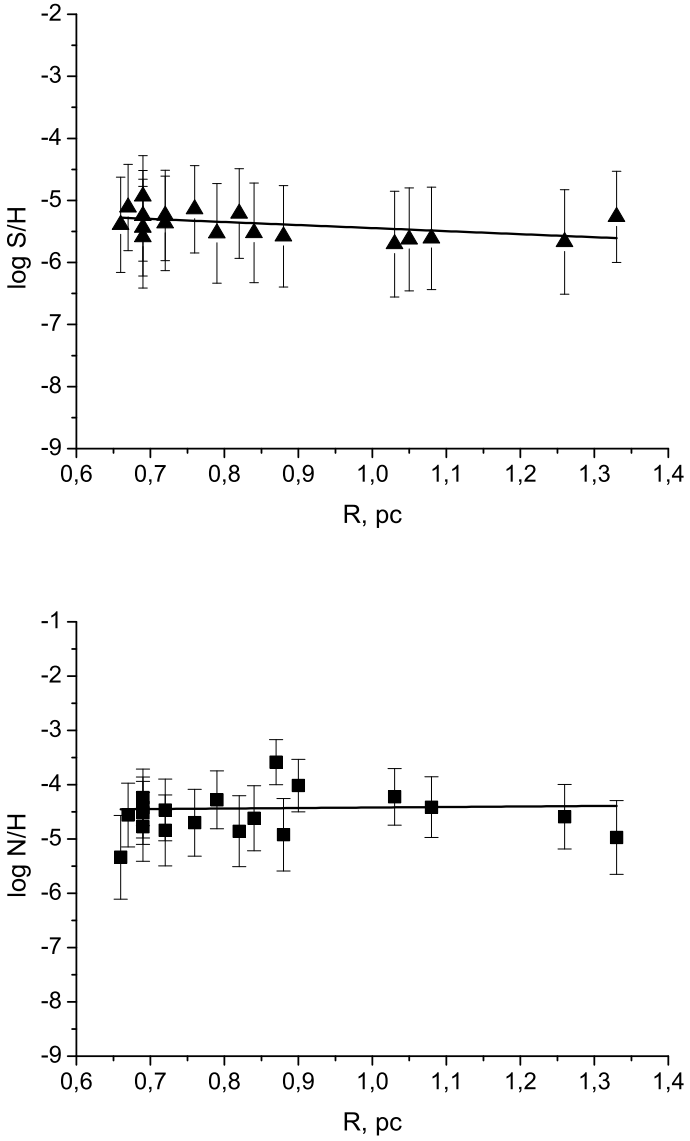

Рис. 3: Радіальні розподіли S/H та N/H у волокнах Крабовидної туманності.

Також дослідження хімічного складу волокон Крабовидної туманності нами проведено з використанням нового 3-стадійного методу оптимізаційного фотоіонізаційного моделювання світіння (ОФМС) небулярного газу [11]. У цьому методі використовуються окрім відносних інтенсивностей емісійних ліній (відносно інтенсивності H_β) і потоку в лінії H_β ще й співвідношення між інтенсивностями емісійних ліній. Нами використано наступні діагностичні співвідношення між інтенсивностями емісійних ліній (чутливі до електронних температур і/або до електронних концентрацій) та відношеннями між інтенсивностями ліній йонів у сусідніх стадіях іонізації (чутливі до форми спектру йонізуючого випромінювання) з метою відтворення спостережуваного емісійного лінійчатого спектру волокон [8]:

λ6731[SII] / λ6716[SII], λ7323[OII] / λ7332[OII],
λ3727[OII] / λ6300[OI], λ4686(HeII) / λ4471(HeI),
λ4686(HeII)/ λ5876(HeI), λ4471(HeI) / λ5412(HeII),
λ5876(HeI) / λ5412(HeII), λ4959[OIII] / λ4363[OIII],
λ5007[OIII] / λ4363[OIII], λ5007[OIII] / λ3727[OII],
λ6731[SII] / λ6312[SIII].

На першій стадіїї розрахунку ОФМС визначається іонізаційна структура туманності шляхом відтворення спостережуваних діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній та відношень між інтенсивностями ліній йонів у сусідніх стадіях іонізації. На другій стадіїї розраховується хімічний вміст при знайденій попередньо іонізаційній структурі. На третій стадії розрахунку ОФМС всі вільні параметри залучаються до оптимізаційного процесу.

При оптимізаційному моделюванні волокон туманності ми використали наступні вільні параметри: густина водню, фактор заповнення туманності газом, енергетичний розподіл іонізуючого спектру та хімічний склад (на першій стадії моделювання - He/H та O/H, всі доступні хімічні елементи – на другій та третій стадіях). Ініціалізація вмістів хімічних елементів проводилась значеннями, отриманими попередньо під час діагностики небулярного газу з використанням нових іонізаційно-корекційних множників [10]. Для порівняння результатів моделювання зі спостережуваними даними були використані наступні параметри: модельні емісійні спектральні лінії, потік в лінії H_β, зовнішній радіус туманності та відповідні діагностичні співвідношення.

Іонізуючий Lyc-спектр також змінювався при оптимізаційному моделюванні. Це дозволило відтворити оптимальний іонізуючий спектр, який збуджує світіння саме в області спостереження, і тоді детальний розгляд переносу іонізуючого випромінювання від пульсару до області моделювання не є необхідним.

Для мінімізації χ^2-функції нами використано оптимізаційний алгоритм *Phymir* Пітера ван Гофа (*http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/1997/p.a.m.van.hoof*). Для розрахунку ОФМС небулярного газу у волокнах туманності використано програму Гарі Ферланда *Cloudy* 08.00 (*http://www.nublado.org*), яка була попередньо модифікована нами з метою включення параметрів, що задають форму спектру іонізуючого випромінювання, до вільних параметрів ОФМС, а також з метою порівнянням модельних та спостережуваних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній. Попередньо було проаналізовано та враховано чутливість співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній до змін хімічного вмісту.

Також було проаналізовано радіальний розподіл хімічних вмістів у волокнах ту-

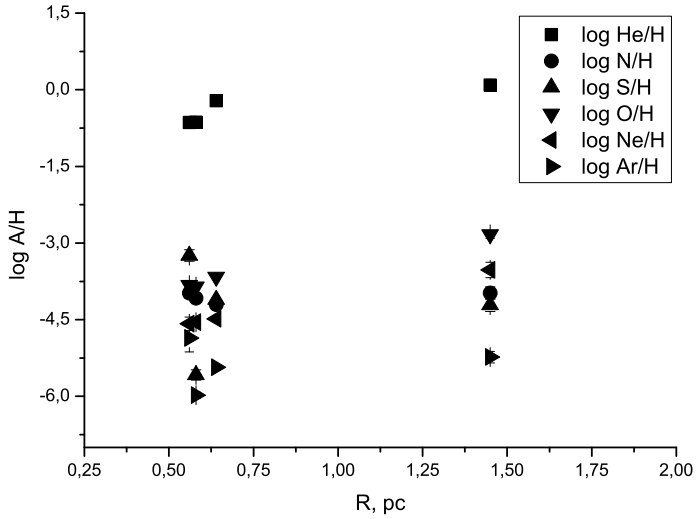

Рис. 4: Хімічний склад волокон Крабовидної туманності, отриманий на основі розрахунків ОФМС небулярного газу.

манності на основі розрахунків ОФМС 4 волокон. На даний момент *результати ОФМС не підтвердили зростання вмісту хімічних елементів з відстанню від центру туманності*. Для повнішого аналізу нами заплановано розрахувати ОФМС всіх областей Крабовидної туманності, що спостерігалися Р.Фесеном та Р.Кіршнером [7].

Список використаної літератури

1. *L. Woltier*, Bull. Astron. Inst. Neth. **14**, 483 (1958).
2. *V.V. Holovatyy, V.I. Pronik*, Astron. Zh. **50, 6**, 1147 (1973).
3. *M. Contini, B. Kozlovsky, G. Shaviv*, Astron. Astrophys. **59**, 387 (1977).
4. *M. Contini, B. Kozlovsky, G. Shaviv*, Astron. Astrophys. **68**, 443 (1978).
5. *K. Davidson*, Astrophys. J. **228**, 179 (1979).
6. *J. Miller*, Astrophys. J. **220**, 490 (1978).
7. *R.A. Fesen, R.P. Kirshner*, Astrophys. J. **258**, 1 (1982).
8. *B.Ya. Melekh*, J. Ph. S **13, 3**, 3901 (2009).
9. *V.V. Holovatyy et al.*, Izvest. Krymsk. astrophys. observ. **96**, 1 (1999).
10. *V.V. Holovatyy, N.V. Havrylova*, Astron. Zh. **82, 5**, 437 (2005).
11. *B.Ya. Melekh et al.*, Odessa Astronomical Publications **25/2**, 178 (2012).

Стаття надійшла до редакції 15.10.2014
прийнята до друку 4.11.2014

CHEMICAL COMPOSITIONS OF CRAB NEBULA FILAMENTS

V. Holovatyy, B. Melekh, N. Havrylova

Ivan Franko National University of Lviv
Kyrylo and Mefodiy St., 8, 79005 Lviv, Ukraine

The chemical compositions in filaments of Crab Nebula are obtained using two methods: new Ionization Correction Factors taking into account density inhomogeneities of the nebular gas, and new 3-stages method based on the optimized photoionization modelling of the nebular gas.

Key words: Crab Nebula; nebular diagnostics; photoionization modelling.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОЛОКОН КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

В. Головатый, Б. Мелех, Н. Гаврилова

Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия 8, 79005 Львов, Украина

Химический состав волокон Крабовидной туманности получен с помощью двух методов: с использованием новых ионизационно-коррекционных множителей, которые учитывают наличие неоднородностей небулярного газа, и новый 3-стадийный метод оптимизационного фотоионизационного моделирования небулярного газа.

Ключевые слова: Крабовидная туманность; небулярная диагностика; фотоионизационное моделирование.