

УДК 524.7

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

ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗПОДІЛУ ЙОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ПРОХОДЖЕННЯ ТОНКОГО ШАРУ НЕБУЛЯРНОЇ ПЛАЗМИ З ВИСОКОЮ ГУСТИНОЮ

Р. Козел, 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*

Результати оптимізованого фотойонізаційного моделювання (ОФМС) області НІІ в блакитній компактній карликовій галактиці (БККГ) SBS 0335-052 засвідчують нестачу Лус-квантів у діапазоні довжин хвиль λ 912–504 Å, порівняно з кількістю квантів у сусідніх спектральних ділянках. Лус-спектр йонізуючих джерел цієї зони НІІ визначався в ОФМС незалежно від параметрів моделей зореутворення і випромінювання каверни зоряного вітру. У роботі побудовано серію фотойонізаційних моделей світіння таких шарів небулярного газу з високою концентрацією і отримано різке зниження кількості йонізуючих квантів у діапазоні λ 912–504 Å.

Ключові слова: блакитні компактні карликові галактики, оптимізовані фотойонізаційні моделі, спалах зореутворення, каверна зоряного вітру.

Блакитні компактні карликові галактики (БККГ) є цікавими об'єктами для задач визначення вмісту первинного (догалактичного) гелію та моделювання зоряної хімічної еволюції речовини, оскільки вони характеризуються низьким вмістом важких елементів та активними процесами зореутворення. Згадані вище задачі пов'язані з проблемою визначення хімічного складу цих об'єктів. Якщо зона НІІ у БККГ спостерігалась з використанням методів панорамної спектроскопії, то найкращим підходом до визначення не тільки хімічного вмісту, але і фізичних характеристик цих об'єктів є метод оптимізованого фотойонізаційного моделювання (ОФМС) [1–3].

Спалахи зореутворення у БККГ відбуваються у компактних згустках радіусом близько 100 пк, навколо яких, внаслідок йонізації навколишнього газу, виникають гігантські регіони йонізованого водню – зони НІІ. У статті розглянено деякі особливі аспекти, пов'язані з трактуванням результатів ОФМС зон НІІ у БККГ, без детального розгляду самої процедури ОФМС, який можна знайти у наших попередніх працях [1–3].

Оптимізоване фотойонізаційне моделювання зони НІІ у БККГ SBS 0335-052. Для порівняння модельних значень зі спостережуваними використано 9 спектрів зони НІІ у БККГ SBS 0335-052, які отримали група Ізотова на 10-метровому телескопі Кеєк II [3]. Зона НІІ розбита на 9 циліндрів (див. рис. 1), для кожного з яких ми знайшли

циліндричну оптимальну фотойонізаційну модель світіння, спектр якої найкраще відтворює відповідний спостережуваний спектр. Висоти всіх циліндрів, які є в праці [2], визначаються шириною апертури (0,6''). Було використано припущення, що зона НІІ має осеву симетрію щодо осі, паралельної до щілини.

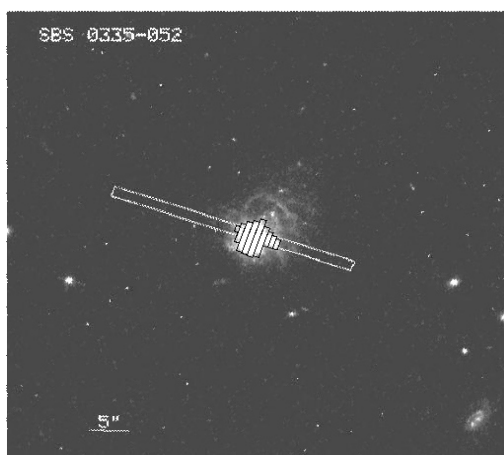


Рис. 1. Зображення зони НІІ у БККГ SBS 0335-052, отримане на космічному телескопі ім. Габбла із накладеною схемою розбиття її на циліндричні частини (див. текст)

Для розрахунків фотойонізаційних моделей ми використали код Г.Ферланда Cloudy 05.07 [4], а як оптимізатор – алгоритм Петера Ван Гоффа Phymir [5]. Код Cloudy ми модифікували для реалізації описаного методу. Приймаємо радіальний розподіл густини газу в зоні НІІ, де концентрації водню на відстані R від центра туманності і на внутрішній її межі R_{in} пов'язані так:

$$n_H(R) = n_H(R_{in}) \left(\frac{R}{R_{in}} \right)^{-\gamma} \quad (1)$$

Щоб показати Лус-спектра також використовуємо степеневий закон, де

$$F_\nu = F_{\nu_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

E_ν, E_{ν_0} – потоки йонізуючого випромінювання, а ν і ν_0 – частоти, відповідно, в кінці і на початку кожного з вищезазначених інтервалів.

Відповідно до потенціалів йонізації різноманітних атомів і йонів ми використали чотири енергетичні інтервали:

- 1) 1–1,8 Ry
- 2) 1,8–2,57Ry
- 3) 2,57–4Ry
- 4) 4,4–30,4Ry, причому на 1,8 і 4Ry ми задаємо стрибок.

Розглянемо детально ці межі.

1. Межа 1 Ry ($\lambda=912\text{\AA}$) відповідає потенціалу йонізації нейтрального водню H° і близька до потенціалів йонізації нейтрального кисню O° (1,001 Ry) та нейтрального азоту N° (1,068 Ry). Відносно близькі до енергетичної межі цього інтервалу значення потенціалів йонізації йона заліза Fe° (1,190 Ry).
2. Межа 1,8 Ry ($\lambda=504\text{\AA}$) відповідає потенціалу йонізації нейтрального гелію He° Лус-спектра і близька до потенціалів йонізації однойонізованої сірки (1,715 Ry) та однойонізованого аргону (2,031 Ry).
3. Межа 4 Ry ($\lambda=228\text{\AA}$) відповідає потенціалу йонізації однойонізованого гелію He^+ . Відносно близьким до цієї межі є потенціал йонізації йона кисню O^{++} (4,038 Ry).
4. Межа 30,4 Ry ($\lambda=30\text{\AA}$) відповідає високоенергетичній межі, до якої ми задали зміну форми Лус-спектра.

Вільними параметрами ОФМС є:

- внутрішній радіус зони НІ (R_{in});
- сім Лус-потоків, які визначатимуть форму йонізуючого Лус-спектра;
- загальна кількість йонізуючих квантів Q_{ion} , яка виконує роль нормуючого множника для Лус-спектра, визначеної потоками F_{ν} (1 Ry) - F_{ν} (30,4 Ry);
- концентрація водню на внутрішній межі зони ($n_H(R_{in})$);
- показник степеня γ прийнятого радіального розподілу густини в зоні НІ (див. вираз (1));
- фактор наповнення об'єму зони НІ (ϵ);
- відносний вміст елементів He/H , O/H , Ne/H , S/H , Ar/H , Fe/H .

В ОФМС також використані діагностичні співвідношення, які майже не залежать від хімічного вмісту. Отож був розроблений двостадійний метод ОФМС областей НІ у БККГ. На першій стадії визначається йонізаційна структура зони НІ шляхом відтворення спостережуваних діагностичних співвідношень, а на другій уточнюється хімічний вміст елементів за спостережуваними потоками в лініях їх йонів. Детальніший опис як процесу розрахунку двостадійних ОФМС, так і результатів такого моделювання ми подамо у праці, яку готуємо сьогодні для публікації в журналі *Astronomy Reports*. У табл. 1 подано результати відтворення за допомогою ОФМС спостережуваних характеристик лише для декількох циліндрів. Як бачимо, χ^2 -функція набуває малих значень. Отже, можна зробити висновок, що ОФМС добре відтворює спостережуваний спектр.

Спалах зореутворення та каверна зоряного вітру: внесок у йонізацію зони НІ у БККГ. З одного боку центральним джерелом йонізації зони НІ, яка оточує бульбашку, є спалах зореутворення. З іншого, частинки супервітру навколо кластера зір, вирываючись у міжзоряний простір утворюють ударну хвилю, яка згрібає навколишній газ. Виникає тонкий висококонцентрований шар. Зворотня ударна хвиля термалізує частинки міжзоряного середовища. Як наслідок, каверна зоряного вітру випромінює як абсолютно чорне тіло, температура якого інколи досягає мільйона градусів. Структуру такої бульбашки подано на рис.2.

Таблиця 1

Результати відтворення ОФМС спостережуваних характеристик для декількох циліндрів зони НІІ у БККГ

Parameter	Aperture position								
	2.4NE			1.8NE			1.2NE		
	Observation	Stage I	Stage II	Observation	Stage I	Stage II	Observation	Stage I	Stage II
$\lambda 4959[\text{O III}]/\lambda 4363[\text{O III}]$	9.67±0.73	10.10	10.25	9.27±0.32	9.83	9.91	9.26±0.23	9.33	9.48
$\lambda 5007[\text{O III}]/\lambda 4363[\text{O III}]$	28.30±2.10	30.41	30.87	27.44±0.93	29.58	29.83	27.53±0.68	28.08	28.52
$\lambda 6716[\text{S II}]/\lambda 6731[\text{S II}]$	1.52±0.36	1.37	1.37	1.24±0.11	1.38	1.38	1.26±0.08	1.36	1.36
$\lambda 4026\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeI}$	-	-	-	0.87±0.34	0.75	0.75	0.63±0.07	0.75	0.76
$\lambda 4471\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeI}$	1.93±0.49	2.01	2.00	1.33±0.13	1.57	1.58	1.50±0.18	1.59	1.59
$\lambda 5876\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeI}$	4.45±0.95	5.71	5.67	3.60±0.28	4.39	4.40	3.79±0.23	4.52	4.52
$\lambda 6678\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeI}$	1.22±0.30	1.53	1.52	1.01±0.09	1.20	1.20	1.03±0.06	1.20	1.21
$\lambda 7065\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeI}$	1.25±0.30	1.64	1.63	1.14±0.19	1.15	1.16	1.21±0.07	1.34	1.33
$\lambda 5007[\text{O III}]/\lambda 3727[\text{O II}]$	6.30±0.27	6.33	6.32	7.65±0.20	7.82	7.80	9.72±0.23	9.81	9.74
4026 He I	-	-	-	0.0221±0.0028	0.0161	0.0162	0.0157±0.0015	0.0164	0.0165
4471 He I	0.0413±0.0060	0.0353	0.0354	0.0338±0.0021	0.0338	0.0339	0.0374±0.0042	0.0346	0.0347
5876 He I	0.0953±0.0051	0.1002	0.1004	0.0914±0.0024	0.0944	0.0949	0.0944±0.0036	0.0985	0.0987
6678 He I	0.0260±0.0034	0.0269	0.0270	0.0257±0.0014	0.0257	0.0259	0.0256±0.0009	0.0262	0.0263
7065 He I	0.0267±0.0032	0.0289	0.0289	0.0290±0.0014	0.0248	0.0249	0.0300±0.0009	0.0291	0.0291
4686 He II	0.0214±0.0044	0.0176	0.0177	0.0254±0.0019	0.0215	0.0216	0.0249±0.0012	0.0218	0.0218
3727 [O II]	0.4346±0.0160	-	0.4366	0.3919±0.0083	-	0.3744	0.3383±0.0061	-	0.3406
3869 [Ne III]	0.2586±0.0124	-	0.2501	0.3114±0.0069	-	0.2642	0.3187±0.0056	-	0.3189
4363 [O III]	0.0967±0.0069	-	0.0894	0.1093±0.0033	-	0.0979	0.1195±0.0024	-	0.1163
4959 [O III]	0.9350±0.0221	-	0.9169	1.0136±0.0163	-	0.9706	1.1062±0.0164	-	1.1016
5007 [O III]	2.7361±0.0569	-	2.7600	2.9987±0.0461	-	2.9214	3.2894±0.0483	-	3.3157
6300 [O I]	0.0094±0.0093	-	0.0042	0.0094±0.0093	-	0.0030	0.0094±0.0024	-	0.0036
6312 [S III]	0.0056±0.0055	-	0.0165	0.0056±0.0055	-	0.0061	0.0056±0.0006	-	0.0124
6716 [S II]	0.0422±0.0083	-	0.0321	0.0315±0.0023	-	0.0075	0.0251±0.0013	-	0.0158
6731 [S II]	0.0277±0.0035	-	0.0234	0.0253±0.0014	-	0.0054	0.0199±0.0008	-	0.0116
7135 [Ar III]	0.0278±0.0031	-	0.0278	0.0228±0.0013	-	0.0241	0.0198±0.0007	-	0.0198
4658 [Fe III]	0.0046±0.0045	-	0.0057	0.0046±0.0015	-	0.0040	0.0052±0.0010	-	0.0046
$\log F(H\beta)^a$	-14.797±0.061	-14.799	-14.802	-14.441±0.030	-14.438	-14.439	-13.922±0.021	-13.921	-13.921
R_{out} , pc	78±16	78	77.1	211.6±10.6	212.6	211	282.6±14.1	282.6	280.9
χ^2	...	0.36	0.99	...	1.93	24.3	...	1.39	18.4
PhM Number	...	1016	168	...	1016	506	...	1016	506

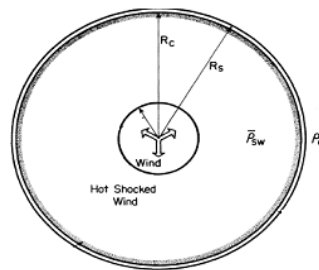


Рис. 2. Схематичне зображення бульбашки, утвореної зоряним вітром від спалаху зоре утворення

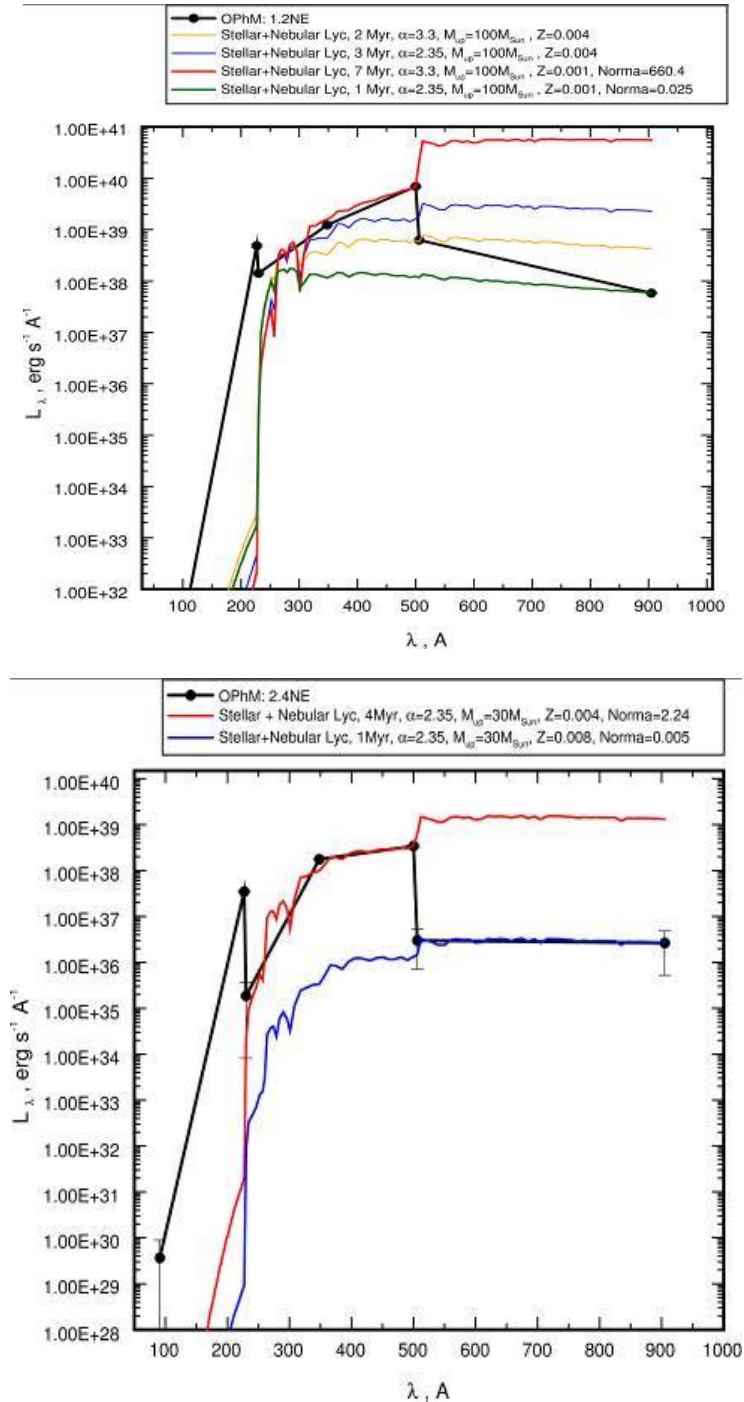


Рис. 3. Спроби відтворення Лус-спектра, отриманого з ОФМС (OPhM) моделями спалаху зореутворення

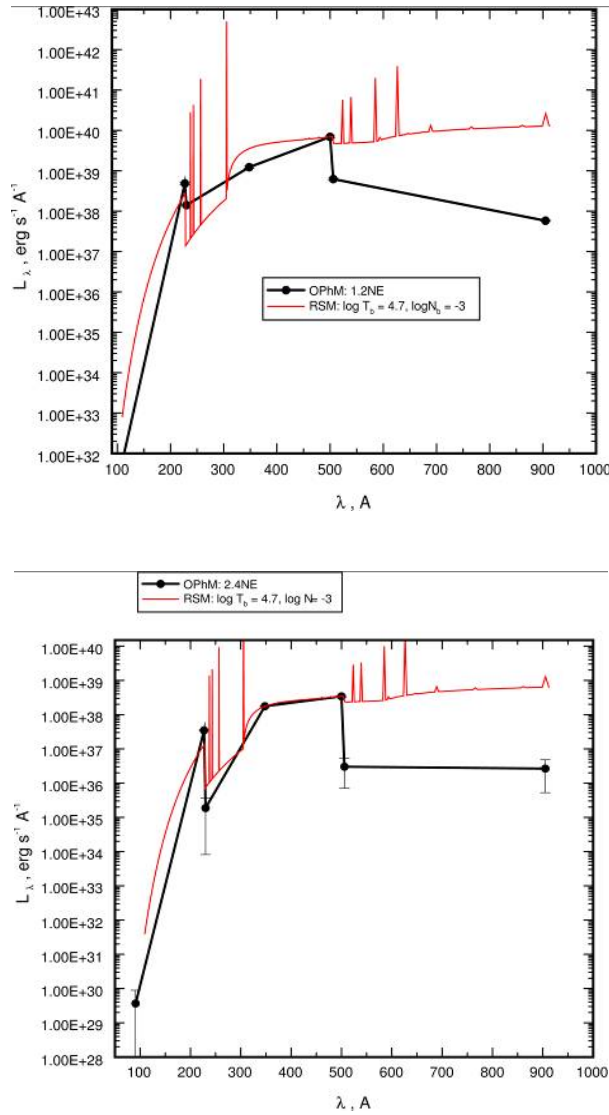


Рис. 4. Відтворення Лус-спектра, отриманого з ОФМС (OPhM) моделями випромінювання каверни зоряного вітру

На рис. 2 R_c та R_s – відповідно, внутрішній та зовнішній радіус тонкого сферичного шару високої густини, згребеного ударною хвилею зоряного супервітру, $\bar{\rho}_{sw}$ – середня густина каверни зоряного вітру, ρ – густина газу зони НІІ у безпосередній близькості до бульбашки. Отже, як видно з рис. 2, зона НІІ, що моделюється, оточує цю бульбашку.

Оскільки результати розрахунку ОФМС не залежать від природи йонізуючого джерела, то ми можемо оцінити внесок випромінювання від спалаху зореутворення (див. рис. 3) та каверни зоряного вітру (див. рис. 4).

Як видно з рисунків, модель спалаху зореутворення (ми використовували результати з праці [6]) не може пояснити нестачу квантів за 228 \AA , а каверна зоряного вітру (ми використали модель Раймонда і Сміта [7]) гарно відтворює вхідний графік, отриманий ОФМС. Отже, випромінювання каверни зоряного вітру є домінуючим в йонізації зони НІІ. Як у випадку відтворення Лус-спектрів з ОФМС моделлю спалаху зореутворення та моделлю світіння каверни зоряного вітру видно нестачу Лус-квантів у діапазоні довжин хвиль λ 912–504 \AA . Випромінювання від спалаху зореутворення та каверни зоряного вітру перед тим, як йонізувати зону НІІ, має перетнути тонкий шар згребеного ударною хвилею газу з високою густиною (рис. 2).

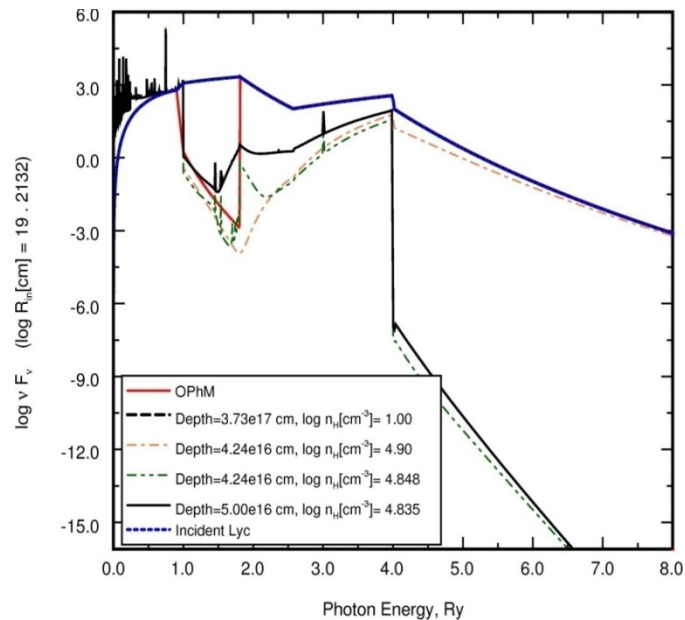


Рис. 5. Спроби відтворення нестачі квантів у діапазоні 1–1,8 Ry моделлю проходження йонізуючого випромінювання крізь тонкий шар газу високої густини, утворений вигортанням міжзоряного газу ударною хвилею зоряного вітру

Як відомо, енергетичні залежності ефективного перерізу фотойонізації для H° , He° , He^+ мають різкий максимум біля потенціалу йонізації, який швидко спадає зі збільшенням енергії фотонів. Оскільки довжина вільного пробігу фотона $l = l/\sigma n$, то кванти з меншою енергією, близькою до потенціалу йонізації, матимуть менше l , а тому поглинатимуться набагато ефективніше, ніж кванти з більшою енергією. Тому кванти з ближчими до потенціалу йонізації енергіями у випадку тонкого концентрованого шару поглинатимуться ефективніше, а кванти з більшою енергією виходитимуть за межі шару.

Ми побудували низку фотойонізаційних моделей з метою дослідження трансформації розподілу енергії в Лус-спектрі під час проходження йонізуючих квантів крізь тонкий шар газу високої концентрації. Тонка суцільна крива відповідає одному з отриманих оптимізаційним фотойонізаційним моделюванням із вищезгаданою нестачою квантів загалом в інтервалі $1-1,8 R_{\text{y}}$ (λ 912–504 Å). Товста крива відповідає Лус-спектру, більшості еквівалентному попередньому, за винятком нестачі квантів у вищезазначеному інтервалі. Саме цей Лус-спектр ми використовували як вхідний у тонкий шар газу високої концентрації. Інші Лус-спектри відповідають вихідним з вищезгаданого шару і отримані вони для різних значень товщини шару (Depth) та концентрації водню в ньому (n_{H}). Як видно з порівнянь Лус-спектрів, тонкий шар високої концентрації справді може спричинити різку нестачу квантів у діапазоні $1-1,8 R_{\text{y}}$ у вихідному спектрі.

Структура реальної зони НІІ в БККГ є набагато складнішою. Згустки зореутворення у зоні НІІ розкидані за її об'ємом. Тому йонізуюче випромінювання може перетинати не один, а декілька таких шарів з високою густиною, та й радіальні розподіли густини, температур, і, відповідно, йонних вмістів є неоднорідними. Це спричиняє відхилення вихідних спектрів від отриманого з ОФМС і спонукає нас до детальнішого розгляду внутрішньої структури зон НІІ у БККГ, а зокрема до детальнішого моделювання каверн зоряного вітру. Саме цим проблемам будуть присвячені наші майбутні праці.

-
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. *Izotov Y.I., Frederic H. Chaffee, Craig B. Foltz et al.* Helium abundance in the most metal-deficient blue compact galaxies // The astrophys. J. 1999. Vol. 527. P. 757–777.
 4. *Ferland G.J.* Hazy, a Brief introduction to Cloudy: University of Kentucky: Physics Department Internal Report, 2005.
 5. *P. A. M van Hoff* Ph. D. thesis. Rijksuniversiteit Groningen, 1997.
 6. *Leitherer C., Schaerer D., Goaldader J.D., Delgado R.G. et al.* Starburst 99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation // Astrophys. J. Supplem. ser. 1999. Vol. 123. P. 3–40.
 7. *Raymond J.C. and Smith B.M.* Soft X-ray spectrum of a hot plasma // Astrophys. J. Supplem. ser. 1977. Vol. 35. P. 419–439.

**TRANSFORMATION OF ENERGY DISTRIBUTION OF
IONIZING RADIATION DURING PENETRATING VERY THIN AND DENSE
ENVELOPE OF NEBULAR PLASMA**

R. Kozel, B. Melekh

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

Results obtained from optimized photoionization modelling of HII region in blue compact galaxy (BCDG) SBS 0335-052 showed a lack of Lyman continuum (Lyc)-quanta in wavelength range λ 912–504 Å from comparison of quanta number in neighbouring spectrum parts. Lyc-spectra from ionizing sources of this HII region were found independently of star formation parameters : models of a starburst and stellar wind cavity radiation. In this paper series of optimized photoionization models of BCDG SBS 0335-052 luminiscence for thin and dense envelope were obtained.

Key words: blue compact dwarf galaxies, optimized photoionization modelling, starburst, stellar wind cavity.

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ИОНИЗУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ
НЕБУЛЯРНОЙ ПЛАЗМЫ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ**

Г. Козел, Б. Мелех

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

Результаты оптимизированного фотоионизационного моделирования (ОФМС) области НII в голубой компактной карликовой галактике SBS 0335-052 показывают недостатку Лус-квантов в диапазоне длин волн λ 912-504 Å в сравнении с количеством квантов в соседних спектральных участках. Лус-спектр ионизирующих источников данной зоны НII определялся в ОФМС независимо от параметров моделей звездообразования и излучения каверны звездного ветра. В работе построена серия фотоионизационных моделей свечения таких слоев небулярного газа с высокой концентрацией и получено резкое снижение количества ионизирующих квантов в диапазоне λ 912-504 Å.

Ключевые слова: голубые компактные карликовые галактики, оптимизированные фотоионизационные модели, вспышка звездообразования, каверна звездного ветра.

Стаття надійшла до редколегії 20.06.2008

Прийнята до друку 20.07.2009