

УДК: 524.37

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА ЯДЕР
ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

А.А. НИКИТИН, Т. Х. ФЕКЛИСТОВА, А. Ф. ХОЛТЫГИН

Поступила 18 апреля 1988

Принята к печати 24 мая 1988

Рассмотрены особенности спектров планетарных туманностей, связанные с взаимодействием их со звездным ветром ядер туманностей. Исследовано влияние рентгеновского излучения горячего звездного ветра и электронов высоких энергий на спектры туманностей. Обсуждаются атомные данные, требуемые для интерпретации спектров планетарных туманностей, взаимодействующих со звездным ветром.

Важную роль в динамике планетарных туманностей играет звездный ветер их ядер. Истечение вещества со скоростью 500—2000 км/с обнаружено у многих ядер туманностей, типичные значения скоростей потери массы составляют $10^{-9} - 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ [1]. Взаимодействие звездного ветра с туманностью приводит как к ее ускорению [2—4], так и к формированию отраженной ударной волны, нагревающей вещество ветра до $10^5 - 10^6$ К [5]. Присутствие в туманности такой высокотемпературной области оказывает значительное влияние на наблюдаемые спектры туманностей. Рассмотрим особенности спектров, связанные с существованием горячего звездного ветра.

К таким особенностям следует отнести излучение планетарных туманностей в области мягкого рентгена 0.1—1 кэВ, наличие в звездном ветре высокоэнергичных электронов $E = 0.1 - 0.3$ кэВ, присутствие в спектрах туманностей линий ионов с высокими потенциалами ионизации и наличие в спектрах туманностей линий переходов между уровнями двукратного возбуждения.

Вследствие относительной малости массы вещества звездного ветра (в среднем его масса составляет $10^{-6} - 10^{-4} M_{\odot}$) рентгеновское излучение планетарных туманностей относительно слабо. Ожидаемые рентгеновские светимости в области 0.2—0.3 кэВ в модели взаимодействующего с туманностью звездного ветра составляют $(1-5) \cdot 10^{33}$ эрг/с [5]. К настоящему времени рентгеновское излучение зарегистрировано только у одной плане-

тарной туманности NGC 1360 [6]. Рентгеновское излучение ветра, кроме вклада в спектр туманности, является дополнительным источником возбуждения спектральных линий, а также приводит к появлению в планетарных туманностях ионов высоких потенциалов ионизации.

Роль высокоэнергичных электронов в формировании спектра туманностей в принципе аналогична роли рентгеновского излучения. Длина свободного пробега таких электронов $\Lambda = (\sigma n Z)^{-1}$, где $\sigma \approx 10^{-16}$ — сечение захвата электронов (при ионизации или возбуждении ионов С, N, O и более тяжелых элементов), $Z \approx 0.001$ — доля тяжелых элементов в туманностях, $n \approx 10^4$ см⁻³ — средняя атомная концентрация. Подставляя численные значения, получим $\Lambda \approx 10^{15}$ см, что составляет 3—5% от среднего радиуса планетарной туманности [7]. Таким образом энергичные электроны практически полностью поглощаются в тонком слое, прилегающем к внутренней границе туманности и оказывают тем самым относительно малое влияние на спектр самой туманности (см. рис. 1).

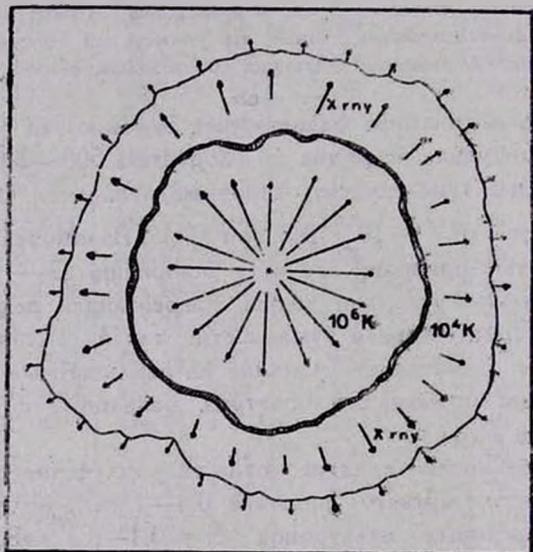
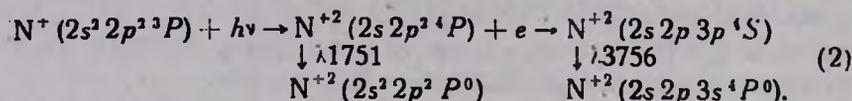


Рис. 1. Взаимодействие планетарных туманностей и звездного ветра их ядер. Длинные стрелки показывают звездный ветер $v \approx 1000$ км/с, \rightarrow — рентгеновское излучение области звездного ветра, слабо поглощающееся в туманности; короткие стрелки показывают расширение самой туманности. Заштрихована область проникновения электронов с $E > 100$ эВ в туманность.

Обратимся теперь к наиболее яркому проявлению взаимодействия звездного ветра с туманностью — наличию в спектрах туманностей линий ионов с высокими потенциалами ионизации. Согласно каталогу [8], в спектрах планетарных туманностей присутствуют линии ионов высокой сте-

1. Образование метастабильных состояний при возбуждении электронным ударом или фотоотрыве электронов внутренних оболочек.

2. Возбуждение электронами с $E \geq 100$ эВ из метастабильных состояний. Приведем пример такого процесса:



Линия N III λ 3756 является наиболее интенсивной линией переходов двукратного возбуждения.

Линии переходов между уровнями двукратного возбуждения можно также рассматривать как диэлектронные спутники рекомбинационных линий ионов C и N. В табл. 1 дан список таких диэлектронных спутников.

Таблица 1

ДИЭЛЕКТРОННЫЕ САТЕЛЛИТЫ ЛИНИЙ ИОНОВ C И N В СПЕКТРАХ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Сателлиты					
Ион	λ (А)*	Переход	Ион	λ (А)*	Переход
C IV	5807	$3s \text{}^2S - 3p \text{}^2P^0$	C III	4325	$2p 3s \text{}^1P^0 - 2p 3p \text{}^1P$
				4665	$2p 3s \text{}^3P^0 - 2p 3p \text{}^3P$
N IV	3483	$2s 3s \text{}^3S - 2s 3p \text{}^3P^0$	N III	3354	$2s 2p 3s \text{}^4P^0 - 2s 2p 3p \text{}^4P$
				3756	$\text{}^4P^0 - \text{}^4S$
				4196	$\text{}^3P^0 - \text{}^3D$
				4515	$\text{}^1P^0 - \text{}^1D$
N IV	7109	$2s 3p \text{}^3P^0 - 2s 3d \text{}^3D$	N III	3792	$2s 2p 3p \text{}^4D - 2s 2p 3d \text{}^4P^0$
		4325		$\text{}^4D - \text{}^4D^0$	

* Приведены средние по мультиплету длины волн переходов.

В связи с отмеченными особенностями спектров планетарных туманностей, связанными с истечением вещества ядер туманностей, возникает необходимость в расчете атомных параметров процессов взаимодействия рентгеновского излучения и электронов с энергиями $E > 100$ эВ с атомами и ионами планетарных туманностей. Необходимы, в частности, сечения фотоионизации с K и L -оболочек (см. [15]). Сечения и скорости возбуждения электронным ударом из метастабильных состояний. Требуется также уточнение расчетов вероятностей радиационных переходов для атомов и ионов, присутствующих в планетарных туманностях, особенно для переходов между двукратно возбужденными состояниями и двухэлектронных переходов, связывающих состояния с одним и двумя возбужденными электронами.

Наблюдаемые в спектрах планетарных туманностей линии естественно разделяются на следующие группы:

1. Рекомбинационные линии ионов С, N, O, Ne и др. соответствуют дипольным переходам между возбужденными уровнями с $l > l_0$, где l — главное квантовое число оптического электрона, l_0 — максимальное значение l для основной конфигурации рассматриваемого элемента. Для этих электронов с хорошей точностью выполняется приближение LS -связи.

2. Интеркомбинационные переходы с нарушением правил отбора в приближении LS -связи. Примером таких переходов служит C III] λ 1909 ($2s^1 1S - 2s2p^1 P^0$).

3. Линии магнитодипольных и квадрупольных переходов — классические запрещенные линии спектров планетарных туманностей.

Основные усилия прилагаются для расчета вероятностей переходов групп 2—3, так как соответствующие линии — наиболее интенсивные линии спектров планетарных туманностей.

Недавние достижения в расчете вероятностей этих переходов суммированы в обзоре [16].

Расчет вероятностей разрешенных дипольных переходов осложняется наличием корреляционных эффектов и необходимостью перехода в значительном числе случаев от одно- к многоконфигурационному приближению. Точность расчета вероятностей разрешенных переходов, особенно двух-электронных переходов, невысока — в среднем 50%. Приведем в табл. 2

Таблица 2
ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРЕХОДОВ ($10^8 s^{-1}$): ХФ — В ПРИБЛИЖЕНИИ ХАРТ-РИ — ФОКА, НК — С УЧЕТОМ НАЛОЖЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЙ, ТВ — РАСЧЕТЫ ПО ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ. Эксп. — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Ион	λ (А)	Переход	ХФ [18]	НК [18]	ТВ [19]	Эксп. [20]
С III	1247	$2s2p^1 P^0 - 2p^2 1S$	7.35	22.3	16.6	1.4
	2298	$2s2p^1 P^0 - 2p^2 1D$	1.78	1.30	1.5	
N IV	955	$2s2p^1 P^0 - 2p^2 1S$	10.6	30.7	25.1	2.2
	1719	$2s2p^1 P^0 - 2p^2 1D$	2.69	2.23	2.44	
O V	775	$2s2p^1 P^0 - 2p^2 1S$	13.9	39.4	34.0	3.3
	1371	$2s2p^1 P^0 - 2p^2 1D$	3.66	3.19	3.45	

вероятности некоторых переходов ионов С, N, O, вычисленные как с учетом, так и без учета корреляционных эффектов в сравнении с экспериментальными вероятностями. Наиболее полные таблицы вероятностей разрешенных переходов ионов С, N, O содержатся в приложении к работе [17].

В заключение отметим следующее обстоятельство. В планетарных туманностях присутствует значительное количество пылевых частиц, образовавшихся в атмосферах красных гигантов — предшественников планетарных туманностей. Фоторазрушение пылевых частиц квантами рентгеновского излучения зоны звездного ветра, а также в некоторой степени и непосредственно при столкновениях пылинок с ионами звездного ветра приводит к образованию ионов Mg, S, K, Ca, Mn, Fe и других элементов в возбужденных состояниях.

Ленинградский государственный
университет
Институт астрофизики и физики
атмосферы АН Эст.ССР

PECULIARITIES OF THE SPECTRA OF PLANETARY NEBULAE WITH STELLAR WIND OF THEIR NUCLEUS

A. A. NIKITIN, T. H. FEKLISTOVA, A. F. KHOLTYGIN

Some peculiarities of the spectra of planetary nebulae due to contribution of the stellar wind from the nucleus of the planetary nebulae are studied. The effect of X-ray emission by high-energy electrons of the hot stellar wind on the spectra of nebulae is considered. The atomic data necessary for interpretation of the spectra of hot stellar winds connected with planetary nebulae are discussed.

ЛИТЕРАТУРА

1. *M. Partnotto*, Planetary Nebulae, IAU Symp. No. 103, Reidel, Dordrecht, 1983, p. 323.
2. *И. Н. Минин*, Тр. IV совещ. по вопр. космогонии, АН СССР, М., 1955.
3. *В. В. Витязев*, Астрофизика, 6, 83, 1969.
4. *F. D. Kahn*, Planetary Nebulae, IAU Symp. No. 103, Reidel, Dordrecht, 1983, p. 305.
5. *R. Bedogni, A. d'Ercole*, Astron. and Astrophys., 157, 101, 1986.
6. *P. J. de Corte, J. J. Claas, F. A. Jansen*, Adv. Space Res., 5, 57, 1985.
7. *С. Потташ*, Планетарные туманности, Мир, М., 1977.
8. *J. B. Kaler*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 31, 517, 1976.
9. *К. У. Аллен*, Астрофизические величины, Мир, М., 1977.
10. *L. H. Aller*, Gaseous Nebulae, Chapman and Hall, London, 1956.
11. *J. P. Harrington, M. J. Seaton, S. Adams, J. H. Lutz*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 189, 517, 1982.
12. *S. Grandt*, Astrophys. J., 206, 658, 1976.
13. *А. А. Никитин, А. Ф. Холтыгин*, Вестн. ЛГУ, № 13, 111, 1980.
14. *А. А. Никитин, А. Ф. Холтыгин*, Изв. АН СССР, сер. физ., 50, 1417, 1986.

15. *J. J. Yeh, I. Lindau*, *At Data Nucl. Data Tables*, **32**, 1, 1985.
16. *S. Mendoza*, *Planetary Nebulae*, IAU Symp. No. 103, Reidel, Dordrecht; 1983, p. 143.
17. *H. Nussbaumer, P. J. Storey*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, **56**, 293, 1984.
18. *П. О. Богда́нович, Р. А. Лукошявичус, А. А. Никитин, Э. Б. Рудвикас, А. Ф. Холты́гин*, *Астрофизика*, **22**, 551, 1985.
19. *D. S. Victorov, U. I. Safronova*, *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, **17**, 603, 1977.
20. *J. Lindenberg*, *Phys. Lett.*, **29A**, 467, 1969.