

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 15

АВГУСТ, 1979

ВЫПУСК 3

УДК 523.852

ОБ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЯХ Mg II И Ca II В ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЯХ

Г. А. ГУРЗАДЯН

Поступила 30 октября 1978

Проанализированы условия возбуждения резонансных линий в эмиссии ионизованных магния ($\lambda\lambda$ 2796+2803 Mg II) и кальция ($\lambda\lambda$ 3934+3968 Ca II) в планетарных туманностях. Показано, что эти разрешенные линии возбуждаются тем же механизмом, что и запрещенные линии, то есть неупругими электронными столкновениями, а не обычной флуоресценцией.

Эмиссионная линия λ 2800 Mg II достаточной силы может наблюдаться лишь в спектрах планетарных туманностей среднего возбуждения (IC 2149), а также у диффузных туманностей. У высоковозбужденных планетарных туманностей (NGC 7026, 7662) эта линия не должна наблюдаться.

Отсутствие эмиссионных линий H и K Ca II в спектрах планетарных туманностей объясняется тем, что ожидаемая их интенсивность на 3—4 порядка меньше интенсивности линии λ 2800 Mg II или H, водорода.

В связи с активизацией внеатмосферных наблюдений небесных тел, в том числе, планетарных туманностей, вопрос о поведении известного резонансного дублета ионизованного магния λ 2795+2803 Mg II в спектрах планетарных туманностей приобретает особое значение. В принципе возбуждения этого дублета в эмиссии в условиях планетарных туманностей как будто не вызывает сомнения [1], а в одном случае — туманности IC 2149 — этот дублет, по всей вероятности, удалось отождествить на ее одной-единственной спектрограмме, полученной в 1973 г. с помощью космической обсерватории «Орион-2» [2].

С другой стороны, известные эмиссионные линии H и K ионизованного кальция, находящиеся в видимой области спектра (λ 3934 А и λ 3968 А), возникают в результате тех же атомных переходов, что и дублет λ 2800 Mg II. И хотя космическое содержание кальция на порядок мень-

ше магния [3], эмиссионные линии H и K Ca II, казалось бы, должны были наблюдаться везде, где присутствует дублет λ 2800 Mg II, коль скоро обе системы возбуждаются при переходах, являющихся изоэлектронными. Между тем, за всю историю наблюдения спектров планетарных туманностей в наземных условиях, эмиссионные линии H и K Ca II не были обнаружены ни разу.

Таким образом, в планетарных туманностях возбуждение дублета λ 2800 Mg II в эмиссии по каким-то причинам не сопровождается одновременным возбуждением дублета H+K Ca II. Заметим, кстати, что в обычных звездных спектрах дублет λ 2800 Mg II в поглощении наблюдается всегда в унисон с дублетом H+K Ca II, причем в интенсивностях, соответствующих их универсальному содержанию. Нашей задачей является: выяснить механизм возбуждения дублетов λ 2800 Mg II и H+K Ca II в условиях планетарных туманностей и раскрыть причину указанного противоречия.

Особенность поставленной задачи заключается в том, что линии λ 2795 + 2803 Mg II, будучи резонансными, возникают к тому же при разрешенных переходах. В случае, если эти линии возникают в результате флуоресценции, на завершающем этапе на пути каскадных переходов сверху вниз, после рекомбинации однажды ионизованных атомов магния с электронами, то отношение интенсивности этого дублета, скажем, к интенсивности той или иной линии водорода, будет в первом приближении пропорционально относительному содержанию магния Mg/H, то есть порядка 10^{-5} . Это значит, что при флуоресцентном механизме возбуждения эмиссионной линии λ 2800 Mg II ее интенсивность будет на 4—5 порядков меньше интенсивности водородных линий и, стало быть, ее практически нельзя будет обнаружить на спектрограмме планетарной туманности.

Но, как было указано выше, линия λ 2800 Mg II, по всей вероятности, присутствует в спектре пока что одной планетарной туманности, причем с интенсивностью, равной по порядку величины интенсивности линии H α водорода. Однако даже если игнорировать этот факт, существует, оказывается, в условиях планетарных туманностей иной — не флуоресцентный механизм возбуждения линии λ 2800 Mg II с интенсивностью порядка интенсивности водородных линий. Мы имеем в виду возможность возбуждения вполне разрешенной линии, какой является λ 2800 Mg II, путем неупругих электронных столкновений.

Итак, мы полагаем, что переходы однажды ионизованных атомов магния из основного состояния 1 в резонансное 2 происходит путем неупругих электронных столкновений, которые тут же (поскольку $A_{21} = 5.2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$) компенсируются спонтанными переходами 2 \rightarrow 1 вниз с испусканием фотона. Поэтому мы можем написать для энергии, излучаемой единицей объема туманности в линии λ 2800 Mg II:

$$E(2800) = n(\text{Mg}^+) n_e b_{12} h\nu_{12}, \quad (1)$$

где $n(\text{Mg}^+)$ и n_e — концентрации ионов магния и свободных электронов, b_{12} — коэффициент перехода 1 → 2 для Mg^+ электронными ударами:

$$b_{12} = 8.54 \cdot 10^{-6} \frac{\Omega(1, 2)}{\omega_2} T_e^{-1/2} e^{-z_{12}/4T_e}. \quad (2)$$

Высокая эффективность неупругих электронных столкновений при возбуждении линии $\lambda 2800 \text{ Mg II}$ обусловлена тем важным обстоятельством, что потенциал возбуждения z_{12} резонансного уровня Mg^+ очень мал, всего 4.4 эВ, тот порядок, который мы имеем для метастабильных уровней большинства атомов и ионов, обычно встречающихся в туманностях.

Представляется удобным выражать $E(2800)$ в единицах энергии E_3 , излучаемой единицей объема туманности в линии H_β . Имеем:

$$E_3 = z_{43} n_e A_{43} h\nu_3. \quad (3)$$

Из (1) и (3) можем написать, подставив также $A_{12} = 0.837 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$, $\Omega(1, 2) = 10.5$ [4], $\omega_2 = 3$ и приняв $n_e = n(\text{H})$, где $n(\text{H})$ — концентрация водородных атомов в туманности,

$$\frac{E(2800)}{E_3} = 6.2 \cdot 10^{-12} \frac{n(\text{Mg}^+)}{n(\text{H})} \frac{T_e^{-1/2}}{z_{42}} e^{-\frac{z_{12}}{T_e}}. \quad (4)$$

Для планетарной туманности, например, IC 2149, имеем: $T_e = 12400 \text{ K}$ [6], $E(2800)/E_3 \approx 1$ [2]. Подставив в (4) также $z_{42} = 0.33 \cdot 10^{-21} \text{ см}^3 \cdot \text{с}$ [5], найдем:

$$\frac{n(\text{Mg}^+)}{n(\text{H})} = 2.4 \cdot 10^{-6}. \quad (5)$$

Но для универсального содержания магния имеем $n(\text{Mg})/n(\text{H}) = (2-4) \cdot 10^{-3}$. Поэтому из (5) будем иметь для относительного содержания ионов Mg^+ в туманности:

$$\frac{n(\text{Mg}^+)}{n(\text{Mg})} = \frac{n^+}{n_0} = 0.1. \quad (6)$$

Этот результат является в какой-то мере неожиданным, так как он означает, что в однажды ионизованном состоянии находится всего 10% всех атомов магния, и это небольшое количество ионов Mg^+ обеспечивает генерацию эмиссионной линии $\lambda 2800 \text{ Mg II}$ с силой, сравнимой с линией H_β . Остальные же 90% атомов магния находятся в состоянии ионизации в два и больше раз. И хотя ионы Mg^{2+} , в принципе, могут возбуждать линию $\lambda 2800 \text{ Mg II}$ флуоресцентным механизмом, однако ее интенсив-

ность, как было отмечено выше, будет крайне мала, несмотря на то, что полное число ионов Mg^{+} на порядок больше числа ионов Mg^{-} .

Очевидно, нам нужно раскрыть по мере возможности всю картину распределения атомов магния по состояниям ионизации. Для этого необходимо сперва вывести формулы ионизации магния, пользуясь обычным условием стационарности между числом актов фотоионизации и числом актов рекомбинации. В результате найдем для формулы ионизации однажды ионизованного магния.

$$\frac{n^{+}}{n_1} n_1 = W \frac{2\alpha_0^{\cdot} (\gamma^{\cdot})^2 k}{c^2 h} \frac{T_0}{\alpha^{+}(T_0)} e^{-h\nu^{\cdot}/kT_0}, \quad (7)$$

где $n^{+} = n(Mg^{+})$ и n_1 — концентрации однажды ионизованных и нейтральных атомов магния; α_0^{\cdot} — коэффициент непрерывного поглощения нейтрального магния на частоте ионизации $\nu > \nu^{\cdot}$; $\alpha^{+}(T_0)$ — коэффициент рекомбинации ионов магния с электроном, T_0 — температура центральной звезды; W — коэффициент дилуции.

Так же можно вывести формулу ионизации для дважды ионизованного магния:

$$\frac{n^{++}}{n^{+}} n_1 = W \frac{2\alpha_0^{++} (\gamma^{++})^2 k}{c^2 h} \frac{T_0}{\alpha^{++}(T_0)} e^{-h\nu^{++}/kT_0}. \quad (8)$$

Применим эти формулы в отношении IC 2149, для которой $T_0 = 50000$ К [2], $n_1 = 3.2 \cdot 10^3$ см⁻³ [7]. Подставив также числовые значения остальных параметров — все они, взятые из разных источников, собраны в табл. 1, — найдем из (7) и (8):

$$\frac{n^{+}}{n_1} = 0.4 \cdot 10^{14} W; \quad \frac{n^{++}}{n^{+}} = 0.2 \cdot 10^{14} W. \quad (9)$$

Пренебрегая числом атомов, находящихся в состоянии ионизации три раза и выше, можем написать для полного числа атомов магния N_1 в единице объема:

$$n_1 + n^{+} + n^{++} = n_0. \quad (10)$$

Подставив сюда значения n_1 , n^{+} и n^{++} из (6) и (9), получим уравнение вида

$$aW^2 - bW + 1 = 0, \quad (11)$$

где единственным неизвестным является W — коэффициент дилуции. Находя отсюда числовое значение W , найдем затем с помощью (10) распределения атомов по состояниям ионизации.

В нашем случае $a = 8 \cdot 10^{28}$, $b = 3.6 \cdot 10^{16}$. Этими данными найдем из (11): $W = 4.5 \cdot 10^{-23}$. По сути дела, здесь попутно был предложен метод нахождения числовой величины фактора дилуции для планетарных туманностей с помощью эмиссионной линии λ 2800 Mg II.

Таблица 1
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ АТОМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ
Mg II и Ca II

		Mg II	Ca II	Литература
ν^+	с^{-1}	$1.85 \cdot 10^{15}$	$1.48 \cdot 10^{15}$	[12]
ν^{++}	с^{-1}	$3.66 \cdot 10^{15}$	$2.87 \cdot 10^{15}$	"
λ_0^+	см^2	$1.19 \cdot 10^{-18}$	$0.46 \cdot 10^{-18}$	"
λ_0^{++}	см^2	$0.24 \cdot 10^{-18}$	$0.11 \cdot 10^{-18}$	"
$\tau^+(T_e)$	$\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$1.26 \cdot 10^{-13}$	$0.08 \cdot 10^{-14}$	[11, 12]
$\tau^{++}(T_e)$	$\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$3.01 \cdot 10^{-13}$	$0.3 \cdot 10^{-14}$	"
$\Omega(1, 2)$		10.5	5.9	[18, 4]
ϵ_{12}	эВ	4.4	3.16	

Подставив найденное значение W в (9) и учитывая (6), найдем величины n_1/n_0 , n^+/n_0 , n^{++}/n_0 , то есть распределения атомов магния по состояниям ионизации; результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЧИСЛА АТОМОВ
МАГНИЯ И КАЛЬЦИЯ ПО СОСТОЯНИЯМ ИОНИЗАЦИИ
В УСЛОВИЯХ ПЛАНЕТАРНОЙ ТУМАННОСТИ

	$\frac{n_1}{n_0}$	$\frac{n^+}{n_0}$	$\frac{n^{++}}{n_0}$
Mg	$2 \cdot 10^{-4}$	0.10	0.90
Ca	$6 \cdot 10^{-8}$	0.00013	1

Перейдем к кальцию. Здесь картина, оказывается, иная. Дело в том, что потенциалы ионизации кальция, скажем, на второй и третьей степенях, значительно меньше, чем потенциалы ионизации магния в тех же состояниях. Более определенно картина выглядит следующим образом:

	χ^+ (эВ)	χ^{++} (эВ)	χ^{+++} (эВ)
Mg	7.6	15.0	83.1
Ca	6.1	11.0	50.9

Указанное обстоятельство приводит к тому, что практически все атомы кальция окажутся в высокоионизованных состояниях — два, три и более раз. В результате количество однажды ионизованных атомов, возбуждающих H и K линии Ca II, может оказаться крайне небольшим.

Более конкретно распределение числа атомов кальция по состояниям ионизации можно найти с помощью тех же формул (7) и (8), но с подстановкой соответствующих числовых значений входящих в них параметров для кальция, которые также приведены в табл. 1. При вычислениях в эти формулы вводится также найденное выше числовое значение W . В результате находим для кальция:

$$\frac{n^+}{n_1} = 7.5 \cdot 10^4; \quad \frac{n^{++}}{n} = 7.7 \cdot 10^1. \quad (12)$$

Собственно говоря, в случае кальция нам следовало бы учитывать также населенность атомов в третьем ионизованном состоянии. Однако из-за отсутствия числовых данных, в частности, для $\lambda_{0,3}^{++}$ и $\lambda_{0,3}^{+++}$ (T_e), придется ограничиться рассмотрением баланса количества атомов, распределенных в трех состояниях; в этом случае мы найдем верхние пределы истинных значений отношений n_1/n_0 ; n^+/n_0 и n^{++}/n_0 .

Итак, написав условие типа (10) для кальция и используя (12), найдем в результате числовые значения n_1/n_0 , n^+/n_0 и n^{++}/n_0 ; они приведены в табл. 2.

Нас интересует величина n^+/n_0 , и она, оказывается, в случае кальция примерно в 750 раз меньше, чем n^+/n_0 для магния. Это значит, что при прочих равных условиях интенсивность дублета H+K Ca II должна быть в 750 раз меньше интенсивности линии λ_{2800} Mg II. В действительности же отношение интенсивностей дублетов Ca II и Mg II зависит также от других величин и, прежде всего, от относительного содержания этих элементов, «силы ударов» Ω (1, 2) и пр. С учетом всех этих факторов мы будем иметь для отношения интенсивностей обоих дублетов:

$$\frac{E(2800)}{E(H+K \text{ Ca II})} = \frac{n(\text{Mg})}{n(\text{Ca})} \frac{b_{12}^{\text{Mg}}}{b_{12}^{\text{Ca}}} \frac{\chi_{\text{Mg}}}{\chi_{\text{Ca}}}. \quad (13)$$

Но из третьего столбца табл. 2 имеем:

$$\frac{n(\text{Mg})}{n(\text{Ca})} = \frac{(n^+/n_0)_{\text{Mg}}}{(n^+/n_0)_{\text{Ca}}} \frac{n(\text{Mg})}{n(\text{Ca})} = 750 \frac{n(\text{Mg})}{n(\text{Ca})}, \quad (14)$$

где $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ есть относительное универсальное содержание магния и кальция; оно порядка 10—20. Подставив в (13) также числовые значения остальных параметров, найдем (при $T_e = 12400 \text{ K}$):

$$\frac{E(2800)}{E(H + K Ca)} \approx 700 \frac{n(Mg)}{n(Ca)}. \quad (15)$$

Отсюда найдем, что уже при $n(Mg)/n(Ca) = 10$ линии H и K Ca II должны быть в 7000 раз слабее линии $\lambda 2800$ Mg II или H γ . Ясно, что при таких условиях линии H и K Ca II вообще не могут наблюдаться в спектрах планетарных туманностей.

При всей правдоподобности этого вывода, однако, мы не совсем уверены в правильности полученных количественных оценок. Главный источник сомнений мы видим в использованных нами числовых данных о коэффициентах рекомбинаций $\alpha^+(T_e)$ и $\alpha^{++}(T_e)$; как-то настораживает очень большая разница между значениями этих параметров для магния и для кальция (табл. 1). По-видимому, найденные Тартером [11] значения этих коэффициентов для магния более правильны, чего нельзя сказать без дополнительной проверки в отношении тех же величин для кальция, взятых нами из [12].

В пользу сделанного вывода об отсутствии линий H и K Ca II в спектрах планетарных туманностей говорят данные наблюдений. В спектрах семи планетарных туманностей (NGC 7027, 7662, 2022, 6864 и пр.) была обнаружена [13] очень слабая эмиссионная линия четырехжды ионизованного кальция $\lambda 5309$ [Ca V], а в спектре всего одной планетарной туманности (NGC 7027) также линия $\lambda 6087$ [Ca V]. Был обнаружен еще след линии $\lambda 5615$ [Ca VII] в спектре NGC 7027. И это все, что известно нам о кальции в туманностях. Эмиссионные линии, принадлежащие, скажем, трехкратно или двукратно ионизованному кальцию, в спектрах планетарных туманностей отсутствуют совсем.

В противоположность этому почти десять эмиссионных линий нейтрального магния и столько же линий однажды ионизованного магния были обнаружены в разных комбинациях в спектрах около двух десятков планетарных туманностей. Особо часто наблюдается линия $\lambda 4571$ [Mg I] (она, будучи интеркомбинационной, подобна запрещенной), $\lambda 4462$ [Mg I], $\lambda 3838$ Mg I и пр., а также флуоресцентные линии субординарных серий $\lambda 4481$ Mg II (у шести планетарных туманностей), $\lambda 4340$ Mg II и пр.

Кстати, факт присутствия линий нейтрального магния в оптических спектрах многих планетарных туманностей делает весьма вероятным возбуждение еще одной резонансной линии, находящейся в ультрафиолете — $\lambda 2852$ Mg I. Эта линия также числится в списке эмиссионных линий, обнаруженных в коротковолновом спектре туманности IC 2149 [2], хотя приведенная там оценка ее относительной интенсивности кажется весьма приблизительной.

Таким образом, данные наблюдений находятся в согласии со сделанным выше выводом о странном на первый взгляд поведении линий Mg⁺

с одной стороны, и линий H и K Ca II — с другой. Вместе с тем, такое поведение указанных линий следует считать характерным именно для планетарных туманностей, имеющих в своих центрах звезду с очень высокой температурой.

Из всего этого следует, одновременно, что ожидать возбуждение эмиссионных линий H и K Ca II мы должны лишь у низковольтных туманностей, связанных с низкотемпературными звездами. В первую очередь мы имеем в виду обычные диффузные туманности. Так и есть на самом деле: очень сильные линии H и K Ca II, а также инфракрасные линии λ 7291 [Ca II], λ 8542 [Ca II] были обнаружены, например, в спектре одной диффузной туманности в Тельце под обозначением T-1 [14]. Весьма сильные запрещенные линии λ 3933 Ca II и λ 3968 Ca II были зафиксированы также в спектре такого заведомо низковольтного объекта, каким является объект Хербига—Аро № 1 [15].

С повышением температуры центральной звезды или уменьшением фактора дилуции туманности, магний должен перейти на более высокие степени ионизации и тем самым сильно должно уменьшиться количество однажды ионизированных атомов магния. В результате у высоковольтных планетарных туманностей линия λ 2800 Mg II должна быть крайне слаба или должна отсутствовать вовсе. Возможно этим следует объяснить отсутствие этого дублета на коротковолновой спектрограмме, полученной путем ракетного запуска, типично высоковольтной туманности NGC 7027 ($T_e \sim 150\,000$ K) [9], хотя некоторая запутанность этой спектрограммы в области ~ 2900 Å не позволяет сделать на этот счет однозначных выводов. По весьма приблизительным оценкам степень ионизации дважды ионизованного магния в туманности NGC 7027 должна быть на порядок выше, чем в туманности IC 2149. Соответственно ожидаемая интенсивность дублета λ 2800 Mg II в спектре NGC 7027 должна быть на порядок меньше его интенсивности в IC 2149. Отношение $E(2800)/E(H_\beta)$ для IC 2149, с учетом влияния межзвездного поглощения, порядка двух (при общем поглощении в фотографических лучах для этой туманности, равном 2^m [2]). Поэтому мы должны иметь $E(2800)/E(H_\beta) \approx 0.2$ для NGC 7027. Действительно, чуть позднее, по наблюдениям IUE [19], дублет λ 2800 Mg II весьма четко и в разделенном виде был зафиксирован в спектре этой туманности, причем с интенсивностью $E(2800)/E(H_\beta) = 0.3$ — в согласии с ожидаемой величиной.

Вслед за NGC 7027 и тем же путем (ракетный запуск) была получена спектрограмма другой высоковольтной туманности — NGC 7662 ($T_e \sim 100\,000$) [17]. Дублет λ 2800 Mg II в ее спектре не был обнаружен. Имея горький опыт с NGC 7027, этот результат мы не можем считать достоверным. Вообще-то следует задуматься над причинами возникновения значительных расхождений между ракетными экспериментами [9, 17], с

одной стороны, и IUE [19] — с другой, как по части отождествления эмиссионных линий, так и определения их интенсивностей.

Наиболее сильные линии λ 2800 Mg II, таким образом, следует ожидать у средне- и низковозбужденных планетарных туманностей (IC 2149 является средневозбужденной, с классом возбуждения 4).

Задача о возбуждении эмиссионной линии λ 2800 Mg II в хромосферах звезд средних и поздних классов и, в частности, вспыхивающих звезд была рассмотрена ранее [10]. Оказывается, и в звездных хромосферах эта линия возникает в результате неупругих электронных столкновений. Более того, она должна быть самой сильной эмиссионной линией в спектрах этих звезд, на порядок сильнее H_{β} и сравнимой с L-водорода. Однако, в отличие от планетарных туманностей, в звездных хромосферах, наряду с эмиссионной линией λ 2800 Mg II, должны наблюдаться также линии H и K Ca II, что и имеет место на самом деле.

В заключение вернемся еще раз к упомянутым выше линиям λ 5309 [Ca V] и λ 6087 [Ca V]. Схема энергетических уровней и переходов этих и остальных линий четырехкратно ионизованного кальция показана на рис. 1.

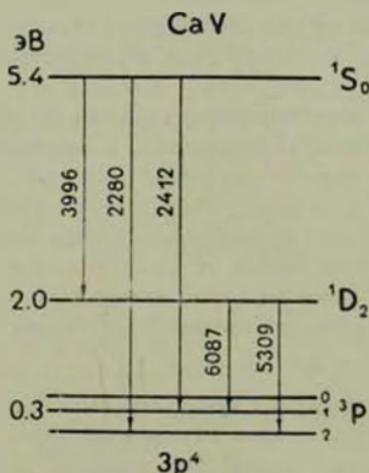


Рис. 1. Энергетические уровни четырехкратно ионизованного кальция. Показаны основные (³P) и ближайшие (¹D₂ и ¹S₀).

Как видим, отношение интенсивностей линий λ 5309 и 6087 Å не зависит от числа ионов Ca⁴⁺ в возбужденных уровнях, оно зависит только от соответствующих коэффициентов спонтанных переходов. А числовые значения этих коэффициентов известны и равны: $A(5309) = 1.9 \text{ с}^{-1}$ и $A(6087) = 0.43 \text{ с}^{-1}$ [16]. Поэтому будем иметь для теоретического значения отношения интенсивностей обеих линий:

$$\frac{E(5309)}{E(6087)} = 5.0. \quad (16)$$

Между тем, наблюдения дают для NGC 7027 нечто странное, а именно $E(5309) = 0.47$ и $E(6087) = 1.15$ [13], то есть $E(5309)/E(6087) = 0.4$ или, с учетом влияния межзвездного поглощения, $E(5309)/E(6087) = 0.6$ — в обоих случаях на порядок (!) меньше теоретически ожидаемой величины (16). Расхождение столь велико, что нам даже трудно строить догадки относительно его причин. Если оно не есть результат случайной ошибки или опечатки, вкравшейся в [13], то приходится усомниться в «чистоте» самой линии $\lambda 6087 \text{ \AA}$ в том смысле, что она могла бы быть блендирована эмиссионными линиями других атомов или ионов. Так или иначе, этот вопрос нуждается в рассмотрении.

Выводы. Анализ условий возбуждения эмиссионных резонансных линий Mg II и Ca II в планетарных туманностях приводит к следующим выводам.

1. Резонансный дублет однажды ионизованного магния $\lambda 2800 \text{ Mg II}$ возбуждается путем неупругих электронных столкновений, а не флуоресценции, как это имеет место обычно в случае разрешенных эмиссионных линий.

В теории свечения планетарных туманностей, как известно, все эмиссионные линии подразделяются на две группы, в зависимости от механизма их возбуждения. Первая группа — *разрешенные* линии, возбуждаемые путем флуоресценции. Вторая группа — *запрещенные* линии, возбуждаемые путем неупругих электронных столкновений. Теперь появляется третья группа эмиссионных линий, а именно, *разрешенные* линии, возбуждаемые как запрещенные, то есть путем неупругих электронных столкновений. Это является качественно новым для физики планетарных туманностей результатом.

2. В условиях планетарных туманностей среднего возбуждения может наблюдаться достаточно сильная эмиссионная линия $\lambda 2800 \text{ Mg II}$, сравнимая по интенсивности с линией H_α водорода. При этом в самом возбуждении дублета иногда принимают участие не более 10% общего количества атомов магния в туманности. Дублет $\lambda 2800 \text{ Mg II}$ в эмиссии должен быть особо сильным у диффузных туманностей (Орион, Трифид и др.).

3. Эмиссионные линии H и K Ca II в условиях планетарных туманностей также возбуждаются путем неупругих электронных столкновений. Однако ожидаемая их интенсивность должна быть на 3—4 порядка меньше интенсивности линии H_α или дублета $\lambda 2800 \text{ Mg II}$. Поэтому линии

H и K ионизованного кальция практически вовсе не должны наблюдаться в спектрах планетарных туманностей.

Бюрананская астрофизическая
обсерватория

ON EMISSION LINES OF Mg II AND Ca II IN PLANETARY NEBULAE

G. A. GURZADYAN

An analysis of the excitation of the resonance lines both of ionized magnesium ($\lambda\lambda$ 2796 + 2803 Mg II) and calcium ($\lambda\lambda$ 3934 + 3968 Ca II) in planetary nebulae is carried out. It is shown that these permitted lines are excited not by the usual fluorescence but by the same mechanism as the forbidden lines, that is by electron nonelastic collisions.

In principle the emission lines λ 2800 Mg II can be observed in medium excited planetary nebulae (IC 2149) as well as in the diffuse nebulae. These lines cannot be observed in the spectrum of high excited planetary nebulae (NGC 7027, 7662).

The absence of the emission lines H and K Ca II in the spectrum of planetary nebulae also has its explanation: the predicted intensities of these lines are of 3--4 order smaller than the intensity of λ 2800 Mg II or H₁.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. H. Aller, Mem. Soc. R. Sci., Liege IV, 1961.
2. G. A. Gurzadyan, M. N., 172, 249, 1975.
3. L. H. Aller, J. E. Ross, Science, March, 26, 1976.
4. J. K. Van Blarckom, J. Phys. B: Atom. Mol. Phys., 3, 932, 1970.
5. G. A. Gurzadyan, Planetary Nebulae, Gordon and Breach, N. Y., 1969.
6. J. B. Kaler, Ap. J., 160, 887, 1970.
7. D. E. Osterbrock, Ap. J., 131, 541, 1960.
8. L. H. Aller, I. S. Brown, R. Minkowski, Ap. J., 122, 62, 1955.
9. R. C. Bohlin, P. A. Marstoni, T. P. Stecher, Ap. J., 202, 415, 1975.
10. G. A. Gurzadyan, Astrophys. Space Sci., 52, 51, 1977.
11. C. B. Tarter, Ap. J., 163, 313, 1971.
12. C. W. Allen, Astrophys. Quant. 3-th Ed. The Athlone Press, 1973.
13. J. B. Kaler, Ap. J., 1977, ser., 31, 517, 1976.

14. *R. D. Schwartz*, *Ap. J.*, 191, 419, 1974.
15. *K. H. Böhm*, *Ap. J.*, 123, 379, 1956.
16. *R. H. Garstang*, *Planetary Nebulae*, Symposium No. 34, Ed. D. E. Osterbrock and C. R. O'Dell, Dordrecht-Holland, 1968, p. 143.
17. *R. C. Bohlin, J. P. Harrington, T. P. Stecher*, *Ap. J.*, 219, 575, 1978.
18. *P. O. Taylor, G. H. Duun*, *Phys. Rev., A*, 8, 2304, 1973.
19. *M. Grewing, A. Boksenberg, M. J. Seaton et al.*, *Nature*, 275, 394, 1978.