

# АСТРОФИЗИКА

ТОМ 62

НОЯБРЬ, 2019

ВЫПУСК 4

## ОБ УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЛИНИИ ГЕЛИЯ HeI 10830 Å В ДИСКОВОМ И МАГНИТОСФЕРНОМ ВЕТРАХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД Ае ХЕРБИГА

Т.А.ЕРМОЛАЕВА

Поступила 27 апреля 2019

Принята к печати 13 сентября 2019

Исследуются условия образования линии гелия в дисковых и магнитосферных ветрах звезд типа Ae Хербига. Для решения этой задачи используется пакет CLOUDY. Показано, что необходимая для объяснения наблюдаемых профилей типа Р Лебедя оптическая толщина газа в линии HeI 10830 Å достигается в дисковом или магнитосферном ветрах звезд Ae Хербига при  $T_e \geq 10000$  К. При этом рентгеновское излучение, образующееся на поверхности и в окрестностях молодой звезды, является основным источником ионизации атомов гелия.

**Ключевые слова:** *молодые звезды: звезды типа Ae Хербига: дисковый ветер:  
магнитосферный ветер*

1. *Введение.* Квазирезонансная линия нейтрального гелия HeI 10830 Å наблюдалась в спектрах многих молодых звезд малых и промежуточных масс [1-4] и является чувствительным индикатором состояния газа в эмиссионных областях. Профили этой линии часто имеют форму, свидетельствующую как об аккреции газа звездой, так и об истечении вещества из окрестности звезды. Аккреционные профили демонстрируют также и другие линии гелия, в то время как истечение вещества наблюдается только в линии  $\lambda$  10830 [5]. Эта особенность объясняется метастабильностью нижнего уровня перехода  $2p^3P^0 - 2s^3S$ , образующего линию  $\lambda$  10830. Спонтанные радиационные переходы с уровня  $2^3S$  запрещены правилами отбора, что позволяет атомам накапливаться на метастабильном уровне, создавая большую оптическую толщину в линии  $\lambda$  10830, по сравнению с другими линиями нейтрального гелия.

Существует ряд теоретических работ, посвященных моделированию условий образования линии  $\lambda$  10830 в спектрах звезд типа Т Тельца [6,7]. В рамках этих исследований было показано, что оптическая толщина, необходимая для объяснения наблюдаемых профилей, может быть достигнута только при сильной ионизации гелия в ветре. Эта зависимость возникает благодаря рекомбинационному механизму заселения триплетных уровней атома гелия. Однако излучение звезды и электронные удары при относительно низких

температурах ветра ( $T_e \sim 10^4$  К) не могут обеспечить достаточную степень ионизации, а, следовательно, и оптическую толщину в линии HeI 10830 Å . Поэтому необходим дополнительный источник ионизации: УФ или рентгеновское излучение.

Источниками рентгеновского излучения, наблюдаемого в спектрах звезд типа Т Тельца, могут быть: горячая корональная плазма и ударные волны, образующиеся при акреции газа на звезду (см., например [8] и цитированную там литературу). Звезды Ae Хербига лишены конвективной оболочки и не обладают такими сильными магнитными полями, как звезды типа Т Тельца [9-11]. Поэтому возможность формирования рентгеновского излучения в их хромосферах и коронах остается под вопросом. Другим потенциально важным источником рентгеновского излучения Ae звезд Хербига являются ударные волны, образующиеся при акреции газа на звезду.

В нашей статье исследуются условия образования линии гелия в дисковых и магнитосферных<sup>1</sup> ветрах звезд типа Ae Хербига. Для решения этой задачи мы используем разработанный Ферландом и др. [12] пакет CLOUDY. С помощью этого пакета рассчитан ряд моделей с различными источниками ионизации стандартного по химическому составу газа (электронный удар, ионизация рентгеновским излучением и излучением звезды). Параметры моделей выбраны с учетом условий, характерных для дискового и магнитосферных ветров. Обсуждается влияние физических условий на оптическую толщину и энергетику газа в линии HeI 10830 Å .

*2. Описание модели.* Истечение вещества из окрестностей молодых звезд обычно изучают с помощью моделей, в которых основные параметры ветра - температура, скорость движения и плотность газа меняются непрерывным образом. Однако есть основания предполагать, что ветер имеет стохастическую составляющую, которую можно представить, как совокупность разрывов в движущемся газе. Такой ветер представляет собой совокупность газовых сгустков (струй) и его очень трудно моделировать [13-15]. Ниже мы рассмотрим состояние газа в таких газовых структурах (блоках), выбирая их параметры таким образом, чтобы имитировать физические условия, реализующиеся в различных участках дискового и магнитосферного ветров.

Как известно, характерные пространственные масштабы излучающих областей молодых звезд порядка  $10^{10} - 10^{12}$  см, концентрация водорода в них меняется в пределах  $N_H \sim 10^9 - 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, характерные значения электронной температуры  $T_e \sim 10^4 - 1.5 \cdot 10^4$  К [16,17]. Эти значения исходных параметров

---

<sup>1</sup> Это может быть X-ветер [18], полярный ветер [19], или конический ветер [20], образующиеся при взаимодействии аккреционного диска с магнитосферой звезды.

будут учитываться при моделировании состояния газа на основе простой модели неподвижного, изотермического слоя толщиной  $Z$ , находящегося на расстоянии  $R_{in}$  от звезды (рис.1).

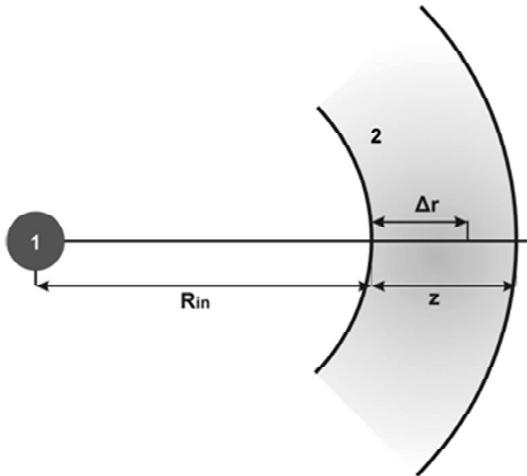


Рис.1. Схематическое изображение рассматриваемой модели.  $R_{in}$  - расстояние от центра источника до внутренней границы слоя,  $\Delta r$  - расстояние от внутренней границы до произвольной точки внутри слоя,  $Z$  - толщина слоя.

На внутреннюю границу слоя падает излучение звезды, а также рентгеновское излучение. Для простоты предполагается, что оно образуется на поверхности звезды. Для сравнения рассматриваются два типа молодых звезд: типа Т Тельца и Ae Хербига. С учетом результатов наблюдений [21-26] рентгеновская светимость звезд принята равной  $L_x = 10^{-4} L_{star}$  - для звезд типа Т Тельца и  $10^{-5} L_{star}$  - для звезд Хербига.

С целью выяснения роли различных источников ионизации и нагрева газа, мы последовательно рассмотрели четыре модели, в которых ионизация и возбуждение осуществляются: а) только излучением звезды, б) только рентгеновскими квантами и в) комбинацией этих двух источников. Кроме того, нами была рассмотрена модель, в которой состояние ионизации и возбуждения газа контролируется только столкновительными процессами. Во

Таблица 1

#### МОДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВОГО СЛОЯ

Номер модели	$\log N_H$ , см <sup>-3</sup>	$R_{in}$ , $R_{star}$	$Z$ , см
Модель 1	12	2	$10^{10}$
Модель 2	11	5	$5 \cdot 10^{10}$
Модель 3	10	10	$10^{11}$
Модель 4	9	20	$5 \cdot 10^{11}$

всех моделях принят стандартный химический состав газа.

В табл.1 приведены значения модельных параметров. Принятые в ней комбинации параметров отражают физические условия в излучающем газе в дисковом ветре звезд Ae Хербига на разных расстояниях от области старта [27].

Излучение звезды предполагается чернотельным. Ее светимость определяется двумя параметрами: радиусом звезды  $R_{star}$  и эффективной температурой  $T_{eff}$ . Мы выбрали характерные для звезд типа Т Тельца и Ae Хербига значения светимости и  $T_{eff}$ . Параметры рентгеновского излучения также выбраны с учетом результатов рентгеновских наблюдений звезд этих типов. Параметры источников внешнего излучения представлены в табл.2.

*Таблица 2*

### ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ ВНЕШНЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Звезда	$L (L_\odot)$	$T_{eff}$ (К)	$R_{star}$ ( $R_\odot$ )	$L_{x-ray}$ (эрг/с)	$T_x$ (К)
Т Тельца	1	4000	2	$4 \cdot 10^{29}$	$10^7$
Ae Хербига	50	10000	2.3	$2 \cdot 10^{30}$	$10^7$

*3. Результаты расчетов.* С помощью пакета CLOUDY мы рассчитали состояния возбуждения и ионизации газа для указанного в табл.1 интервала модельных параметров слоя.

#### 3.1. Состояние ионизации водорода и гелия.

*3.1.1. Водород.* Ниже на рис.2-5 приведены результаты расчетов модели газового слоя, имеющего следующие параметры: концентрация атомов водорода  $N_H = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , электронная температура  $T_e = 10^4 \text{ K}$ , геометрическая толщина слоя  $Z = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}$ , расстояние до внутренней границы слоя  $R_{in} = 5R_{star}$ .

На рис.2а (слева) представлена зависимость концентрации ионов водорода  $N_{H^+}$  от расстояния до внутренней границы слоя  $\Delta r$ . Источниками внешнего излучения являются: звезда типа Т Тельца и ее рентгеновское излучение. Каждый график на рисунке соответствует одной из четырех, описанных выше, моделей. Видно, что вблизи внутренней границы слоя, в отсутствие рентгеновского излучения, водород слабо ионизован: излучения звезды типа Т Тельца недостаточно, чтобы ионизовать атомы водорода, находящиеся преимущественно на первом уровне. С продвижением в глубь слоя, непрозрачность газа для излучения звезды увеличивается, включается ионизация атомов водорода с возбужденных уровней. Этот процесс дает весомый вклад в ионизацию водородного газа в переходном слое ( $\Delta r \sim 10^6 - 10^8 \text{ см}$ ), в то время как ионизация рентгеновскими квантами из-за сильного поглощения эффективна только в тонком слое вблизи внутренней границы ( $\Delta r \leq 10^6 \text{ см}$ ). С продвижением в глубь слоя ( $\Delta r > 10^8 \text{ см}$ ), ионизация водорода определяется

электронными ударами с возбужденных уровней.

На рис.2б представлены те же зависимости, что и на рис.2а, но для звезды Ae Хербига и ее рентгеновского излучения. Видно, что в этом случае собственное излучение звезды дает существенный вклад в ионизацию водорода.

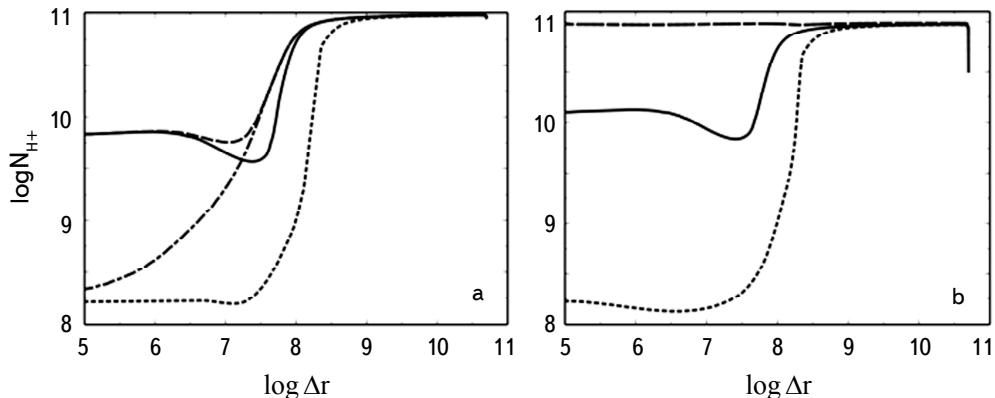


Рис.2. Зависимость концентрации ионов водорода от координаты внутри слоя  $\Delta r$  для звезды типа Т Тельца (а) и Ae Хербига (б) в моделях с разными источниками ионизации газа: излучение звезды (штрих-пунктир), рентгеновское излучение (сплошная линия), комбинированный источник (штриховая линия), только электронные удары (пунктир).

Даже вблизи внутренней границы слоя, используя только лишь звездные кванты, можно добиться почти полной ионизации водородного газа, которая сохраняется с продвижением в глубь слоя. Рентгеновская модель демонстрирует схожее с предыдущим случаем поведение. В обоих случаях, даже в отсутствие внешнего излучения, степень ионизации резко увеличивается при продвижении в глубь слоя. Этот эффект обусловлен ионизациями атомов водорода с возбужденных уровней электронными ударами и подробно описан в статье Катышевой и др. [28].

**3.1.2. Гелий.** Как отмечалось выше, триплетные уровни атомов гелия заселяются в основном рекомбинационным путем, в результате чего их населенности тесно связаны с концентрацией ионов гелия в слое. На рис.3 показаны зависимости концентрации ионов  $N_{\text{HeII}}$  от  $\Delta r$  в разных моделях ионизации газа. Видно, что рентгеновское излучение является основным источником ионизации атомов гелия, как в моделях со звездой типа Т Тельца (рис.3а), так и в моделях, включающих звезду типа Ae Хербига (рис.3б). На рис.3б, сравнение графиков комбинированной (рентген + звезда) и рентгеновской модели показывает, что излучение звезды Хербига способствует увеличению концентрации ионов HeII на больших расстояниях от границы слоя  $\Delta r$ . Этот эффект объясняется дополнительной ионизацией водорода, создаваемой излу-

чением звезды. В результате газ становится более прозрачным для рентгеновских квантов и они проникают в более глубокие слои. Ионизация атомов гелия электронным ударом при рассматриваемой электронной температуре ( $10^4$  K) не играет сколько-нибудь существенной роли (в отличие от водорода).

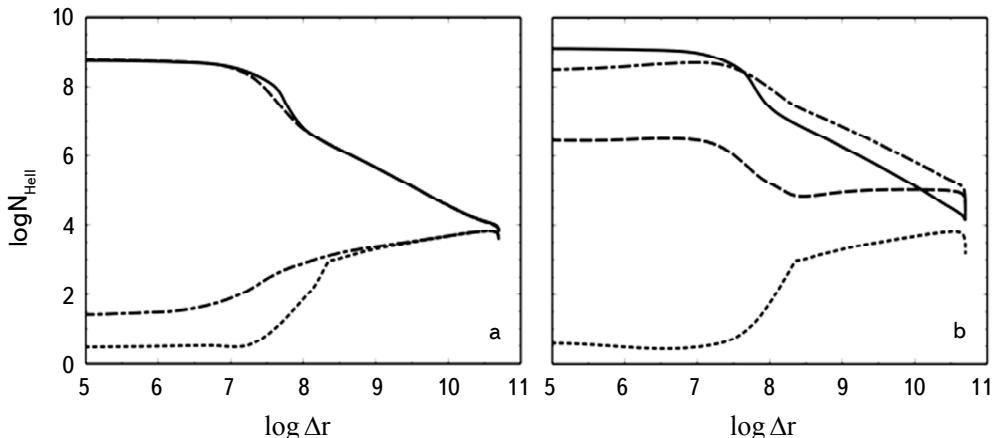


Рис.3. Зависимость концентрации ионов HeII от координаты внутри слоя  $\Delta r$  для звезды типа Т Тельца (а) и Ae Хербига (б). Излучение звезды (штрих-пунктир), рентгеновское излучение (сплошная линия), комбинированный источник (штриховая линия), электронная модель (пунктир).

Перейдем теперь к рассмотрению физических условий, влияющих на населенность нижнего уровня линии  $\text{He } 10830 \text{ \AA} - \text{N}(2^3S)$ . На рис.4 показана зависимость населенности этого уровня от  $\Delta r$ . Видно, что включение рентгеновского излучения увеличивает населенность уровня  $2^3S$  в среднем на

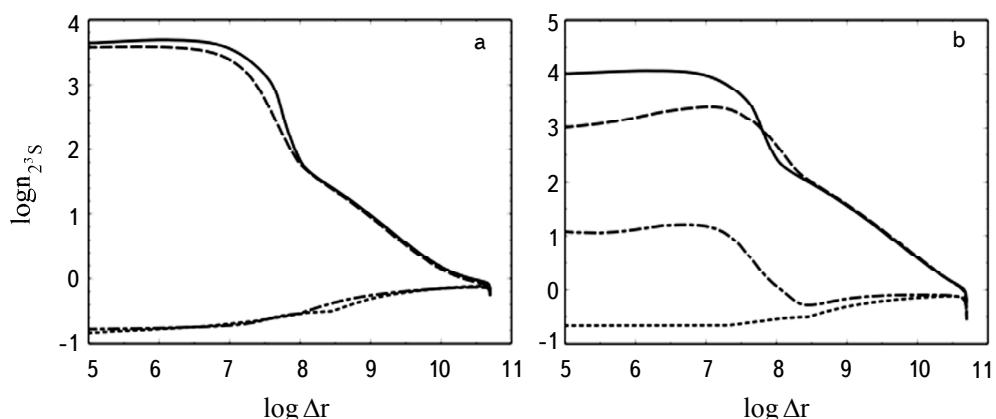


Рис.4. Зависимость населенности уровня  $2^3S$  от координаты внутри слоя  $\Delta r$  при  $T_e = 10000$  K, звезда типа Т Тельца (а) и Ae Хербига (б). Излучение звезды (штрих-пунктир), рентгеновское излучение (сплошная линия), комбинированный источник (штриховая линия), только электронные удары (пунктир).

2-3 порядка. Такая реакция вполне понятна, поскольку, как отмечалось ранее, уровень  $2^3S$  заселяется в основном при рекомбинациях Не II, и этот процесс напрямую зависит от степени ионизации Не.

Рассмотрим более детально комбинированную модель (рис.4б). Выше мы отметили, что излучение звезды Ae Хербига заметно усиливает ионизацию атомов Не внутри слоя (что обусловлено просветлением среды в результате ионизации водорода). Исходя из этого наблюдения, можно было бы предположить, что излучение звезды, таким образом, способствует увеличению населенности уровня  $2^3S$ . Однако из рис.4б видно, что это не совсем так. Вблизи внутренней границы слоя населенность уровня  $2^3S$  уменьшается под влиянием излучения звезды. Это связано с тем, что звезда, ионизуя водород, способствует не только уменьшению концентрации нейтральных атомов водорода, но и увеличению  $N_e$ . В моделируемых нами условиях, деактивация электронным ударом является основным механизмом опустошения уровня  $2^3S$ . Поэтому с увеличением  $N_e$  эффективность процесса деактивации возбужденных состояний гелия возрастает, что, в итоге, и приводит к уменьшению населенности рассматриваемого уровня.

При  $T_e \sim 10^4$  К энергия свободных электронов недостаточна для ударной ионизации гелия. По этой причине столкновительные процессы практически не участвуют в заселении уровня  $2^3S$ .

На рис.5 представлена зависимость населенности уровня  $2^3S$  от  $\Delta r$  при электронной температуре равной 15000 К. Попарное сравнение рис.4а, б с рис.5а, б показывает, что при увеличении  $T_e$  населенность уровня  $2^3S$  уменьшается в моделях, включающих источник рентгеновского излучения, и увеличивается в моделях без него. Из рис.5а следует, что в случае звезд типа

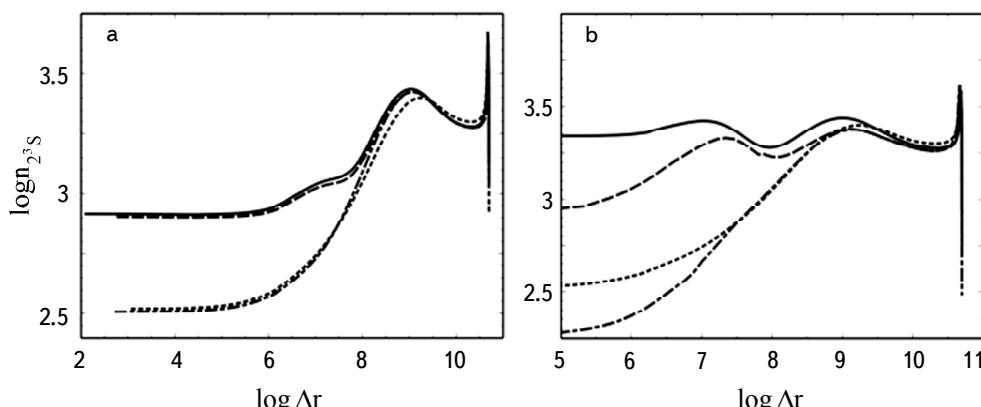


Рис.5. Зависимость населенности уровня  $2^3S$  от координаты внутри слоя  $\Delta r$  при  $T_e = 15000$  К, звезда типа Т Тельца (а) и Ae Хербига (б). Излучение звезды (штрих-пунктир), рентгеновское излучение (сплошная линия), комбинированный источник (штриховая линия), только электронные удары (пунктир).

Т Тельца при  $T_e \sim 15000$  К эффективность ударных механизмов возбуждения и ионизации гелия возрастает настолько, что ионизация рентгеновским излучением отступает на второй план. Именно по этой причине графики всех моделей на рис.5а демонстрируют схожее поведение вне зависимости от наличия и типа источника излучения.

При высокой электронной температуре ионизация гелия в окрестностях звезды типа Ae Хербига происходит за счет двух конкурирующих процессов. В моделях без рентгеновского излучения, так же как и у звезд типа Т Тельца, ионизация происходит за счет электронных ударов. В тех моделях, где рентгеновское излучение присутствует, на первый план выходит ионизация рентгеновскими квантами, а электронные удары и излучение звезды опускают уровень  $2^3S$ .

*4. Оптическая толщина в линии HeI 10830 и светимости в линии Hα.* Для объяснения наблюдаемых профилей линии HeI 10830 Å необходимо, чтобы оптическая толщина газа в частотах линии была порядка или больше единицы. При этом необходимо иметь в виду, что линия образуется в среде с градиентом скорости. Тогда как в программе CLOUDY мы работаем с неподвижным слоем. Чтобы учесть это обстоятельство необходимо, чтобы в неподвижном слое оптическая толщина в линии HeI 10830 Å была порядка или больше 10, чтобы компенсировать просветление среды в частотах линии из-за градиента скорости.

На рис.6 показаны оптические толщины в линии HeI 10830 Å, полученные для комбинированных моделей (рентген + звезда), при фиксированных модельных параметрах, находящихся в указанных ранее интервалах (табл.2).

Из графиков видно, что в комбинированных моделях, включающих звезду типа Ae Хербига (рис.6б), оптическая толщина при  $T_e \sim 12000$  К и

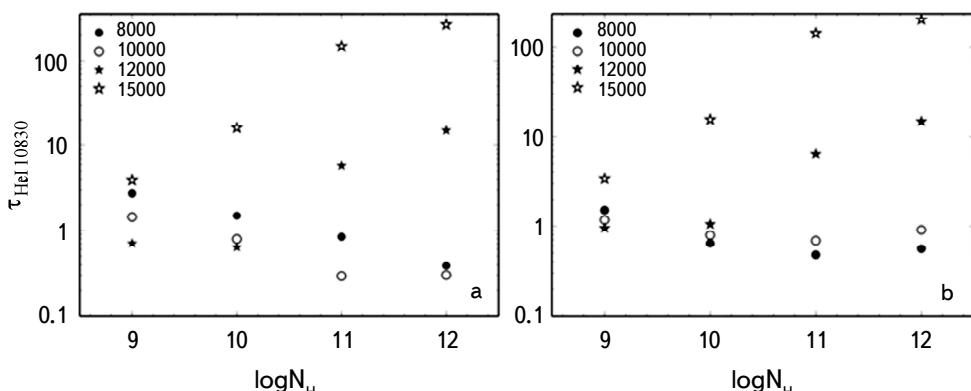


Рис.6. Оптические толщины в линии HeI 10830 Å. Комбинированные модели: звезда типа Т Тельца + рентген (а) и звезда Ae Хербига + рентген (б).

$N_H \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$  достигает значения порядка 10. Этого достаточно, чтобы при наличии градиента скорости получить линию  $\lambda 10830$  в поглощении. При более высоких температурах величина  $\tau_{\text{HeI}10830}$  может быть еще больше.

Возникает вопрос: может ли линия HeI 10830 Å в спектре звезды типа Ae Хербига возникнуть в отсутствие рентгеновского излучения? Ответ на этот вопрос можно получить из сравнения двух графиков, представленных на рис.7. На рис.7b показаны оптические толщины в моделях с рентгеновским излучением, (рис.7a) без него. Сравнение рис.7a и 7b наглядно демонстрирует, что только лишь излучения звезды типа Ae Хербига недостаточно, чтобы получить необходимую оптическую толщину при электронной температуре ветра, не превышающей 15000 К.

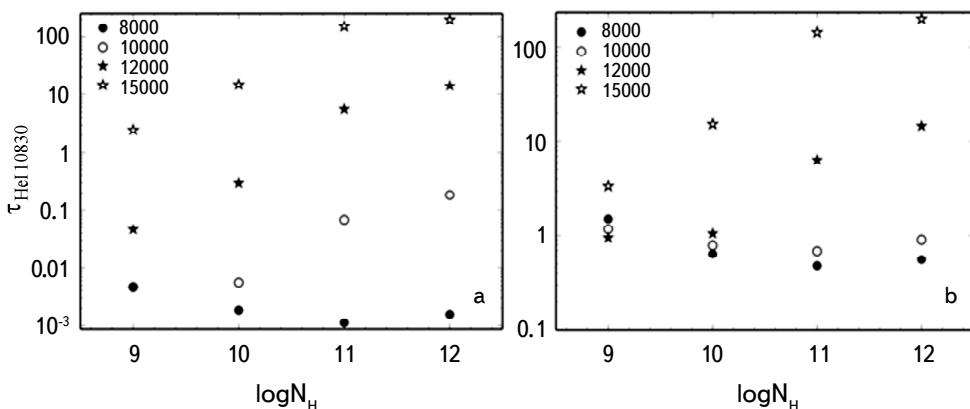


Рис.7. Оптические толщины в линии HeI 10830 Å. Звезда типа Ae Хербига (а) и звезда Ae Хербига + рентген (б).

Из рис.5 и 6 видно, что оптическая толщина в линии  $\lambda 10830$  существенно возрастает с увеличением электронной температуры. Однако высокие значения  $T_e$  могут привести к чрезмерно большим светимостям в линии H $\alpha$  [7].

Для оценки энергетики рассмотренных моделей мы рассчитали светимости выходящего из слоя излучения в линии H $\alpha$  (табл.3), предполагая, что рассматриваемый слой является сферическим. Видно, что полученные в наших моделях

Таблица 3

#### СВЕТИМОСТИ В ЛИНИИ H $\alpha$ . КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ: ЗВЕЗДА ХЕРБИГА + РЕНТГЕН

$T_e, \text{ К}$	$\tau_{\text{HeI}10830}$	$\log L_{\text{H}\alpha}, \text{ эрг/с}$
8000	0.478	32.115
10000	0.687	32.171
12000	6.39	32.199
15000	142	32.241

светимости попадают в наблюдаемый интервал  $L_{\text{H}\alpha} \sim 10^{30} - 10^{35}$  эрг/с [29] даже при  $T_e = 15000$  К.

**5. Заключение.** Представленные выше результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы:

1. Рентгеновское излучение, возникающее в окрестностях звезд Ae Хербига, является наиболее эффективным источником ионизации атомов гелия. Этот вывод перекликается с результатом, полученным Кваном и Фишером [6] для звезд типа Т Тельца.

2. Фотосферное излучение звезды типа Ae Хербига способствует увеличению концентрации ионов гелия внутри слоя, однако, негативно сказывается на населенности уровня  $2^3S$ , увеличивая эффективность процесса деактивации атомов электронным ударом.

3. В комбинированных моделях - "звезда Ae Хербига+рентген" - оптические толщины, необходимые для объяснения наблюдаемых абсорбционных профилей HeI 10830 Å, могут быть достигнуты лишь при температурах ветра 10000-15000 К.

4. При определенных условиях ( $T_e > 15000$  K) достаточно большая оптическая толщина газа в линии HeI 10830 Å может быть достигнута без участия рентгеновского излучения. Следует также отметить, что роль фотосферного излучения, как источника ионизации атомов гелия, существенно возрастает при переходе к ранним звездам Be Хербига, которые мы здесь не рассматриваем.

Автор благодарит В.П.Гринина за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке гранта Президиума РАН 12 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной".

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
С.-Петербург, e-mail: puzyrnay.tamara@gmail.com

## ON THE CONDITIONS FOR THE HeI 10830 Å LINE FORMATION IN THE DISK AND MAGNETOSPHERIC WINDS OF HERBIG Ae STARS

T.A.ERMOLAEVA

This paper focuses on the origin of the HeI 10830 Å line in disk and magnetospheric winds of Herbig Ae stars. Using the microphysics code CLOUDY,

we show that the optical depth of the gas in the HeI line 10830 Å needed in explaining the observed P Cyg profiles is reached in the disk or magnetospheric winds of Herbig Ae stars at  $T_e \geq 10000$  K. Under these conditions, X-ray emission formed on the surface and in the surroundings of a young star is the main source of ionization of helium atoms.

**Keywords:** *pre-main sequence stars: Ae Herbig stars: disk wind: magnetospheric wind: outflows*

## ЛИТЕРАТУРА

1. S. Edwards, W. Fischer, L. Hillenbrand et al., *Astrophys. J.*, **646**, 319, 2006.
2. A.K. Dupree, N.S. Brickhouse, S.R. Cranmer et al., *Astrophys. J.*, **789**, 17, 2014.
3. P.W. Cauley, C.M. Johns-Krull, *Astrophys. J.*, **797**, 21, 2014.
4. M. Reiter, N. Calvet et al., *Astrophys. J.*, **852**, 12, 2018.
5. W. Fischer, J. Kwan, S. Edwards et al., *Astrophys. J.*, **687**, 1117, 2008.
6. J. Kwan, W. Fischer, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **411**, 2383, 2011.
7. R. Kurosawa, M.M. Romanova, T.J. Harries, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **416**, 2623, 2011.
8. P.C. Schneider, H.M. Günther, J. Robrade et al., *Astron. Astrophys.*, **618**, 16, 2018.
9. T. Montmerle, *Advances in Space Research*, **32**, 1067, 2003.
10. S. Hubrig, I. Ilyin, M. Schöller et al., *Astron. Nachr.*, **334**, 1093, 2013.
11. S. Bagnulo, L. Fossati, J.D. Landstreet et al., *Astron. Astrophys.*, **583**, 37, 2015.
12. G.J. Ferland, R.L. Porter, P.A.M. Van Hoof et al., *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, **49**, 137, 2013.
13. V.P. Grinin, A.S. Mitskevich, *Astrophys. Space Sci.*, **185**, 107, 1991.
14. A.S. Mitskevich, A. Natta, V.P. Grinin, *APS Conference Ser.*, **40**, 205, 1993.
15. L.M. Osokinova, B. Kubatova, W.R. Hamann, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **183**, 100, 2016.
16. P. Safier, *Astrophys. J.*, **408**, 115, 1993.
17. P.J.V. Garcia, J. Ferreira, S. Cabrit et al., *Astron. Astrophys.*, **377**, 589, 2001.
18. F. Shu, J. Najita, E. Ostriker et al., *Astrophys. J.*, **429**, 781, 1994.
19. S.R. Cranmer, *Astrophys. J.*, **689**, 316, 2008.
20. M.M. Romanova, G.V. Ustyugova, A.V. Koldoba et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **399**, 1802, 2009.
21. E.D. Feigelson, G.P. Garmire, *Astrophys. J.*, **572**, 335, 2002.
22. A. Telleschi, M. Güdel, K.R. Briggs et al., *Astron. Astrophys.*, **468**, 443, 2007.
23. H. Zinnecker, Th. Preibisch, *Astron. Astrophys.*, **292**, 152, 1994.
24. K. Hamaguchi, S. Yamauchi, K. Koyama, *Astrophys. J.*, **618**, 360, 2005.

25. *D.A.Swartz, J.J.Drake, R.F.Elsner et al.*, *Astrophys. J.*, **628**, 811, 2005.
26. *B.Stelzer, G.Micela, K.Hamaguchi et al.*, *Astron. Astrophys.*, **457**, 223, 2006.
27. *В.П.Гринин, Л.В.Тамбовцева*, *Астрон. ж.*, **88**, 766, 2003.
28. *N.A.Katysheva, T.A.Ermolaeva V.P.Grinin*, *Astrophysics*, **61**, 286, 2018.
29. *J.R.Fairlamb, R.D.Oudmaijer, I.Mendigutia et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **453**, 976, 2015.