

УДК 535.343.9

Исследование оптических свойств атмосфер горячих экзопланет численным моделированием транзитных поглощений в линии HeI 10830 Å

М.С. Руменских[✉], И.Ф. Шайхисламов*

*Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 156*

Поступила в редакцию 05.09.2023;
после доработки 05.10.2023;
принята к печати 01.11.2023

Транзитные наблюдения экзопланет позволяют измерять такие величины, как температура и относительное содержание различных элементов в их атмосферах. Для измерения параметров атмосфер экзопланет методом транзитного поглощения широко применяется инфракрасная линия метастабильного гелия HeI 10830 Å. Спектры излучения (спектральная плотность мощности) звезд существенно влияют на физико-химические параметры верхних слоев атмосфер. Для звезд различных спектральных классов методом численного моделирования исследуются особенности транзитных поглощений в линии HeI 10830 Å. Результаты демонстрируют ключевую роль спектра звезды в формировании верхней атмосферы и амплитуде транзитных поглощений экзопланет в линии HeI 10830 Å.

Ключевые слова: оптика атмосфер, трансмиссионная спектроскопия, экзопланеты, численное моделирование, метастабильный гелий; atmospheric optics, transmission spectroscopy, exoplanet, numerical simulation, metastable helium.

Введение

Оптические методы открывают широкие возможности для изучения особенностей строения, состава и свойств атмосфер экзопланет. Обнаруженные за пределами Солнечной системы планеты исчисляются тысячами. Их широкий возрастной ряд позволит изучить эволюцию планет Солнечной системы и узнать больше об их формировании. Кроме того, открываются новые возможности в исследовании процессов нагрева и охлаждения атмосфер и связанных с этим физико-химических причин изменения климата на примере землеподобных экзопланет.

Как показывают теоретические исследования [1–3] и данные наблюдений, температура атмосферы существенно зависит как от ее состава, так и от излучения родительской звезды. В работе [1] было проведено численное моделирование верхней атмосферы Марса, Земли и Венеры в условиях раннего Солнца. Ранняя Земля, подвергаясь интенсивному XUV-излучению, могла иметь температуру верхней атмосферы 1000 К, а ее вещество — претерпевать сильный гидродинамический, диффузионный и джинсовский отток, зависящий в значительной

степени от содержания CO₂. Согласно результатам моделирования молекулы CO₂ могут способствовать существенному охлаждению атмосферы, а потому их достаточное содержание могло предотвратить полную потерю атмосферы Земли в условиях раннего Солнца. Авторы работы [2], также посвященной численному моделированию истечения атмосферы ранней Земли, пришли к выводу, что землеподобные планеты могут удерживать атмосферы давлением ~1 бар в условиях высокого уровня XUV-излучения и повышенной звездной активности за счет охлаждения излучением на длинах волн $\lambda = 5577$ и 6300 Å при переходах между уровнями одной и той же электронной конфигурации $2p^4 3P$ атомарного кислорода. В данных работах показаны отличительные особенности воздействия раннего Солнца на атмосферу Земли, а также необходимость дальнейших исследований процессов охлаждения и нагрева.

Линия метастабильного гелия (HeI, $\lambda = 10830$ Å, триплетный переход $2^3S \rightarrow 2^3P$), использование которой для определения свойств атмосфер «горячих юпитеров» было предложено в [4], не претерпевает значительных искажений при прохождении через межзвездную среду или атмосферу Земли, что делает ее востребованной при зондировании далеких космических объектов. На сегодняшний день проведены измерения транзитных поглощений примерно 40 горячих экзопланет различных масс,

* Марина Сергеевна Руменских (marina_rumenskikh@mail.ru); Илдар Фаритович Шайхисламов (ildars@ngs.ru).

размеров, вращающихся вокруг звезд разного возраста и разных спектральных классов. Для половины из них зарегистрировано поглощение, превышающее уровень шума измерений (например, в работах [5–10]). Такое разнообразие позволяет использовать транзитные поглощения в линии HeI 10830 Å для анализа свойств планетарных систем в контексте эволюции состава атмосфер.

Впервые моделирование метастабильного гелия в экзопланетных атмосферах было проведено в работе [11]. В [12] проанализировано влияние спектрального класса звезды на транзитные поглощения в данной линии. Выводы этих работ базируются на расчетах посредством одномерной упрощенной модели с использованием аналитического решения Паркера для планетарного течения. Ряд физико-химических эффектов, которые существенно влияют на структуру атмосферы горячих экзопланет, в модели [12] не принимается во внимание. Таким образом, в силу большого количества новых данных более тщательный анализ того, как спектр звезды влияет на транзитные поглощения, в частности в линии HeI 10830 Å, является актуальным.

Другой параметр, который значительно влияет на поглощение в каждом конкретном случае, — радиус планеты. В настоящем исследовании размеры были специально взяты одинаковыми для всех случаев. Имеются также примеры влияния других специфических факторов: радиационного давления (Wasp107b [13] и GJ436b [14]) и звездного ветра (GJ3470b [15]). В частности, в численных экспериментах для экзопланеты GJ436b с реальными параметрами совокупное негативное действие малого размера планеты и существенного радиационного ускорения привело к уменьшению глубины поглощения в линии 10830 Å на порядок величины [14].

Цель работы — анализ влияния спектра излучения (спектральной плотности мощности) родительской звезды на транзитные поглощения в линии метастабильного гелия в верхних атмосферах горячих экзопланет. Для этого проведен ряд модельных расчетов, в которых изменяется только спектральная плотность мощности родительской звезды. Прочие параметры — температура на поверхности планеты, массы и радиусы звезды и планеты, орбитальное расстояние, состав атмосферы, скорость и плотность звездного ветра — остаются неизменными.

Материалы и методы исследования

Модель, используемая для расчета распределения вещества атмосфер горячих экзопланет, основано на численном решении системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии в трехмерной сферической геометрии с учетом сил гравитации и Кориолиса, ряда реакций плазмифотохимии, а также радиационного давления звездного излучения, действующего на атомы водорода и гелия. Численная модель развивалась поэтапно, наиболее важные части описаны в следующих статьях: слабые газодинамические уравнения и применимость гидродинамического подхода, а также процессы, связанные с генерацией планетарного ветра,

столкновительным взаимодействием частиц, — в [16] и в приложении [17]; детали трехмерного кода и моделирования звездного плазменного ветра — в [18–20]; методики расчета транзитного поглощения в линиях — в [20]; моделирование населенности и поглощения метастабильного гелия — в [15].

Поглощающее в ИК-линии на $\lambda = 10830$ Å вещество — атомы гелия, находящиеся на метастабильном 2^3S уровне, — рассматриваются в модели как отдельная жидкость со своей скоростью и температурой, определяемыми теми частицами, из которых метастабильные атомы гелия происходят, т.е. He^+ в случае рекомбинации или $\text{HeI}(1^1S)$ при возбуждении из основного состояния. Реакции, вовлеченные в процессы заселения и опустошения триплетного уровня $\text{HeI}(2^3S)$, аналогичны реакциям, рассмотренным в [11] и описанным в [17] — это электронные столкновения, автоионизационное де-возбуждение в столкновениях с атомами и молекулами водорода, фотоионизация, радиационный распад. Схема уровней и каналы реакций показаны на рис. 1.

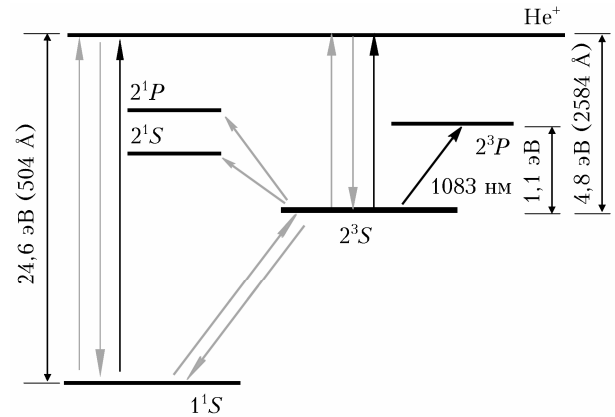


Рис. 1. Структура энергетических уровней гелия, задействованных в заселенности метастабильного уровня HeI 10830 Å, с обозначениями переходов: темные стрелки соответствуют переходам, индуцированным фотонами, а светлые — столкновениям с частицами

Результатом моделирования является стационарное трехмерное распределение концентраций, скоростей и температур разных составляющих верхних слоев атмосфер экзопланет. Основные параметры моделирования представлены в табл. 1. Поглощение

Таблица 1

Параметры численного моделирования

T_{base} , К	P_{base} , бар	M'_{sw} , 10^{10} г/с	$\frac{\text{He}}{\text{H}}$	R_p, R_J	$R_{\text{st}}, R_{\odot}$	M_p, M_J	$M_{\text{st}}, M_{\odot}$
1500	0,05	100	0,05	1,38	1,2	0,69	1,148

Примечание. Радиус и масса для планеты (R_p, M_p) выражены в значениях Юпитера, а звезды ($R_{\text{st}}, M_{\text{st}}$) — в солнечных значениях; T_{base} и P_{base} — температура и давление, а He/H — содержание атомов гелия относительно атомов водорода, которые фиксируются на внутренней границе численной области; M'_{sw} — скорость потери массы звездного вещества; R_J — радиус Юпитера; $R_{\odot}$ — радиус Солнца; M_J — масса Юпитера; $M_{\odot}$ — масса Солнца.

рассчитывается с использованием этих распределений способом, описанным в [15]. Заселенности трех подуровней 2^3P принимаются в соответствии с их статвесами. Для прямого сравнения с наблюдениями синтетические спектральные профили усредняются между второй и третьей контактными транзитными точками с удалением доплеровского смещения, связанного с вращением планеты.

Для расчета фотоионизации и нагрева атмосферного водорода и гелия фотоэлектронами, а также поглощения излучения звезды в атмосфере планеты были использованы спектры звезд (SED — spectral energy distribution) различных спектральных классов (табл. 2). Кванты XUV-диапазона (X-ray & ultraviolet, 1–91 нм) полностью поглощаются межзвездной средой и недоступны для измерения, а NUV-диапазона (near ultraviolet, 120–240 нм) измерены только для ближайших звезд. Достаточно обширная база данных имеется только для диапазона жесткого рентгеновского излучения (X-ray, космические телескопы XMM-Newton и Chandra) и ближнего УФ-спектра (NUV, $912 < \lambda < 3000 \text{ \AA}$). По этой причине SED различных звезд в XUV-диапазоне ($10 < \lambda < 912 \text{ \AA}$) является синтетическим и рассчитывается с помощью различных моделей: хромосферно-корональной для звезд поздних спектральных классов, таких как GJ436, GJ3470, HD189733 [21], Wasp80 [22], и не-ЛТР модели звездной атмосферы без хромосферы для звезды Kelt9 [23].

Отметим, что интегральное излучение в XUV-диапазоне было взято одинаковым для всех звезд и равным $1 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$ на 1 а.е. с сохранением профиля излучения, соответствующего звездам, в данном спектральном диапазоне. Такой подход позволяет проанализировать влияние профиля излучения звезды на заселенность уровня метастабильного гелия в условиях, когда фотоионизация атомов водорода, обусловленная потоком излучения в области XUV, протекает в равных условиях для всех модельных случаев. Кроме того, поток излучения в области XUV в реальных звездных системах изменяется в зависимости от фазы активности звезды, потому такое допущение является применимым для моделирования различных систем. При этом еще один важный спектральный поддиапазон,

соответствующий фотоионизации гелия $F_{\text{XUV_hard}}$, $\lambda < 50,4 \text{ нм}$, в моделировании брался в соответствии со спектром звезды, и содержание энергии в этом поддиапазоне значительно различалось для разных звезд. Влияние интегрального потока F_{XUV} ($\lambda < 90,2 \text{ нм}$) изучалось ранее в ряде работ [14, 15, 18–20, 22, 23].

В табл. 2 приведены спектры звезд, для которых были выполнены расчеты, с соответствующими параметрами интегрального потока энергии в XUV-или NUV-диапазонах. Для целей настоящей работы спектральный интервал NUV ограничен порогом фотоионизации метастабильного атома гелия ($\lambda < 258,4 \text{ нм}$).

Рис. 2, 3 демонстрируют используемые спектры и их основные различия. Например, отметим кардинальное отличие спектров звезд класса M и A. Для холодных карликов характерен умеренный поток низкоэнергетичных квантов при очень большом потоке высокоэнергетичных. У горячих молодых звезд практически отсутствует XUV-спектр при экстремально большом потоке излучения в NUV-области.

Результаты и обсуждение

Результат 3D-моделирования верхней атмосферы горячих экзопланет показаны на рис. 4. Представлено распределение протонов в экваториальной плоскости всей расчетной области для звезды со спектром GJ436. Можно наблюдать сложную геометрию растекания планетарного вещества в потоке звездной плазмы.

Поглощение в линии метастабильного гелия обусловлено рядом фотохимических и столкновительных процессов, влияющих на заселенность уровня HeI 10830 Å. Определение относительной значимости таких процессов возможно при сопоставлении скоростей протекания соответствующих им реакций, которые, в свою очередь, зависят от концентраций атомов и ионов гелия, концентрации и температуры электронов. На рис. 5 представлены одномерные пространственные профили этих величин вдоль оси планета–звезда. Характерная концентрация электронов находится в диапазоне 10^5 – 10^8 см^{-3} , температура — несколько тысяч Кельвинов.

Таблица 2

Основные входные параметры моделирования и рассчитанные параметры планетарной системы и транзитных поглощений

Спектр звезды	Спектр. класс	$F_{\text{XUV_hard}}$, эрг · см ⁻² · с ⁻¹	F_{NUV} , эрг · см ⁻² · с ⁻¹	M'_{pw} , 10 ¹⁰ г/с	FWHM, км/с	Amp, %
GJ436	M2,5V	0,95	0,4	3,2	13,5	3,7
GJ3470	M1,5	0,38	4,6	2,1	15,7	1,46
HD189733	K1,5	0,66	131	2,2	13,8	2,4
HD209458	G0V	0,77	$1,1 \cdot 10^3$	2,6	10,5	0,3
Wasp80	K7V	0,77	61,5	3,4	16,5	1,6
Kelt9	A0	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^7$	0,2	—	10^{-10}

Примечание. M'_{pw} — скорость истечения планетарного вещества; FWHM — ширина линии поглощения на полувысоте в доплеровских единицах скорости; Amp — максимальное значение поглощения в линии HeI 10830 Å.

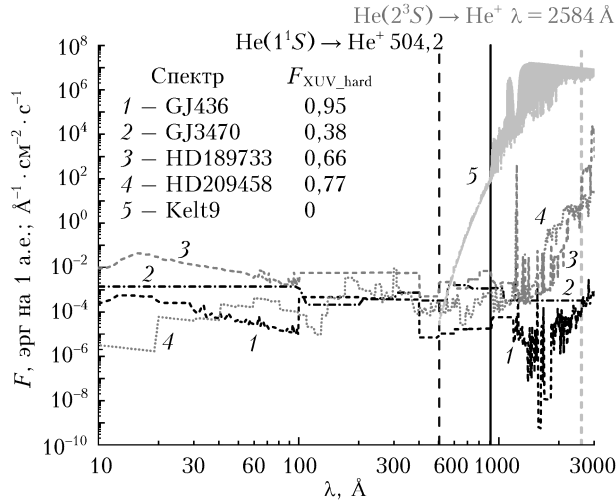


Рис. 2. Спектры излучения звезд различных классов на $\lambda = 10 \div 3000 \text{ \AA}$, заимствованные из статей [18] (GJ436; GJ3470; HD189733; HD209458) и [20] (Kelt9). Вертикальными линиями обозначены энергетические границы фотоионизации гелия из основного состояния (серая штриховая линия) и с метастабильного уровня (черная штриховая линия), а также водорода из основного состояния (черная сплошная линия)

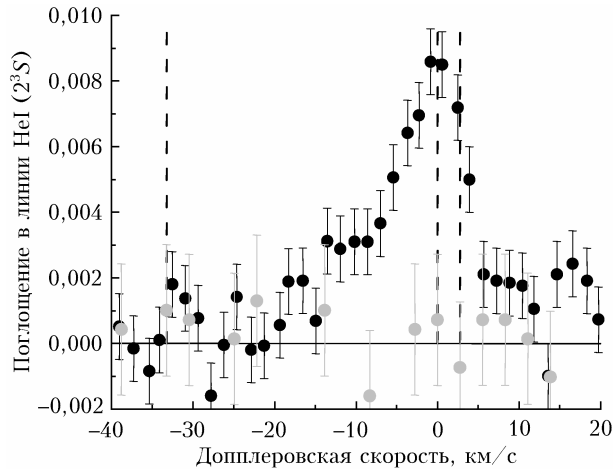


Рис. 3. Примеры данных наблюдений транзитных поглощений в линии 1083 нм «горячих юпитеров» HD209458b (черные точки – данные [5]) и Kelt9b (серые точки – [10])

Соответствующие скорости протекания реакций показаны на рис. 6 для спектра звезды GJ436, в случае которой пиковое значение рассчитанного поглощения максимально. Отметим, что основным заселяющим метастабильный уровень процессом является рекомбинация ионов гелия со свободными электронами атмосферы (реакция 6 на рис. 6, полужирная черная линия). Этот процесс напрямую зависит от количества ионов He^+ в атмосфере, которые образуются преимущественно за счет фотоионизации $\text{HeI}(1^1S)$ излучением звезды в диапазоне $\lambda \leq 50,4 \text{ нм}$. В силу экспоненциального спада концентрации частиц в поле гравитации планеты количество атомов $\text{HeI}(2^3S)$ становится пренебрежимо малым на расстояниях более $\sim 3R_p$. Это обуславливает относительно малую область атмосферы

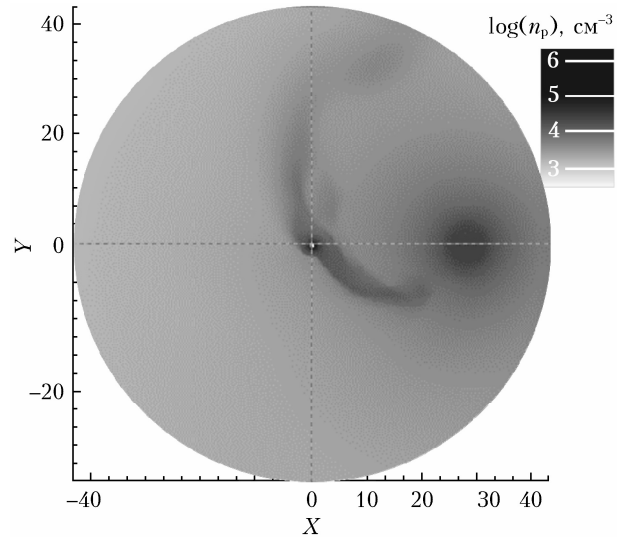


Рис. 4. Двумерное распределение концентрации протонов в экваториальной плоскости. Планета расположена в центре координат и движется по часовой стрелке вокруг звезды, которая находится слева за пределами показанной области на расстоянии $X = 75R_p$. Здесь и далее расстояния выражены в радиусах планеты

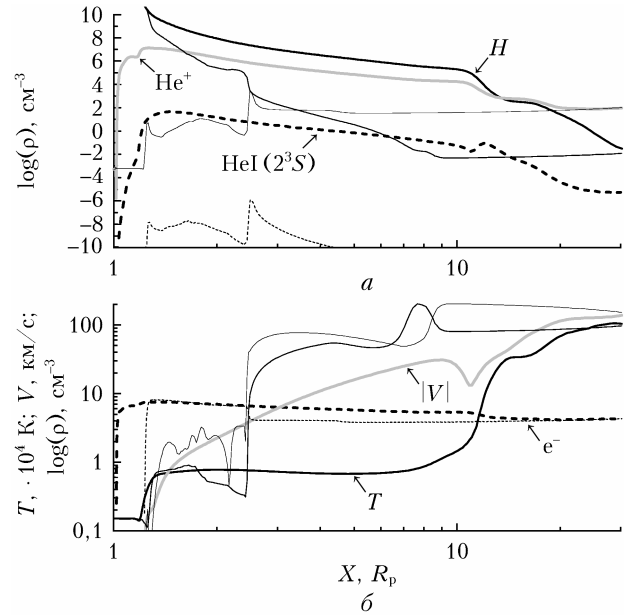


Рис. 5. Одномерные распределения: основных компонент атмосферы, рассчитанные для одинаковых планет со спектром звезды GJ436 (полужирные линии) и Kelt9 (тонкие линии) (а); концентрации электронов, температура и скорости атомов $\text{HeI}(2^3S)$ (б)

планеты, где происходит поглощение на $\lambda = 10830 \text{ \AA}$. Тем не менее эта область охватывает температурный максимум и слой атмосферы максимального поглощения XUV-излучения и формирования планетарного ветра. По этой причине поглощение в линии $\text{HeI}(2^3S)$ дает ценную информацию о параметрах верхней атмосферы и термосферы горячих экзопланет.

На рис. 7 показано распределение поглощения по диску звезды, как это может видеть удаленный

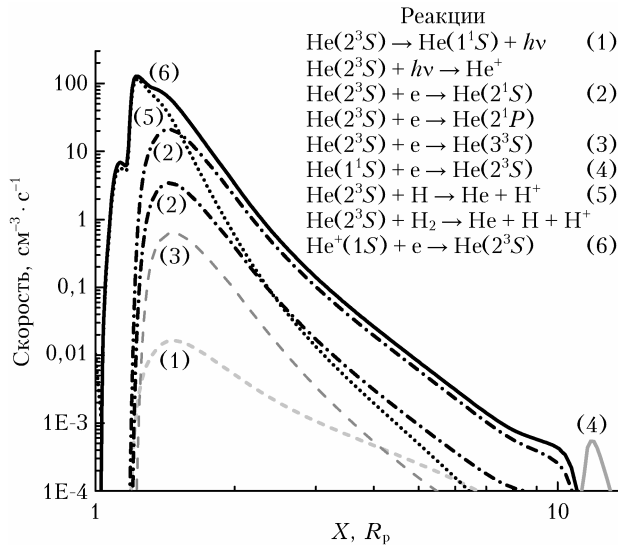


Рис. 6. Скорости реакций заселения (черная и темно-серая сплошные кривые) и опустошения (пунктирная, штриховая и штрихпунктирная кривые) метастабильного уровня гелия, рассчитанные со спектром звезды GJ436

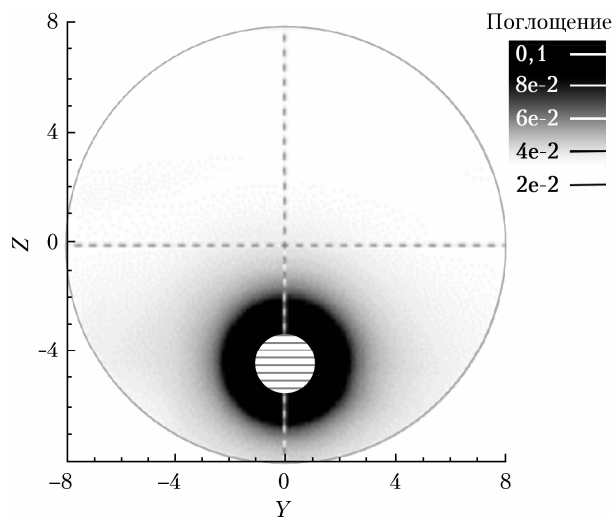


Рис. 7. Распределение глубины поглощения в линии HeI 10830 Å по диску звезды, смоделированные со спектром звезды GJ436; [-9, 9] км/с

наблюдатель, в момент середины транзита. Отметим, что планета, показанная серым кружком, смещена от центра звезды по вертикали в силу наклона плоскости орбиты относительно Земли. Поскольку амплитуда поглощения много меньше единицы, то показанная величина близка к оптической толщине атмосферы в линии 10830 Å. Очевидно, что геометрия и глубина поглощения определяются тем, насколько «раздута» верхняя атмосфера планеты за счет ее нагрева излучением звезды. Протяженность верхней атмосферы до $\sim 3R_p$ и более, как в данном примере, подтверждается поглощением в линии 10830 Å для ряда экзопланет. Для сравнения укажем, что такой слой у Земли составляет менее $0,1R_p$. Отметим также, что область поглощения в линии метастабильного гелия обычно располагается доста-

точно далеко от области взаимодействия со звездным ветром, где происходит столкновение планетарного и звездного вещества, так что звездный ветер, за редким исключением, не влияет на рассматриваемые процессы.

Основным драйвером планетарного истечения и фотохимических процессов, которые существенно влияют на распределение поглощающего вещества в атмосфере планеты, является звездное излучение, и следует ожидать, что его спектральное распределение (SED) будет обуславливать эффекты поглощения в линиях различных элементов атмосферы. В частности, заселение метастабильного уровня HeI(2^3S) определяется рекомбинацией ионов гелия и электронов, которые образуются в процессе фотоионизации атомов гелия и водорода. На опустошение уровня HeI(2^3S) также прямо влияет фотоионизация. Модельные расчеты транзитных поглощений в линии HeI(2^3S), проведенные при сохранении всех морфологических характеристик звезды и планеты с одинаковым составом атмосферы, но с излучением родительских звезд различных спектральных классов, подтвердили это предположение.

Согласно результатам численного моделирования звезды типа М-карликов (GJ436) или прочих поздних классов (G, K) дают наибольшее поглощение в линии HeI(2^3S) (рис. 8). Звезда класса A (Kelt9) показала пренебрежимо малое поглощение. Наблюдения в линии метастабильного гелия также отражают эту тенденцию: транзит планеты Kelt9b в линии метастабильного гелия не был обнаружен, а планета HD209458b показала хорошо различимый транзит (см. рис. 3).

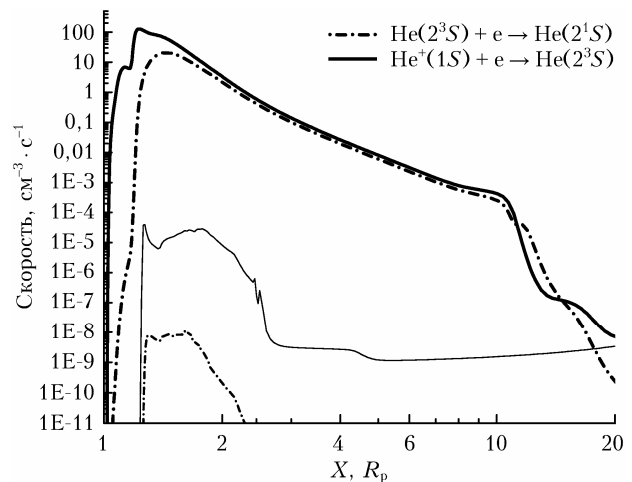


Рис. 8. Рассчитанные скорости реакций заселения (сплошные кривые) и опустошения (штрихпунктирные кривые) метастабильного уровня гелия для экзопланет со звездными спектрами Kelt9 (полужирные кривые) и GJ436 (тонкие кривые)

Для более подробного сравнения на рис. 9 приведены скорости основных процессов, влияющих на заселенность уровня HeI(2^3S), для спектров разных планет, в том числе GJ436 и Kelt9. Отличие в скоростях реакций на порядки приводит к выводу, что основная причина отсутствия поглощения в случае

моделирования со спектром Kelt9 состоит в малом количестве ионов He^+ в атмосфере (что также подтверждает рис. 5), обусловленном аномально низким потоком излучения звезды в диапазоне $\lambda \leq 50,4$ нм (см. рис. 2, от 1 до 50,4 нм).

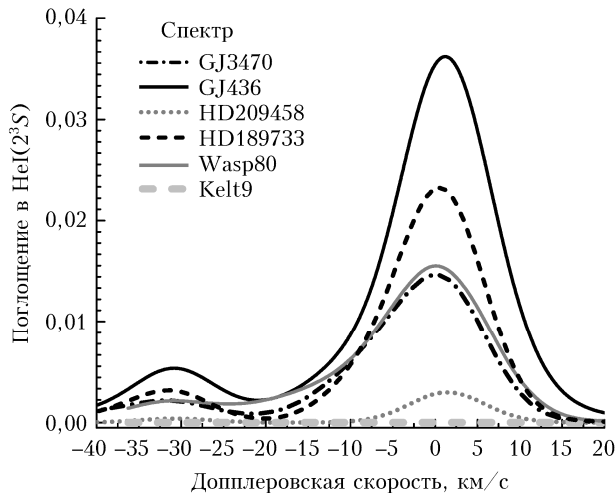


Рис. 9. Модельные профили поглощения в линии $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ в доплеровских единицах скорости в верхней атмосфере экзопланеты HD209458b, рассчитанные с различными спектрами излучения родительских звезд

Еще одной существенной особенностью спектра излучения Kelt9 является наиболее сильный, по сравнению с другими рассматриваемыми звездами, поток излучения в диапазоне $\lambda < 258,4$ нм, за счет которого происходят фотоионизация и опустошение уровня метастабильного гелия. Это дополнительно уменьшает поглощение излучения звезды в линии 1083 нм.

Заключение

Глобальное трехмерное численное моделирование транзитных поглощений верхних атмосфер горячих экзопланет в линии $10830 \text{ \AA}$ метастабильного гелия с учетом реакций водородно-гелиевой плазма-фотохимии продемонстрировало определяющую роль спектральных характеристик звезды по сравнению с гидродинамическими эффектами, обусловленными гравитационными потенциалами звезды и планеты, а также давлением и температурой на поверхности планеты. Особенно существенно влияние спектра излучения в случае звезд ранних спектральных классов, которые характеризуются низким потоком излучения в области $\lambda \leq 50,4$ нм, поскольку именно этот интервал обуславливает наличие ионов гелия. Глубина поглощения в линии метастабильного гелия у разных экзопланет может сильно варьироваться, более чем на порядок величины, только за счет спектральных особенностей родительской звезды. Это также находит отражение в имеющейся статистике глубин транзита в линии $10830 \text{ \AA}$ [21]: измерения показывают значительный разброс величины — от ~5% и до пороговой чувствительности современных инструментов, которая составляет примерно 0,5%.

Отметим, что измерение поглощения в линии $\text{He I}(2^3S)$ вместе с численным моделированием верхней атмосферы является в настоящее время единственным методом оценки содержания гелия в атмосферах планет. Статистика имеющихся данных показывает относительное содержание гелия в атмосфере планеты $\text{He}/\text{H} = 0,1$ и менее, что близко к его значению в фотосфере Солнца и не противоречит существующим теориям эволюции планет и атмосфер. При этом значительное количество экзопланет показывает относительное содержание гелия порядка 0,01.

Финансирование. М.С. Руменских благодарит за поддержку работы РФФИ (грант № 23-72-10060). И.Ф. Шайхисламов выражает благодарность программе ЭЛАГ НЦФМ «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика».

Список литературы

1. Kulikov Y.N., Lammer H., Lichtenegger H.I., Penz T., Breuer D., Spohn T., Lundin R., Biernat H.K. A comparative study of the influence of the active young Sun on the early atmospheres of Earth, Venus, and Mars // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 129. P. 207–243.
2. Nakayama A., Ikoma M., Terada N. Survival of terrestrial $\text{N}_2\text{--O}_2$ atmospheres in violent XUV environments through efficient atomic line radiative cooling // *Astrophys. J.* 2022. V. 937. P. 72–89.
3. Erkaev N.V., Lammer H., Odert P., Kulikov Y.N., Kislyakova K.G., Khodachenko M.L., Güdel M., Hansmeier A., Biernat H. XUV-exposed, non-hydrostatic hydrogen-rich upper atmospheres of terrestrial planets. Part I: Atmospheric expansion and thermal escape // *Astrobiology.* 2013. V. 13. P. 1011–1029.
4. Seager S.V., Sasselov D.D. Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits // *Astrophys. J.* 2000. V. 537. P. 916–921.
5. Alonso-Floriano F.J., Snellen I.A., Czesla S., Bauer F.F., Salz M., Lampyn M., Lara L.M., Nagel E., López-Puertas M., Nortmann L., Sánchez-López A., Sanz-Forcada J., Caballero J.A., Reiners A., Ribas I., Quirrenbach A., Amado P.J., Aceituno J., Anglada-Escudé G., Béjar V.J.S., Brinkmüller M., Hatzes A.P., Henning Th., Kaminski A., Kürster M., Labarga F., Montes D., Pallé E., Schmitt J.H.M.M., Zapatero Osorio M.R. $\text{He I } \lambda 10830 \text{ \AA}$ in the transmission spectrum of HD209458 b // *Astron. Astrophys.* 2019. V. 629. P. 110–117.
6. Spake J.J., Sing D.K., Evans T.M., Oklopčić A., Bourrier V., Kreidberg L., Rackham B.V., Irwin J., Ehrenreich D., Wyttenbach A., Wakeford H.R., Zhou Y., Chubb K.L., Nikolov N., Goyal J., Henry G.W., Williams M.H., Blumenthal S., Anderson D., Hellier C., Charbonneau D., Udry S., Madhusudhan N. Helium in the eroding atmosphere of an exoplanet // *Nature.* 2018. V. 557. P. 68–70.
7. Salz M., Czesla S., Schneider P.C., Nagel E., Schmitt J.H.M.M., Nortmann L., Alonso-Floriano F.J., López-Puertas M., Lampyn M., Bauer F.F., Snellen I.A.G., Pallé E., Caballero J.A., Yan F., Chen G., Sanz-Forcada J., Amado P.J., Quirrenbach A., Ribas I., Reiners A., Béjar V.J.S., Casasayas-Barris N., Cortés-Contreras M., Dreizler S., Guenther E.W., Henning T., Jeffers S.V., Kaminski A., Kürster M., Lafarga M., Lara L.M., Molaverdikhani K., Montes D., Morales J.C.,

- Sánchez-López A., Seifert W., Zapatero Osorio M.R., Zechmeister M. Detection of He I λ 10830 Å absorption on HD189733b with CARMENES high-resolution transmission spectroscopy // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 620. P. 97–100.
8. Guilluy G., Andretta V., Borsa F., Sozzetti A., Covino E., Bourrier V., Fossati L., Bonomo A.S., Esposito M., Giampapa M.S., Harutyunyan A., Rainer M., Brogi M., Bruno G., Claudi R., Frustagli G., Lanza A.F., Mancini L., Pino L., Poretti E., Scandariato G., Affer L., Baffa C., Baruffolo A., Benatti S., Biazzo K., Bignamini A., Boschini W., Carleo I., Cecconi M., Cosentino R., Damasso M., Desidera M., Falcini G., Martinez Fiorenzano A.F., Ghedina A., González-Álvarez E., Guerra J., Hernandez N., Leto G., Maggio A., Malavolta L., Maldonado J., Micela G., Molinari E., Nascimbeni V., Pagano I., Pedani M., Piotto G., Reiners A. The GAPS programme at TNG-XXII. The GIARPS view of the extended helium atmosphere of HD 189733 b accounting for stellar activity // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 639. P. 49–64.
 9. Ninan J.P., Stefansson G., Mahadevan S., Bender C., Robertson P., Ramsey L., Terrien R., Wright J., Didams S.A., Kanodia Sh., Cochran W., Endl M., Ford E.B., Fredrick C., Halverson S., Hearty F., Jennings J., Kaplan K., Lubar E., Metcalf A.J., Monson A., Nitroy C., Roy A., Schwab C. Evidence for He I 10830 Å absorption during the transit of a warm neptune around the M-dwarf GJ 3470 with the habitable-zone planet finder // *Astrophys. J.* 2020. V. 894. P. 97–106.
 10. Nortmann L., Pallé E., Salz M., Sanz-Forcada J., Nagel E., Alonso-Floriano F.J., Czesla S., Yan F., Chen G., Snellen I.A.G., Zechmeister M., Schmitt J.H.M.M., López-Puertas M., Casasayas-Barris N., Bauer A.F., Amado P.J., Caballero J.A., Dreizler S., Henning T., Lampón M., Montes D., Molaverdikhani K., Quirrenbach A., Reiners A., Ribas I., Sánchez-López A., Christian Schneider P., Zapatero Osorio M.R. Ground-based detection of an extended helium atmosphere in the Saturn-mass exoplanet WASP-69b // *Science*. 2018. V. 362. P. 1388.
 11. Oklopčić A., Hirata C.M. A new window into escaping exoplanet atmospheres: 10830 Å line of helium // *Astrophys. J. L.* 2018. V. 855. P. 11–18.
 12. Oklopčić A. Helium absorption at 1083 nm from extended exoplanet atmospheres: Dependence on stellar radiation // *Astrophys. J.* 2019. V. 881. P. 133–141.
 13. Wang L., Dai F. Metastable helium absorptions with 3D hydrodynamics and self-consistent photochemistry. II. WASP-107b, stellar wind, radiation pressure, and shear instability // *Astrophys. J.* 2021. V. 914. P. 99–113.
 14. Rumenskikh M.S., Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Miroshnichenko I.B., Berezutsky A.G., Shepin A.V., Dwivedi N.K. Mysterious non-detection of HeI(2³S) transit absorption of GJ436b // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2023. V. 526, N 3. P. 4120–4129.
 15. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S. Global 3D hydrodynamic modelling of absorption in Ly α and He 10830 Å lines at transits of GJ3470b // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 500. P. 1404–1413.
 16. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Kislyakova K.G., Fossati L., Johnstone C.P., Prokopenko P.A., Berezutsky A.G., Zakharov Yu.P., Posukh V.G. Two regimes of interaction of a hot Jupiter's escaping atmosphere with the stellar wind and generation of energized atomic hydrogen corona // *Astrophys. J.* 2016. V. 832. P. 173–193.
 17. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Fossati L., Dwivedi N., Güdel M., Kislyakova K.G., Johnstone C.P., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Posukh V.G., Erkaev N.V., Ivanov V.A. Modeling of absorption by heavy minor species for the hot Jupiter HD209458b // *Astrophys. J.* 2018. V. 866. P. 47–60.
 18. Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Kislyakova K.G., Fossati L., Johnstone C.P., Posukh V.G. Ly α absorption at transits of HD209458b: A comparative study of various mechanisms under different conditions // *Astrophys. J.* 2017. V. 847, N 2. P. 126–139.
 19. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S. 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 481, N 4. P. 5315–5323.
 20. Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S., Kislyakova K.G., Dwivedi N.K. Global 3D hydrodynamic modeling of in-transit Ly α absorption of GJ 436b // *Astrophys. J.* 2019. V. 885. P. 67–87.
 21. France K., Loyd R.P., Youngblood A., Brown A., Schneider P.Ch., Hawley S.L., Froning C.S., Linsky J.L., Roberge A., Buccino A.P., Davenport J.R.A., Fontenla J.M., Kaltenegger L., Kowalski A.F., Mauas P.J.D., Miguel Ya., Redfield S., Rugheimer S., Tian F., Walkowicz L.M., Weisenburger K.L. The MUSCLES treasury survey. I. Motivation and overview // *Astrophys. J.* 2016. V. 820. P. 89–113.
 22. Fossati L., Pillitteri I., Shaikhislamov I.F., Bonfanti A., Borsa F., Carleo I., Guilluy G., Rumenskikh M.S. Possible origin of the non-detection of metastable HeI in the upper atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b // *Astron. Astrophys.* 2023. V. 673. P. 37–52.
 23. Fossati L., Koskinen T., Lothringer J.D., France K., Young M.E., Sreejith A.G. Extreme-ultraviolet radiation from A-stars: Implications for ultra-hot Jupiters // *Astrophys. J. L.* 2018. V. 868. P. 30–35.

M.S. Rumenskikh, I.F. Shaikhislamov. Investigations of optical properties of the atmospheres of hot exoplanets by numerical simulation of transit absorptions in the HeI 10830 Å line.

Transit observations of exoplanets make it possible to measure temperature and relative abundance of various elements in their atmospheres. The infrared line of metastable helium HeI 10830 Å is widely used to study the atmospheres of exoplanets by the transit absorption method. The emission spectra of stars have a significant impact on the physical and chemical parameters of the upper layers of the atmospheres. In this paper, we consider the features of absorption in the helium line for stars of different spectral classes by numerical simulation. The results show the key role of the star's emission spectrum in the formation of the upper atmosphere and in the amplitude of transit absorption of exoplanets in the HeI 10830 Å line.