## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ «ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

На правах рукописи

Руменских Марина Сергеевна

# ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРАНЗИТНЫХ ПОГЛОЩЕНИЙ В ЛИНИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ГЕЛИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР

Специальность 1.3.6 – Оптика

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Спи	сок условных обозначений	4
1. E	введение	7
1.1.	Актуальность	10
1.2.	Степень разработанности	12
1.3.	Цель и задачи	19
1.4.	Научная новизна	20
1.5.	Теоретическая значимость	21
1.6.	Практическая значимость	22
1.7.	Методология и методы исследования	26
2. 0	Описание модели верхних слоев атмосферы горячих э	кзопланет
2.1.	Атмосферы горячих экзопланет. Особенности числе	нного
	решения уравнений газовой динамики	34
2.2.	Особенности численного решения уравнения перено	oca
	излучения в атмосферах горячих экзопланет	46
2.3.	Оптические транзитные поглощения в линии метаст	абильного
	гелия HeI(2 <sup>3</sup> S)	51
2.4.	Основные выводы к главе 2	54
3. C	Особенности формирования метастабильного уровня	слия в
a	тмосферах горячих экзопланет	55
3.1.	Оптические транзитные поглощения «горячего юпи	гера»
	HD189733b	61
3.2.	Аномальное низкое поглощение в линии гелия в атм	юсфере
	«теплого нептуна» атмосфере GJ436b	67

3.3. Аномально высокое поглощение в линии гелия в атмосфере
«теплого нептуна» GJ3470b70
3.4. Основные выводы к главе 375
4. Использование оптических транзитных поглощений в линии
HeI(2 <sup>3</sup> S) для зондирования параметров звездного излучения и
состава атмосфер экзопланет76
4.1. Оценка параметров физико-химических параметров
атмосферы HD189733b по оптическим транзитным
поглощениям78
4.2. Определение физико-химических условий вблизи «теплого
нептуна» Wasp69b по оптическим транзитным
поглощениям82
4.3. Особенности оптических транзитных поглощений HD209458
в линии метастабильного гелия
4.4. Основные выводы к главе 494
5. Влияние радиационного давления излучения звезды на
наблюдательные проявления оптических транзитных
поглощений горячих экзопланет95
5.1. GJ436b: причины отсутствия оптических транзитных
поглощений в линии метастабильного гелия
5.2. Радиационное давление и оптическое транзитное поглощение
в линии HeI(2 <sup>3</sup> S) в атмосфере «теплого нептуна»
Wasp107b107
5.3. Основные выводы к главе 5113
Заключение114
Список используемой литературы117
Список используемой литературы117

## Список условных обозначений

Обозначение	Описание	Размерность
Rp	фотометрический	В уравнениях: нет
	радиус планеты	Расчеты: км
		В коде: радиус
		Юпитера, R <sub>J</sub> =69911 км
Мр	масса планеты	В уравнениях: нет
		Расчеты: кг
		В коде: масса Юпитера,
		М <sub>J</sub> =1.9·10 <sup>27</sup> кг
λ	длина волны	нм или Å, указано в
		тексте работы
XUV	излучение в области	нет
	ультрафиолета и	
	мягкого рентгена	
	1≤λ≤91 нм	
$\tau = \int n_i(l)\sigma_i(\lambda)dl$	оптическая толщина	Нет
J , w , w	атмосферы на длине	
	волны λ	
W <sub>XUV</sub>	поглощаемая энергия в	эрг·см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup> Å <sup>-1</sup>
	диапазоне длин волн	
	1≤λ≤91 нм в единице	
	объема в секунду	

n <sub>j</sub>	концентрация частиц	CM <sup>-3</sup>
	сорта ј	
V	CKODOCTE HACTHIL CODTA	$V_{\rm T} = 9.07  {\rm km/c}$
vj	скорость частиц сорта ј	$v_{\text{Te}} = 9.07 \text{ km/c} =$
		тепловая скорость при
		температуре 10000 К
n <sub>e</sub>	концентрация	см-3
	электронов	
R <sub>st</sub>	радиус-вектор до	Rp
	звезды	
S <sub>XUV,j</sub>	объемная скорость	см-3с-1
	фотоионизации	
$\Phi_{\lambda}$	поток фотонов от	см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> Å <sup>-1</sup>
	звезды с энергией hv в	
	ед. интервале длин волн	
F <sub>λ</sub>	поток энергии от звезды	эрг·см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> Å <sup>-1</sup>
	в ед. интервале длин	
	волн	
β	отношение силы	нет
	радиационного	
	давления на частицу к	
	силе гравитации	
	1	
Δr	шаг по радиусу	Rp
Δφ	азимутальный угол	Радиан
Δθ	полярный угол	Радиан

Rst	радиус звезды	<i>В уравнениях</i> : Rp
		Расчеты: км
		В коде: радиус Солнца,
		R <sub>Sol</sub> =696340 км
Mst	масса звезды	В уравнениях: Мр
		Расчеты: кг
		В коде: масса Солнца,
		M <sub>Sol</sub> =1.9·10 <sup>30</sup> кг
M <sub>sw</sub>	скорость потери массы	г/с
	звездного вещества	
σj(λ)	сечение поглощения	см <sup>2</sup>
	элементом ј в линии λ	
с	скорость света	при расчете о: см/с
		в остальном: м/с
F <sub>rad</sub>	сила радиационного	Н
	давления	
m <sub>j</sub>	масса частицы сорта ј	Г, КГ
$f_{1083}$	сила линии	нет
	метастабильного гелия	
		1

### введение

Значительные успехи человечества в освоении космического пространства позволили узнать многое о планетах Солнечной системы и их спутниках. Однако отдаленные астрофизические объекты, изучение которых возможно лишь с использованием космических телескопов, гораздо более разнообразны по физическим, химическим и, потенциально, астробиологическим свойствам, нежели относительно близкие объекты Солнечной системы, доступные непосредственным измерениям с использованием космических зондов. Большая часть вещества Вселенной представлена плазмой, и потенциал телескопов в области исследования плазменных процессов и явлений также трудно переоценить. Запуск космических телескопов следующего поколения JWST, E-ELT и ВКО-УФ обещает совершить открытия в указанных научных направлениях.

Одними из самых новых и обсуждаемых в последнее время астрофизических объектов являются экзопланеты. Идеи об иных мирах витали среди научной общественности еще задолго до обнаружения первой экзопланеты, но первые обоснованные предположения о присутствии планет у других звезд кроме Солнца были сделаны в 1855. Первой достоверно подтвержденной экзопланетой вблизи звезды главной последовательности является 51 Pegasi b, впервые обнаруженная в 1995 году [1]. Она была открыта методом транзитной фотометрии в сочетании с методом радиальных скоростей. Совокупность этих методов позволяет отделить экзопланеты от двойных звездных систем, которые могут иметь аналогичные наблюдательные проявления. Транзитный метод представляет особенный интерес в контексте данной работы. Он дает информацию об экзопланетарных системах. обширную Этот метод заключается в регистрации изменения уровня поглощения излучения звезды при транзите планеты перед её диском. Такие измерения варьируются от фотометрических в широком диапазоне длин волн до спектральных с разрешением отдельных линий. Фотометрические транзиты отображают

динамику прохождения планеты перед диском звезды, по отношению к наблюдателю. Транзиты с высоким спектральным разрешением позволяют наблюдать отдельные линии поглощения различных элементов. Они дают уникальную информацию за счет возможности выявления эффектов, оказывающих влияние на ширину и амплитуду поглощения спектральной линии в различных слоях атмосферы и экзосферы экзопланеты. Спектральноразрешенные и фотометрические транзитные измерения позволяют оценить скорость потери массы атмосферы экзопланеты, ее состав и протяженность. Помимо этого, появляется возможность получать информацию о звезде, методами – интенсивность недоступную другими коротковолнового излучения, поглощаемого межзвездной средой, плазменный ветер, вспышечная активность.

Первые открытые экзопланеты были названы отдельным термином – «горячие юпитеры». Существование газовых гигантов на орбитах в десять раз меньше, чем у Меркурия, заставили пересмотреть существующие представления в ряде областей и стимулировало развитие теорий, описывающих различные физические явления, протекающие в окрестности горячих экзопланет и индуцированные взаимодействием с энергичным излучением и потоком плазмы родительской звезды. Эти явления имеют аналоги в Солнечной системе, например, образование и нагрев ионосферы, потоки энергичных нейтральных атомов (ЭНА), авроральные свечения, головная ударная волна, обладают качественными Например, но отличиями. на основании энергетических оценок, а также по данным наблюдений, был сделан вывод о том, что ионизирующее излучение родительской звезды приводит не просто с ионизации и нагреву атмосферы фотоэлектронами, а к ее газодинамическому истечению. Более того, этот процесс настолько интенсивный, что вещество верхней атмосферы ускоряется до сверхзвуковых скоростей и выходит за пределы полости Роша, преодолевая гравитацию планеты. Этот эффект был подтвержден для ряда экзопланет транзитными наблюдениями в водородной

8

линии Lyα, глубина поглощения в которой составляет несколько фотометрических радиусов. Наблюдения в линиях водорода (Lyα) и гелия (HeI2<sup>3</sup>S) также подтвердили, что большинство горячих газовых экзопланет обладает преимущественно водородно-гелиевой атмосферой, аналогично соответствующим планетам Солнечной системы.

#### 1.1.Актуальность

На настоящее время оптические методы остаются единственными для изучения космических объектов за пределами Солнечной системы. Одними из самых новых и обсуждаемых в последнее время астрофизических объектов являются экзопланеты. Первая внесолнечная планета была открыта методом радиальной скорости – периодических смещений звездных спектральных линий. Подавляющее количество экзопланет обнаруживается методом транзитной оптической фотометрии, который представляет особенный интерес в контексте данной работы. Он дает обширную информацию об экзопланетарных системах. Этот метод заключается в регистрации изменения уровня поглощения излучения звезды при транзите планеты перед её диском. Помимо самого факта наличия экзопланет в звездной системе, этот метод предоставляет обширную информацию о составе и плотности атмосфер экзопланет путем сканирования поглощения излучения при транзите планеты перед диском звезды в спектральных диапазонах, соответствующих переходам между квантовыми состояниями различных атомов и молекул. Наиболее подходящим при этом оказывается оптический диапазон спектра.

Актуальность настоящей работы продиктована впечатляющими успехами мирового научного сообщества в получении наблюдательных данных для экзопланет с одной стороны, и недостатке достоверной интерпретации этих данных с другой. Транзитные измерения потенциально позволяют определить параметры и состав атмосфер экзопланет, но для этого необходимо достаточно сложное численное моделирование. Кроме того, сравнение результатов измерений с моделированием позволяет определить параметры физикохимических условий вокруг экзопланет, например, скорость потери массы вещества родительской звезды, поток излучения в области ультрафиолета и мягкого рентгена, роль радиационного давления на атомы планетарной атмосферы и прочее. В контексте актуальности настоящей работы также стоит упомянуть об эволюции планетарных атмосфер, существовании миров, пригодных для жизни, и поиска биомаркеров. Возрастной ряд экзопланет, как уже обнаружено, также обширен, как и у звезд. Таким образом, характеризация и анализ особенностей их атмосфер в зависимости от возраста дает картину эволюции экзопланет. Изучение каменистых экзопланет земного типа, хоть еще и недоступно непосредственно, уже сейчас проходит этап разработки методов детектирования параметров космической погоды и свойств атмосфер на примере именно горячих газовых экзопланет.

Основные тезисы актуальности настоящей работы формулируются следующим образом:

- Определение параметров и состава атмосфер экзопланет
- Исследование физико-химических условий в звездных системах с экзопланетами
- Эволюция планетных атмосфер
- Определение возможностей существующих спектральных методов для детектирования потенциальных биомаркеров в атмосферах экзопланет

### 1.2. Степень разработанности

После обнаружения экзопланет на близких орбитах, в работе [2] было впервые показано, что богатая водородом атмосфера таких объектов будет нагреваться интенсивным ионизующим излучением родительской звезды (далее XUV,  $\lambda \leq 910$  A) до нескольких тысяч градусов Кельвина, что приведет к газодинамическому ускорению и истечению. Этот режим кардинально отличается от так называемого механизма потери частиц Джинса, характерного для атмосфер планет Солнечной системы. В том же году было впервые зарегистрировано на телескопе Хаббл значительное поглощение в линии Lya, происходящее во время транзита «горячего юпитера» – HD209458b ([3], [4]). Глубина поглощения ~10% указывала на существование плотной водородной оболочки, в три раза превышающей радиус планеты. В дальнейшем примерно аналогичные данные были зарегистрированы для «горячих юпитеров» HD189733b ([5], [6]) и Cnc55b [7], которые подтвердили существование процесса газодинамического расширения верхних атмосфер горячих экзопланет.

Если указанные выше примеры можно было объяснить обширной и плотной, но статической, экзосферой ([4], [9], [10]), то для некоторых экзопланет было обнаружено аномальное поглощение в синем крыле линии Lyα на высоких Доплеровских скоростях смещения ~100 км/с. Убедительные данные, хорошо повторяющиеся в разных по времени наблюдениях и имеющие достаточно высокое отношение сигнал/шум были получены для экзопланет типа «теплых нептунов». В частности, для GJ436b было обнаружено поглощение на уровне 60% на скоростях [-120; -50] км/с [11]. Величина эффекта позволила измерить транзитную кривую блеска в этом диапазоне скоростей, которая показала эффект раннего начала и длительного выхода. Это продемонстрировало, что вокруг экзопланеты существует огромная оболочка нейтральных атомов протяженностью, сопоставимой с орбитой планеты ([12], [13]). Поскольку атомы планетарного происхождения не могут иметь такие скорости, такой эффект указывал на взаимодействие планетарного вещества с излучением и плазменным ветром родительской звезды.

Уникальные измерения транзитного поглощения для HD209458b и GJ436b стимулировали развитие численных методов с целью объяснения и интерпретации наблюдений. Первым таким стал метод траекторий частиц (более известный как метод Монте-Карло) впервые использованный в работе [14]. Согласно этой работе, Доплеровское смещение транзитных поглощений может быть обусловлено радиационным ускорением атомов водорода из-за давления излучения звезды в той же линии, которая поглощается - Lyα. Дальнейшее развитие этой модели включало явление перезарядки быстрых протонов звездного ветра на медленных атомах планетарной атмосферы с образованием энергичных нейтральных атомов (ЭНА, [15]). В работах [12], [13] радиационное давление на атомы водорода и образование ЭНА учитывались при моделировании транзитных поглощений GJ436b. Однако, полученные результаты по скорости потери массы планетарного вещества и требуемых параметров звездного ветра существенно расходились с выводами газодинамического моделирования, выполненного для этой планеты в работах [16-18]. Газодинамическое моделирование показало, что радиационное давление несущественно для образования ЭНА, а главный эффект состоит в перезарядке, протекающей в области головной ударной волны, которая образуется при обтекании планетарной атмосферы звездным ветром. Это позволило оценить параметры звездного ветра, при которых достигается наилучшее совпадение моделирования с наблюдаемым транзитным поглощением ([17]). Несмотря на преимущество кинетического подхода в описании процессов радиационного давления и перезарядки, метод траекторий частиц имеет принципиальный и непреодолимый недостаток, связанный с невозможностью моделировать образование планетарной ударной волны и ударного слоя, в котором ЭНА преимущественно образуются.

Однако исследование атмосфер экзопланет с использованием линии Lya не всегда возможно по причине того, что эта линия не проходит через атмосферу Земли, искажается за счет геокорональной эмиссии, и может быть исследована только посредством космических телескопов, и только для относительно близких звезд, поскольку еще подвержена значительному поглощению межзвездной средой. Как было предсказано в работе [19], инфракрасная линия  $\lambda = 1083$  нм поглощения атомарного гелия, образованная при триплетном  $2^{3}S \rightarrow 2^{3}P$ с метастабильного  $HeI(2^{3}S)$ переходе уровня, является альтернативным инструментом зондирования, лишенным указанных выше недостатков. Интенсивность излучения в указанном ИК диапазоне высока для большинства звезд, что обеспечивает необходимую величину сигнала. Гелий - второй по распространенности элемент во вселенной и его наличие в атмосферах газовых планет ожидаемо. Из-за отсутствия поглощения в межзвездной среде и атмосферой Земли эта линия может наблюдаться наземными телескопами с гораздо большей чувствительностью в течении гораздо большего времени и, соответственно, с гораздо большим соотношением сигнал/шум (S/N). В пионерской работе [20] было впервые проведено, в качестве прогноза, численное моделирование транзитных поглощений в линии HeI(2<sup>3</sup>S) для планет GJ436b и HD209458b. Авторами использовалась простейшая гидростатическая модель Паркеровского ветра, не учитывался ряд ключевых физических процессов, а потому оценки из работы [20] не показали соответствия данным наблюдений как для GJ436b [21], так и HD209458b [22] (отличие гидродинамического описания среды OT гидростатического приведено в главе 2.1). Несмотря на это, исследования по данному направлению продолжили другие группы, особенно после первого обнаружения поглощения в линии метастабильного гелия, полученного для экзопланеты Wasp107b [23].

Особенно следует отметить пример транзитных наблюдений и численного моделирования «горячего юпитера» HD189733b. Эта экзопланета имеет

относительно большую массу  $(1.14M_J)$ , а родительская звезда отличается высокой активностью. По последней причине транзитные поглощения в линии Lya не показали повторяемость в разные периоды наблюдений ([5], [6]). Однако поглощения в триплетной линии метастабильного гелия HeI(2<sup>3</sup>S) показали стабильно высокое, хотя и несколько отличающееся, значение в двух независимых измерениях [24], [25]. Все эти данные указывают на значительную вариабильность XUV излучения и плазменного ветра звезды, что подтверждает ее высокую активность. Было сделано несколько исследований на основе численного моделирования, в которых была произведена интерпретация транзитных поглощений в линии метастабильного гелия с целью оценки параметров космической погоды ([26-28]).

Еще одним обладателем протяженной истекающей атмосферы является НАТ-P-11b. Спектральные измерения этого объекта выявили удивительную особенность: УФ линии поглощения водорода и углерода имеют сильное смещение в синюю область спектра [29], что говорит о потоке этих веществ в сторону к наблюдателю. При этом за счет большой пекулярной скорости звезды и ослабления экстинкции в межзвездной среде, было впервые измерено поглощение в центре линии Lyα. Однако поглощение в ИК линии метастабильного гелия не показало смещений [30]. В работе [29] для интерпретации наблюдений использовалось сочетание нескольких численных моделей. Для объяснения значительного синего смещения поглощения в линии иона углерода авторы предположили наличие сильного планетарного магнитного поля величиной ~5 Гс, которое заставляет планетарное вещество истекать в виде полярных джетов и формировать протяженный хвост длиной в несколько AE.

Накопление наблюдательных данных в различных линиях для большого количества экзопланет (см Таблицу 1.2.1) и их интерпретация численными моделями позволяет перейти к выявлению фундаментальных особенностей взаимодействия планетарных атмосфер со звездным ветром и излучением, и

15

системному анализу влияния тех или иных факторов на поглощение в линиях, с возможностью предсказания величины эффекта в тех или иных планетарных системах. Одной из таких работ является [31], в которой исследовалось влияние класса звезды на возможность обнаружения в ее системе поглощения в линии гелия. В другой работе ([19]) обсуждается зависимость глубины поглощения от расстояния между звездой и планетой. Однако работ, посвященных анализу физических условий в планетарных атмосферах, весьма немного, несмотря на очевидную в них потребность. После анализа факторов, связанных с точно измеряемыми параметрами экзопланетарных систем, например спектрального излучения звезды в доступных для наблюдения диапазонах, радиационного давления на различные атомы, размера и массы планеты и звезды, логичен переход к изучению физических явлений, обусловливающих особенности транзитных поглощений, связанных с такими параметрами, как относительное содержание различных элементов в атмосфере экзопланет, скорость истечения верхней атмосферы, интенсивность плазменного ветра и ионизующей радиации звезды.

Название	Macc a (MJ)	Радиу с (R <sub>J</sub> )	Шкала высот (Rp)	g, м/с <sup>2</sup>	Спектральн ый класс звезды	Наблюден ия в линии HeI(2 <sup>3</sup> S), %
GJ3470b	0,04	0,373	29,7188 9	7,4469	M1.5	1.5 <sup>32</sup>
HD209458 b	0,69	1,38	9,80619	9,38478	G0	<b>1</b> <sup>22</sup>
WASP- 52b	0.47	1.26	10,5155 8	7,66814	K2V	4 <sup>33</sup>

WASP-	0,12	0,94	26,8853	3,5177	K6	<b>6</b> <sup>23</sup>
107b			1			
WASP-	0,26	1,057	14,9497	6,02777	K5	<b>3,5</b> <sup>21</sup>
69b			3			
HAT-P-	0,073	0,389	19,4358	12,5983	K4	<b>1</b> <sup>30</sup>
11b	6		5			
HAT-P-	0,183	0,947	21,3385	5,28548	K	<b>2,8</b> <sup>34</sup>
18b			7			
HAT-P-	0,75	1,789	23,3910	6,06979	F/G	<b>5,5</b> <sup>35</sup>
32b			4			
HD189733	1,138	1,138	3,92248	22,7609	K2	<b>1</b> <sup>24,25</sup>
b				8		
GJ-1214b	0,026	0,245	23,1011	11,2195	М	0.13 <sup>36,37</sup>
			3	3		
HD	0.025	0.2	31,7720	16,1887	K1V	0.21 <sup>37</sup>
97658b			6	5		
GJ-9827b	0,015	0,136	44,4547	21,0061	K6	0.067 <sup>37</sup>
			4	6		
WASP-	0,92	1,83	21,3588	7,11572	F6	~0.4 <sup>38</sup>
76b			5			
WASP-	0,554	0,952	6,31915	15,8332	K7	~0 <sup>39</sup>
80b				2		
GJ-436b	0,07	0,38	21,2934	12,5563	M2.5	~0 <sup>21</sup>
			5	7		

WASP-	1,47	1,9	6,33734	10,5473	G0	$\sim 0^{40}$
12b				5		

Таблица 1.2.1. Характеристики некоторых горячих экзопланет, для которых были сделаны транзитные наблюдения в линии 1083 нм. Последняя колонка показывает измеренное поглощение (со ссылкой на публикацию)

В настоящей работе проводится анализ транзитов горячих экзопланет в линии λ=1083 нм метастабильного гелия, физико-химических условий, влияющих на особенности оптических профилей поглощения, и на основании численного моделирования трехмерным многожидкостным газодинамическим кодом делаются оценки параметров планетарных систем.

#### 1.3. Цель и задачи

Целью настоящей работы является определение параметров планетарных атмосфер путем интерпретации наблюдений оптических транзитных поглощений в триплетной линии HeI(2<sup>3</sup>S) метастабильного гелия. В частности, анализ факторов, влияющих на возможность обнаружения поглощения в этой линии: спектральное распределение энергии излучения звезды; эффект радиационного давления на атомы метастабильного гелия и водорода; радиуса и массы планеты и температуры на фотометрическом радиусе, которые определяют протяженность шкалы высот и относительный размер поглощающей области; относительное содержание различных элементов, составляющих атмосферу. Эти факторы будут исследованы на основе результатов моделирования конкретных планетарных систем и сравнения расчетов с данными измерений. Это позволит оценить параметры космической погоды и относительное содержание гелия в атмосферах ряда горячих экзопланет, а также выявить физические условия в атмосферах экзопланет, наиболее подходящие для формирования оптических транзитных поглощений в линии метастабильного гелия. В соответствии с целью ставится следующий ряд задач:

• Выявление механизмов и основных процессов заселения и депопуляции метастабильного уровня гелия в различных областях атмосферы и плазмосферы

 Расчет оптических транзитных поглощений в триплетной линии HeI(23S) метастабильного гелия для конкретных планетарных систем. Оценка параметров атмосферы и звездного ветра из сопоставления результатов моделирования с наблюдательными данными

 Анализ характеристик планетарных систем, влияющих на наблюдение в линии метастабильного гелия наиболее перспективно с точки зрения обнаружения оптических транзитных поглощений

### 1.4. Научная новизна

Впервые получены следующие результаты:

- Показана значимость учета особенностей коротковолнового и оптического спектра звездного излучения при расчете транзитных поглощений горячих экзопланет в линии метастабильного гелия
- Показано, что транзитные поглощения излучения звезд верхними атмосферами горячих экзопланет в линии HeI(2<sup>3</sup>S) на длине волны 1083 нм дают количественную информацию об интенсивности ионизирующего излучения звезды (F<sub>XUV</sub>) и относительном содержания гелия (He/H) в атмосферах планет.
- Оценены параметры планетарных атмосфер, а также интенсивность звездного ветра (M<sub>sw</sub>), у ряда горячих экзопланет с использованием трехмерной глобальной гидродинамической модели верхних атмосфер горячих экзопланет, включая расчет транзитных поглощений в линии метастабильного гелия:

HD189733b:  $n_{He}/n_{H}$ =0.005,  $F_{XUV}$ =15  $\Im pr \cdot cm^{-2}c^{-1}$  ha 1 AE,  $M_{sw}$ =10<sup>11</sup> r/c; Wasp69b:  $n_{He}/n_{H}$ =0.1,  $F_{XUV}$ =5  $\Im pr \cdot cm^{-2}c^{-1}$  ha 1 AE,  $M_{sw}$ =2.5·10<sup>11</sup> r/c; GJ3470b:  $n_{He}/n_{H}$ =0.016,  $F_{XUV}$ =10  $\Im pr \cdot cm^{-2}c^{-1}$  ha 1 AE,  $M_{sw}$ =3.4·10<sup>12</sup> r/c; HD209458b:  $n_{He}/n_{H}$ =0.02,  $F_{XUV}$ =10  $\Im pr \cdot cm^{-2}c^{-1}$  ha 1 AE,  $M_{sw}$ =10<sup>12</sup> r/c; Wasp107b:  $n_{He}/n_{H}$ =0.1,  $F_{XUV}$ =6  $\Im pr \cdot cm^{-2}c^{-1}$  ha 1 AE,  $M_{sw}$ =10<sup>11</sup> r/c

- Установлено, что для некоторых экзопланет заселение уровня метастабильного гелия происходит в ударном слое за счет столкновений атомов HeI(1<sup>1</sup>S) с горячими электронами звездного ветра и, таким образом, должно учитываться при интерпретации данных наблюдений
- Установлено, что для некоторых экзопланет на оптическую толщину и контур линии поглощения HeI(2<sup>3</sup>S) значительное влияние оказывает радиационное ускорения метастабильных атомов гелия и, таким образом, должно учитываться при интерпретации данных наблюдений

#### 1.5. Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии существующих представлений о динамике отдельных химических элементов в верхней атмосфере и экзосфере горячих экзопланет и их взаимодействии со звездным ветром, анализе факторов и процессов, влияющих на интерпретацию наблюдений в линии HeI(2<sup>3</sup>S), обобщении результатов моделирования конкретных экзопланет.

На данный момент уже существуют работы, в которых обсуждается зависимость наблюдений от параметров систем "звезда-планета", о влиянии особенностей спектральной плотности излучения звезды на обнаружение поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) [31]. Поскольку заселенность уровней атомов в атмосферах экзопланет во многом зависит от наличия в звездном спектре фотонов с теми или иными длинами волн, предположения о непосредственном влиянии параметров звезды на поглощение в спектральных линиях являются обоснованными. Учет прочих факторов, влияющих на истечение частично ионизованной истекающей атмосферы экзопланет не менее важен, поскольку именно движение поглощающего вещества непосредственно влияет на ширину и амплитуду линий поглощения. Кроме того, численные модели, применяемые в разных работах, не всегда учитывают необходимые для корректного расчета поглощений условия (например, не обладают достаточной размерностью и не включают ряд принципиально важных эффектов, оказывающих непосредственное влияние на наблюдаемые транзитные поглощения) что ставит под вопрос полученные в таких работах В работе производится сравнение выводы. настоящей различных исследований и делается вывод о факторах, которые необходимо учитывать в тех или иных условиях с использованием наиболее комплексного подхода.

#### 1.6. Практическая значимость

Вместе с фундаментальностью исследований экзопланет, результаты диссертации имеют ряд важных практических приложений. В частности, они помогут в интерпретации наблюдательных данных телескопов, предоставят возможности для решения ряда вопросов, связанных с исследованием эволюции звездных систем, а также поспособствуют решению проблем, связанных с определением и поиском биомаркеров.

Одной из самых важных практических задач изучения верхних атмосфер горячих экзопланет является определение параметров космической погоды во внесолнечных планетарных системах для оценки активности звезд на различных стадиях эволюции. На данный момент стоит вопрос о причинах аномального «спокойствия» Солнца, и изучение особенностей эволюции других звезд, а также планет в их окрестности может пролить свет на многие нерешенные вопросы физики Солнечного ветра и планетообразования. Данные о планетарных системах, полученные в ходе миссии Kepler, показали, что звезды G-класса, к которым относится и Солнце, в среднем проявляют много большую активность, чем наша родительская звезда. Структура верхних слоев атмосфер горячих экзопланет наиболее подвержена влиянию звездного ветра, а потому транзитные поглощения могут предоставить сведения о скоростях потери массы звездного вещества, а также о коротковолновой части звездного спектра, непосредственная регистрация которой невозможна по причине поглощения в межзвездной среде. Сведения о ветрах и спектральной плотности мощности тысяч звезд различных спектральных классов помогут в формировании долгосрочного прогноза Солнечной активности.

Вторая задача связана с анализом факторов, влияющих на транзитные поглощения верхних атмосфер горячих экзопланет в спектральных диапазонах, соответствующих линиям поглощения различных элементов. Наблюдательное время любого телескопа является чрезвычайно ценным ресурсом, в связи с чем существует необходимость в предварительной оценке

22

вероятных результатов наблюдения для различных планетарных систем, а также поиска перспективных кандидатов. Огромное количество спектроскопических данных, накопленных за последние годы, позволяет проанализировать зависимость наблюдательных проявлений от особенностей экзопланетарной системы, и разработать рекомендации для наблюдений наземными и космическими телескопами. На данный момент единственным способом получения количественной информации о физико-химических процессах в атмосферах экзопланет является сравнение численного моделирования с наблюдениями оптических транзитных поглощений. Накопленный данной области показывает опыт научных групп В необходимость применения все более сложных моделей и учета все большего количества факторов и процессов. Все это обусловливает практическую значимость развития И применения сложных численных моделей, теоретического анализа и обобщения получаемых результатов.

Третья задача связана с поиском биомаркеров и определением типов атмосфер экзопланет. Разнообразие форм материи Земли обусловлено в первую очередь составом ее атмосферы и поверхности. Среди тяжелых элементов, содержание которых во Вселенной относительно невелико, есть те, что образуют множество разнообразных химических соединений, и такое разнообразие предполагает условия для образования жизни на поверхности атмосфер Согласно об экзопланет. современным представлениям эволюции землеподобных планет, объектов изначально вокруг каменистых аккумулируется атмосфера первого типа. Однако гравитационный потенциал планет земного типа слишком мал, чтобы удержать первичную атмосферу, а потому различные ударные воздействия могут оставить экзопланету без газовой оболочки. Помимо ударных процессов, смена первичной атмосферы на вторичную может произойти за счет диффузии атомов водорода и гелия за пределы полости Роша и замена их более тяжелыми элементами (C, Si, O, Fe, Ca, Mg и т.д.) и их соединениями, образованными при дегазации. Существенное отличие первичных и вторичных атмосфер состоит в средней плотности и, следовательно, шкале высот атмосферы, и содержании гелия.

На данный момент определение составов атмосфер далеких экзопланет возможно только методом транзитной спектроскопии в сочетании с глобальными моделированием численным самосогласованными многожидкостными кодами. Сравнивая транзитные спектрально разрешенные наблюдения горячих экзопланет с модельными спектрами поглощения, мы можем определить тип атмосферы (первичная или вторичная), особенности ее динамики и концентрацию различных элементов, составляющих верхние слои атмосферы. Однако вторичные атмосферы содержат как тяжелые элементы и их соединения, так и водород, в связи с чем встает вопрос: как можно отделить первичные атмосферы от вторичных, используя лишь средства спектральной диагностики? Данная проблема решается комплексным анализом линий поглощения, образованных при транзите каждой отдельной планеты. Основным фактором вторичных атмосфер предполагается отсутствие поглощения в гелии, но активное поглощение в линиях тяжелых элементов и их соединений. Будучи химически пассивным элементом, гелий практически не вступает в реакции ни с одним из известных элементов при условиях, характерных для поверхности и верхних слоев атмосфер, а потому наличие поглощения в линии метастабильного гелия – наиболее сильной наблюдаемой гелиевой линии – будет характерно преимущественно для первичных атмосфер. Вторичные атмосферы предполагаются насыщенными тяжелыми элементами и их соединениями, в частности CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, OH и т.д., с отсутствием поглощения в линиях  $HeI(2^{3}S)$  и Lya.

Таким образом, исследование горячих экзопланет поможет не только в определении параметров космической погоды во внесолнечных планетарных системах. Физика экзопланетарных атмосфер также позволит пролить свет на некоторые нерешенные вопросы астрофизики, такие, как особенности эволюции планетарных атмосфер, возможность существования миров, пригодных для жизни, и поиска биомаркеров.

#### 1.7. Методология и методы исследования

Для интерпретации оптических транзитных поглощений и получения количественной информации необходим теоретический анализ и комплексное численное моделирование. Требуются решения магнито-гидродинамических уравнений, определяющих пространственное распределение макроскопических величин в окружении горячих экзопланет исходя из соответствующих граничных и начальных условий, задаваемых физическими условиями конкретных систем.

Численная модель, результаты которой будут лежать в основе выводов настоящей работы, является инструментом, специально созданным для моделирования наблюдений. Она основана на решении многокомпонентной динамической системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии в трехмерной сферической неинерциальной системе отчета с учетом сил гравитации и Кориолиса, светового давления, а также процессов плазмофотохимии плазменных компонент, поглощения и переноса спектрального излучения звезды. Атмосфера горячих газовых экзопланет предполагается состоящей в основном из легких элементов - водорода и гелия с примесями тяжелых элементов (O, C, Si, Mg и т.д.). Система гидродинамических уравнений нормируется и решается методом конечных объемов на неравномерной сетке. Код постепенно модифицировался, расширялась геометрия, включались различные компоненты и эффекты. В работе [41] описана одномерная гидродинамическая модель, учитывающая процессы нагрева атмосферы «горячего юпитера» звездным XUV-излучением с последующим расширением верхних слоёв атмосферы, ионизацию и рекомбинацию атмосферного газа, а также радиационное и адиабатическое охлаждение расширяющегося планетарного плазменного ветра, включающего только водородные компоненты, без учета влияния внешнего магнитного поля планеты. Однако для учета магнитного поля планеты недостаточно одномерной геометрии. В работе [42] представлена двумерная МГД модель, позволяющая учитывать влияние магнитного поля планеты на взаимодействие атмосферы со звездным ветром. Помимо эффектов собственного ee магнитного поля планеты, предлагаемая МГД-модель включает реалистичный спектр звездного XUV-излучения для правильного расчета интенсивности и распределения плотности и энергии излучения, процессы водородной плазмофотохимии для более корректного учета состава атмосферы, охлаждение инфракрасного посредством образования излучателя молекулы  $H_{3}^{+}$ , охлаждения через возбуждение атомов водорода с излучением Lya квантов. Далее для более корректного учета влияния геометрии приливных сил и магнитного поля планеты, а также взаимодействия планетарного и звездного ветров геометрия кода была расширена до трехмерной [43].

Вышеописанная модель предназначена для моделирования оптических транзитных поглощений в линиях водорода, гелия и примесных элементов с учетом движения этих компонент как отдельных взаимодействующих жидкостей. Для расчета поглощения в линии метастабильного гелия рассчитываются все необходимые реакции, участвующие в заселении и расселении этого уровня. Более подробное описание этих реакций будет приведено в главе, посвященной описанию модели. Моделирование поглощения в линии гелия посредством данной модели было впервые сделано для планеты GJ 3470b. В работах [28], [44-46] изложены результаты моделирования поглощения в линии гелия с использованием вышеописанной модели для ряда экзопланет, которые показали хорошее соответствие с данными наблюдений.

Для интерпретации оптических транзитных наблюдений широкого ряда горячих экзопланет помимо численного моделирования трехмерным гидродинамическим кодом будут также применяться аналитические расчеты, направленные на выявление закономерностей влияния физических процессов на наблюдательные проявления.

27

#### Положения, выносимые на защиту

 Поглощение в линии метастабильного гелия 1083 нм может формироваться как в верхней атмосфере экзопланеты, где метастабильный гелий образуется в результате фото-ионизации атома и его последующей рекомбинации, так и в ударном слое звездного ветра за счет прямого возбуждения атомов горячими электронами. При этом нижние слои атмосферы не дают вклада в поглощение из-за эффективного девозбуждения в столкновениях с атомами и молекулами.
 Спектральные профили оптических транзитных поглощений в линии метастабильного гелия дают количественную информацию о потоке

ионизирующего излучения звезды и относительном содержания гелия в атмосфере планеты. Впервые оценены параметры планетарных атмосфер у ряда горячих экзопланет и установлено, что содержание гелия у газовых экзопланет варьируется от стандартного солнечного (He/H=0.1) до величин примерно на порядок меньше.

3. На примере экзопланет GJ436b и Wasp107b установлено, что оптическое давление излучения звезд оказывает влияние на динамику метастабильных атомов гелия в верхней атмосфере, и должно учитываться в моделировании транзитных поглощении в линии HeI(2<sup>3</sup>S).

Достоверность полученных результатов основана сравнении с на работ, результатами других комплекса использованных методов, зарекомендовавших себя на решении ряда задач, связанных с интерпретацией транзитных поглощений горячих экзопланет в линиях различных элементов, таких, как SiIII, CII, OI, MgI, FeII. Результаты численного моделирования, полученные с использованием трехмерного гидродинамического кода, сравниваются с результатами моделирований, выполненными с использованием других подходов.

Перечень конференций, на которых были доложены результаты по теме исследования:

1 Численное моделирование спектральных измерений близкоорбитальных экзопланет // М.С. Руменских, И.Ф. Шайхисламов, А.Г. Березуцкий, И.Б. Мирошниченко (стендовый) // 14-я конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», Институт космических исследований РАН, 12-16.02 2019 – Москва

2 Численное моделирование спектральных измерений близкоорбитальных экзопланет // М.С. Руменских, И.Ф. Шайхисламов, А.Г. Березуцкий, И.Б. Мирошниченко (стендовый) // Международный симпозиум ЛЛФ-19, 1-6.07.19 – Иркутск

3 3D MODELING OF TRANSIT ABSORBTION OF THE HOT EXOPLANETS // Rumenskikh M. S., Shaikhislamov I. F., Berezutsky A. G., Miroshnichenko I. B. (стендовый) // Десятый московский международный симпозиум по исследованиям Солнечной системы (10M-S3), ИКИ, 7-11.10.19 - Москва,

4 3D modeling of transit absorption of GJ3470 b in hydrogen and helium lines / Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S. // Одиннадцатый московский международный симпозиум по исследованиям Солнечной системы (11M-S3), 5-9 октября 2020 года, ИКИ РАН, Москва: программа и тезисы. - Р. 344-346. - ISBN 978-5-00015-050-4. DOI: 0.21046/11MS3-2020

5 Numerical simulation of helium-rich atmospheres of hot exoplanets / Rumenskikh M.S, Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Shaikhislamov I.F. // Одиннадцатый московский международный симпозиум по исследованиям Солнечной системы (11M-S3), 5-9 октября 2020 года, ИКИ РАН, Москва: программа и тезисы. - Р. 359. - ISBN 978-5-00015-050-4. DOI: 0.21046/11MS3-2020

6 Modeling transit absorptions of hot Jupiter HD-189733b in the metastable helium line (постер) / Руменских М.С., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.// ФизикаСпб, Санкт-Петербург, 19-23 октября 2021

7 Modeling transit absorptions of hot Jupiters in the metastable helium line / РуменскихМ.С., МирошниченкоИ.Б., Шайхисламов И.Ф.// 12MS3, Москва, 11-15 октября 2021

8 Numerical MHD modeling of hot Jupiter transit absorptions in the metastable helium line / Руменских М.С., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.// IV Russian Conference on Magnetohydrodynamics Пермь, 20-22 сентября 2021

9 Моделирование транзитных поглощений «горячего юпитера» HD189733b в линии метастабильного гелия / Руменских М.С., Мирошниченко И.Б., Березуцкий А.Г., Шайхисламов И.Ф // Физика плазмы в Солнечной системе-21, Москва, февраль 2021

10 Трехмерное гидродинамическое моделирование транзитных поглощений «горячих юпитеров» в линии метастабильного гелия и сравнение с наблюдениями / Руменских М.С., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.// Всероссийская астрономическая конференция с международным участием "Магнетизм и активность Солнца и звезд - 2021" пгт Научный, 31.08-3.09 2021

11 Моделирование транзитных поглощений «горячего юпитера» HD189733b в линии метастабильного гелия» / Руменских М.С., Мирошниченко И.Б., Березуцкий А.Г., Шайхисламов И.Ф // Физика плазмы в Солнечной системе-21, Москва, февраль 2021

12 Численное моделирование транзитных поглощений «горячих юпитеров» в линии метастабильного гелия / Руменских М.С., Березуцкий А. Г., Мирошниченко И. Б., Шепелин А.В. Шайхисламов И.Ф. // Физика плазмы в Солнечной системе- 22, Москва, февраль 2022

13 Interpretation of mysterious non-detection He, C and O components in the atmosphere of GJ436b / Rumenskikh M., Shepelin A., Berezutsky A., Miroshnichenko I., Shaikhislamov I. F. // COSPAR-22, Афины, Греция, 16-25 июля 2022

14 Интерпретация загадочного не обнаружения поглощения в линиях гелия, углерода и кислорода в атмосфере «теплого нептуна» GJ436b / Руменских М.С., Березуцкий А. Г., Мирошниченко И. Б., Шепелин А.В. Шайхисламов И.Ф. // Всероссийская астрономическая конференция с международным участием "Магнетизм и активность Солнца и звезд - 2022" пгт Научный, 22.08-26.08 2022

15 Interpretation of mysterious non-detection He, C and O components in the atmosphere of GJ 436b // Руменских М.С., Шепелин А.В., Шайхисламов И.Ф.// 13MS3, Москва, 9-14 октября 2022

16 Радиационное давление и наблюдательные проявления транзитных поглощений горячих экзопланет в линии метастабильного гелия / Руменских М.С., Березуцкий А. Г., Мирошниченко И. Б., Шепелин А.В. Шайхисламов И.Ф. // Всероссийская конференция «Исследования звезд с экзопланетами», 23-27 ноября 2022, Суздаль

17. Modeling transit absorptions of hot Jupiters in the metastable helium line //  $20^{\text{th}}$  annual meeting AOGS-23, Singapore,  $30^{\text{th}}$  July –  $4^{\text{th}}$  August 2023

 Modeling transit absorptions of hot Jupiter HD 189733b in the metastable helium line // 2023 Asia-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM-23), Japan, 7-11<sup>th</sup> August 2023 Перечень публикаций с результатами данной работы, представленные в журналах, индексируемых в базах WoS и Scopus, и входящих в список ВАК.

- 1 Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф. (2024) Исследование оптических свойств атмосфер горячих экзопланет численным моделированием транзитных поглощений в линии Не I 10830 Å. Оптика атмосферы и океана, 37(1)
- 2 Rumenskikh M.S., Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Miroshnichenko, I.B., Berezutsky A. G., Shepelin A.V., Dwivedi N.K. (2023). Mysterious nondetection of He i (23S) transit absorption of GJ 436b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 526(3), 4120-4129.
- 3 Fossati L., Pillitteri I., Shaikhislamov, I.F. Bonfanti, A., Borsa F., Carleo I., Rumenskikh M.S. (2023). Possible origin of the non-detection of metastable He I in the upper atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b. Astronomy and Astrophysics, 673, A37.
- 4 Rumenskikh M.S., Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Miroshnichenko I.B., Berezutsky A.G., Fossati L. (2022). Global 3D Simulation of the Upper Atmosphere of HD189733b and Absorption in Metastable He I and Lyα Lines. The Astrophysical Journal, 927(2), 238.
- 5 Fossati L., Guilluy G., Shaikhislamov I. F., Carleo I., Borsa F., Bonomo A. S., Rumenskikh M.S., Stoev H. (2022). The GAPS Programme at TNG-XXXII. The revealing non-detection of metastable He I in the atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b. Astronomy & Astrophysics, 658, A136.
- 6 Berezutsky A.G., Shaikhislamov I.F., Rumenskikh M.S., Khodachenko M.L., Lammer H., Miroshnichenko I.B. (2022). On the transit spectroscopy features of warm Neptunes in the TOI-421 system, revealed with their 3D aeronomy simulations. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515(1), 706-715.
- Fossati, L., Khodachenko, M. L., Guilluy, G., Bonomo, A. S., Giacobbe, P., Brogi, M., ... & Molinari, E. (2022). The GAPS Programme at TNG: XXXII.

the revealing non-detection of metastable He i in the atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b. Astronomy and Astrophysics, 658, A136-A136.

- 8 Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Fossati L., Lammer H., Rumenskikh M.S., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Efimov M.A. (2021) Simulation of 10 830 Å absorption with a 3D hydrodynamic model reveals the solar He abundance in upper atmosphere of WASP-107b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 503(1) Pages L23–L27.
- 9 Khodachenko M.L., Shaikhislamov, I. F., Lammer H., Miroshnichenko, I. B., Rumenskikh M. S., Berezutsky A.G., Fossati, L. (2021). The impact of intrinsic magnetic field on the absorption signatures of elements probing the upper atmosphere of HD209458b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 507(3), 3626-3637.
- 10 Shaikhislamov I.F., Fossati L., Khodachenko M.L., Lammer H., García Muñoz A., Youngblood A., Dwivedi N.K., Rumenskikh M.S. (2020). Threedimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of  $\pi$  Men c: comparison with Ly $\alpha$  transit observations. Astronomy & Astrophysics., 639, 109
- 11 Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Berezutsky, A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S. (2020). Three-dimensional modelling of absorption by various species for hot Jupiter HD 209458b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 491(3), 3435-3447.
- 12 Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S., Kislyakova K.G., Dwivedi N.K. (2019). Global 3D Hydrodynamic Modeling of In-transit Lyα Absorption of GJ 436b. The Astrophysical Journal, 885(1), 67
- 13 Shaikhislamov, I.F., Khodachenko, M.L., Lammer H., Berezutsky, A. G., Miroshnichenko, I. B., & Rumenskikh, M. S. (2018). 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 481(4), 5315-5323.

Публикации, вошедшие в базу РИНЦ и имеющие DOI (цифровой идентификатор объекта):

- Rumenskikh M. S., Shaikhislamov, I. F., Berezutsky, A. G., & Miroshnichenko,
  I. B. (2020). Numerical Modeling of Spectral Measurements of Near-Orbit Exoplanets. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 84, 788-790.
- 15 Березуцкий А. Г., Шайхисламов И. Ф., Мирошниченко И.Б., Руменских М.С., & Ходаченко М.Л. (2019). Взаимодействие расширяющейся атмосферы со звездным ветром вокруг экзопланеты Gliese 436 b. Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы, 53(2), 147-154.
- 16 Мирошниченко, И. Б., Шайхисламов, И. Ф., Березуцкий, А. Г., Руменских, М. С., & Ветрова, Е. С. (2021). Влияние Lyα излучения родительской звезды на поглощение в линии Hα атмосфер горячих юпитеров HD189733B и HD 209458B. Астрономический журнал, 98(1), 66-74.

#### 2. Описание модели верхних слоев атмосфер горячих экзопланет

### 2.1. Атмосферы горячих экзопланет. Особенности численного решения уравнений газовой динамики

В моделировании частично ионизованной плазмы и происходящих в ней физических явлений применяются следующие три подхода: кинетический, гидродинамический и гибридный. Использование кинетического подхода наиболее оправдано в средах с относительно большой длиной свободного пробега, когда траектории частиц могут пересекать пространственные области с существенно отличными параметрами. Для количественного описания роли столкновений используется число Кнудсена: Kn=L/D, где L – длина свободного пробега частиц, а D – характерный размер системы. Таким образом, кинетический подход целесообразно использовать при Kn≥1. В столкновительных средах, то есть при Kn « 1, разумно использование поскольку гидродинамического подхода, ЭТО условие соответствует приближению сплошной среды. Для атмосфер горячих экзопланет ГД или МГД (в случае наличия магнитных полей) описание вполне оправдано. В то же время сложная динамика экзопланетарных атмосфер также включает взаимодействие со звездным ветром, который на орбите планеты является весьма разреженным, и, формально, подлежит кинетическому описанию. Однако заряженные частицы звездного ветра движутся подобно сплошной среде. двигаясь вместе С вмороженными магнитными полями, И взаимодействуют с планетарной плазмой, подобно двум жидкостям. Адекватность применения МГД для описания крупномасштабных структур разреженной бесстолкновительной плазмы хорошо обоснована на примере Солнечного Ветра. Дополнительные трудности возникают с описанием нейтральных частиц, которые попадают из относительно плотного планетарного ветра в разреженный звездный ветер и не взаимодействуют с

электромагнитным полем. По этой причине наиболее точным описанием нейтральных частиц в звездном ветре будет кинетическое.

Для учета сложной динамики заряженных и нейтральных частиц звездного ветра используются гибридные модели, включающие кинетическое и гидродинамическое описание согласованно. В таком подходе реализуется последовательное решение Лагранжевых кинетических и Эйлеровых (магнито)гидродинамических уравнений в нескольких параллельных циклах. Обычно легкие электроны рассматриваются как жидкость с газодинамическим описанием, а атомы или ионы – в кинетическом подходе [47-49], что позволяет сэкономить вычислительные мощности. Однако переход к гибридным моделям для моделирования атмосфер экзопланет не целесообразно по причине очень больших масштабов системы, которые превосходят кинетические на многие порядки величин. Потому даже частично кинетические модели не всегда оказываются применимыми, либо применимы только со значительными приближениями и упрощениями.

Горячие экзопланеты характеризуются близостью расположения к родительской звезде. В данной работе для определенности мы ограничимся системами в следующем диапазоне параметров:  $Mp \ge 0.25 \cdot M_J$ ,  $Dp \le 0.1$  AE, где Dp - длина малой полуоси орбиты планеты. С точки зрения наблюдательных возможностей интерес представляют именно транзитные экзопланеты. В этом случае должно удовлетворяться также следующее условие на угол наклонения орбиты планеты к оси наблюдения:

$$\alpha \geq 90^{\circ} - \arcsin \frac{R_* + R_P}{D_P}$$

Показателем размера планет является фотометрический радиус – расстояние, на котором излучение звезды поглощается на всех доступных длинах волн. Далее под радиусом горячих экзопланет будет подразумеваться именно фотометрический. Кроме того, стоит отметить, что в данной работе в качестве атмосферы будет подразумеваться термосфера - слой атмосферы, в котором
поглощается XUV излучение за счет фотоионизации газа и происходит нагрев. При экспоненциальном нарастании плотности вещества такое поглощение прекращается на определенной высоте, до которой XUV излучение уже не доходит.

Основы численной модели были положены в работе [50], в которой исследовался механизм объединения волн в космической плазме в рамках МГД трехжидкостной модели. Для исследования динамики ионов плазмы применялись классические уравнения магнитной газовой динамики в Эйлеровой системе координат. Численное решение этих уравнений проводилось методом конечных объемов, подробно описанном в ряде тематических учебников и методических пособий, например в труде [51]. В учебнике [52] приведен наиболее полный обзор численных методов, применяющихся для моделирования явлений в космической плазме, а также подробно описаны схемы, использующиеся для их реализации.

Основной источник истечения планетарного вещества – нагрев водородной атмосферы звездным XUV излучением с образованием электронов с энергией  $h\nu - E_{ion,i}$  и его внедрение в математическую модель, а также прочие источники нагрева и охлаждения подробно описаны в ряде работ, посвященных динамике атмосфер горячих экзопланет [53-57].

Поглощение XUV излучения описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\mathrm{d}W_{\mathrm{XUV}}}{\mathrm{d}\lambda} = \sum_{j} n_{j}(r) \cdot \sigma_{j}(\lambda) \cdot (h\nu - E_{\mathrm{ion},j}) \cdot \Phi_{\lambda} \cdot e^{-\tau}$$
(2.1.1)

$$S_{XUV,j} = \mathbf{n}_{j}(\mathbf{r}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_{j}(\boldsymbol{\lambda}) \cdot \boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \mathbf{e}^{-\int_{\mathbf{r}_{e}}^{\mathbf{r}} \mathbf{n}(\mathbf{l})\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\lambda})d\mathbf{l}}$$
(2.1.2)

Где  $\tau = \int n_j(l)\sigma_j(\lambda)dl$  - оптическая толщина атмосферы на длине волны  $\lambda$ , W<sub>XUV</sub> - поглощаемая энергия в единичном интервале длин волн в единице объема в секунду, переходящая в энергию фотоэлектронов, S<sub>XUV,j</sub> - объемная скорость фотоионизации, а  $\Phi_{\lambda}$ -поток фотонов с энергией h $\nu$  в ед. интервале длин волн (см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>A<sup>-1</sup>). Поглощение разными элементами **j** будет происходить на различных длинах волн и на разных высотах, в зависимости от потенциала ионизации и сечения. Поскольку сечение падает с энергией как E<sup>3</sup>, то более энергичные фотоны поглощаются в более плотных слоях атмосферы. Фотоны с длиной волны ~10 Å полностью поглощаются при интегральном содержании атомов водорода nL~10<sup>23</sup> см<sup>-2</sup>. При характерной шкале высот 10<sup>8</sup> см концентрация значительного поглощения всего XUV излучения составляет n<sub>H</sub>~10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>. Таким образом, концентрация на нижней границе верхней атмосферы должна быть не менее этой величины. В противном случае, результаты численного моделирования будут зависеть от положения нижней границы [58]. Для более глубоких слоев атмосферы характерны иные механизмы поглощения излучения в диапазоне >912 A, в основном в молекулярных линиях. Такие слои атмосферы моделируются другими подходами, например GCM (Global Circulation Models, [59]).

Для описания верхних слоев атмосфер горячих экзопланет наиболее подходящими оказываются уравнения газовой динамики, которые с соответствующими членами-источниками можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}n_{j} + \nabla (V_{j}n_{j}) = S_{XUV,j-1} + n_{j+1}n_{e}\gamma_{rec,j+1} + n_{j-1}n_{e}V_{Te}\sigma_{ion,j-1}$$
$$-S_{XUV,j} - n_{j}n_{e}\gamma_{rec,j} - n_{j}n_{e}V_{Te}\sigma_{ion,j}$$
(2.1.3)

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}_{j} + (\mathbf{V}_{j} \nabla) \mathbf{V}_{j} = -\frac{1}{\rho_{j}} \nabla \mathbf{n}_{j} \mathbf{k} \mathbf{T}_{j} - \frac{\mathbf{Z}_{j}}{\rho_{j}} \mathbf{n}_{e} \mathbf{k} \mathbf{T}_{e} + \nabla \mathbf{G} - 2\mathbf{V}_{j} \times \Omega - \Sigma \mathbf{C}_{ji}^{V} (\mathbf{V}_{j} - \mathbf{V}_{i}) - \beta G \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}_{st}}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_{st}|^{3}}$$
(2.1.4)

$$\frac{\partial}{\partial t}T_{j} + (V_{j}\nabla)T_{j} + (\gamma - 1)T_{j}\nabla V_{j} = \Sigma C_{ji}^{T}(T_{i} - T_{j}) - C_{je}^{T}(T_{j} - T_{e})$$
(2.1.5)

$$\frac{\partial}{\partial t}T_{e} + (V_{e}\nabla)T_{e} + (\gamma - 1)T_{e}\nabla V_{e} = W_{XUV} + \Sigma C_{je}^{T}(T_{j} - T_{e}) - W_{cool}$$
(2.1.6)

В уравнении (2.1.3) учтены процессы фотоионизации слагаемым  $S_{XUV,i}$  - объемная скорость фотоионизации из уравнения (2.1.2), а также рекомбинации и ударной ионизации, приводящие к изменению ионного состояния элементов. В уравнении (2.1.4) включена сила Кориолиса ( $2V_j \times \Omega$ ) и столкновительный обмен импульсами между частицами. В уравнениях (2.1.5) и (2.1.6) учтены процессы столкновительного обмена энергии между частицами, включая электроны, а также нагрев фотоэлектронами, за который отвечает слагаемое  $W_{XUV}$  - поглощаемая энергия в единичном интервале длин волн в единице объема в секунду, описанное в уравнении (2.1.1).

Поскольку сила радиационного давления направлена (со знаком минус) и зависит от расстояния так же, как гравитационное притяжение звезды, то ее действие можно функционально записать в виде последнего слагаемого в уравнении (2.1.4) [60], где  $\beta$  - отношение силы радиационного давления на частицу к силе гравитации, R – радиус вектор частицы, R<sub>st</sub> – радиус вектор до звезды. Предполагается квазинейтральность плазмы, n<sub>e</sub>= $\sum z_j n_j$ .

Устойчивость схемы обеспечивается выбором глобального шага интегрирования по времени с выполнением условия Куранта

$$\max\left(\frac{\Delta t \cdot V_j}{\Delta x}\right) \le 0.25$$

Для обеспечения второго порядка точности по пространству численное решение уравнений гидродинамики в коде реализовано на двух сетках, смещенных на полшага относительно друг друга. На одной сетке вычисляются плотность, температура и гравитационный потенциал, а на второй - скорости. Для достижения точности второго порядка по времени код на каждом временном шаге сначала вычисляет значения плотности и температуры, используя поле скоростей из предыдущего временного шага, а затем пересчитывает скорость, используя новые значения плотности и температуры. В пространственной сферической сетке используется равномерный шаг по азимутальному углу. Шаг по азимуту, из соображений достаточного разрешения при минимальных затратах, берется  $\Delta \phi = 0,065$ , что соответствует 96 равноудаленным точкам по всей окружности. В радиальном направлении шаг сетки изменяется линейно с радиусом следующим образом:

 $\Delta r_{\min} + (\Delta r_{\max} - \Delta r_{\min}) \times (r - Rp) / (R_{\max} - Rp),$  где  $\Delta r =$  $\Delta r_{min}$ принимается на поверхности планеты достаточно малым, чтобы разрешить шкалу высот атмосферы, примерно Rp/400, а  $\Delta r_{max} = \Delta \phi \cdot R_{max}$ . Следовательно, в ударной области при ~20Rp разрешение сетки составляет около Rp. Шаг сетки, определяемый формулой (4), является сильно неравномерным, особенно вблизи планеты и меняется от 0.0025÷0.01 Rp в плотных слоях атмосферы с тем чтобы не превышать барометрическую шкалу высот, до ~0.1÷1 Rp в области ударного взаимодействия термосферы и звездного ветра. Для полярного угла шаг сетки тоже неравномерный для уменьшения эффекта «сферического уплотнения», и определяется как  $\Delta \theta = \Delta \theta_{\min} \times i + \alpha \cdot i^2 c$ минимальным шагом Δθ<sub>min</sub> в экваториальной плоскости. Параметры і и α обычно выбирают так, чтобы на экваторе  $\Delta \theta = \Delta \theta \min = \Delta \phi$ , а на полярной оси  $\Delta \theta \geq 2 \Delta \phi$ . Отметим, что применяемый радиальный шаг в сферической системе координат позволяет сохранить одинаковое разрешение во всех трех измерениях, если азимутальный и широтный шаги выбраны так, что  $\Delta \phi \approx \Delta \theta$  $\approx \Delta r/r$ .

Отдельно стоит упомянуть о частном случае уравнений 2.1.3-2.1.6, который используется для описания жидкостной среды – гидростатическом. Такой режим характеризуется главным образом отсутствием движения вещества, V=0. В этом случае уравнение 2.1.4 представляет собой условие гидростатического равновесия вещества:

$$\frac{1}{\rho_j} \nabla n_j kT_j + \frac{Z_j}{\rho_j} n_e kT_e = \nabla G$$

При гидростатическом равновесии атмосфера локализуется преимущественно вблизи фотометрического радиуса планеты. Горячие экзопланеты редко могут находиться в таком равновесии из-за сильного нагрева ионизующим излучение. Однако, в некоторых случаях баланс всех сил, даже для горячих экзопланет, реализуется в гидростатическом, а не гидродинамическом, режиме планетарной атмосферы. При гидродинамическом режиме формируется установившееся истечение планетарного вещества, которое уносит избыток энергии. В этом режиме планетарная атмосфера как правило заполняет всю полость Роша, и вступает во взаимодействие со звездным ветром на расстоянии нескольких планетарных радиусов.

Особенности взаимодействия плазменного окружения планет с излучением и порождают родительских специфические области, ветром звезд преобладающим в них соответствующие физическим процессам И характерным изменениям макроскопических параметров. Основной областью поглощения XUV излучения и появления ионизации газа являются термосфера. Нижняя граница термосферы – гомопауза – определяется малым атмосферы турбулентного В динамику перемешивания, вкладом превалирующего в нижних слоях атмосферы. В термосфере также важны процессы ИК охлаждения и фотохимии. После термосферы следует верхняя атмосфера, где газ становиться в значительной степени ионизованным, и ускоряется до сверхзвуковых скоростей. На расстоянии, где высота атмосферы становится сравнимой со средним расстоянием свободного пробега, находится экзобаза, выше которой расположена экзосфера.

Скорость частиц в экзосфере может определяться рядом нетепловых процессов, что характерно для планет Солнечной системы. Основными источниками надтепловых частиц в атмосферах и магнитосферах планет являются:

• Фото-ионизация и диссоциация атомов и ионов атмосферы

41

- Перезарядка нейтральных атомов атмосферы на протонах звездного ветра
- Экзотермические химические реакции

Все эти процессы могут иметь место в атмосферах горячих экзопланет, а потому учет их роли важен для моделирования динамики верхних атмосфер. Расчеты, кинетическими моделями Монте-Карло [61] показали, что вклад нетепловых процессов в моделирование динамики верхних атмосфер горячих экзопланет может давать вклад до десятков процентов в общее тепловое истечение атмосферы [62-64].

Динамика атмосфер экзопланет тесно связана с составом атмосферы. Например, в случае низких слоев атмосферы, которые представлены преимущественно молекулярным водородом, шкала высот оказывается в 2 раза меньшей, нежели для атомарного водорода, из которого в основном состоят более высокие слои атмосферы. Мягкое рентгеновское излучение также проникает в нижние слои атмосферы, что приводит к процессам диссоциации и нагрева. Кроме того, под воздействием ионизующего излучения в водородной атмосфере происходят реакции, способные повлиять на динамику верхних слоев атмосферы. В таблице 2 приведен список химических реакций, протекающих в горячих экзопланет с преимущественно водородной атмосферой. Также указан относительный вклад каждой реакции в истечение атмосфер экзопланет: «+» означает, что вклад существенный; «-» означает отсутствие вклада, а «-+» - «вклад малозначительный».

Реакция	Результат	Скорость	Значимость	Источник
$H + \hbar v$	$\mathrm{H}^{+} + e$	$\sigma_{\rm o}=6.3\cdot10^{-18}$	+	
$H_2 + \hbar v$	$\mathrm{H}_{2}^{+}+e$	$\sigma_{\rm H2} \approx (2 \div 2.5) \sigma_{\rm H}$	+	[65]

H + e	$H + e + \hbar v$	$2.9 \cdot 10^{-19} \mathrm{T}^{-0.5} \mathrm{e}^{-11.84/\mathrm{T}}$	_+	[66]
H + e	$\mathrm{H}^{+}+2e$	$7.3 \cdot 10^{-9} \mathrm{T}^{0.5} \mathrm{e}^{-15.776/\mathrm{T}}$		[67]
$\mathrm{H}^{+} + e$	$H + \hbar v$	$2.5 \cdot 10^{-13} \mathrm{T}^{-0.75}$	_+	UMIST
$\mathrm{H}_{2}^{+}+e$	2H	$3.5 \cdot 10^{-9} \mathrm{T}^{-0.43}$	_	UMIST
$\mathrm{H}_{3}^{+}+e$	$H_2 + H$	$4 \cdot 10^{-9} \mathrm{T}^{-0.5}$	+	UMIST
$\mathrm{H}_{3}^{+}+e$	3Н	$7.6 \cdot 10^{-9} \mathrm{T}^{-0.5}$	+	UMIST
$H_{2}^{+} + H_{2}$	$H_{3}^{+} + H$	$2.1 \cdot 10^{-9}$	+	UMIST
$H_{3}^{+} + H$	$H_{2}^{+} + H_{2}$	$2.1 \cdot 10^{-9} e^{-1.99/T}$		UMIST
$H_2^+ + H$	$H^+ + H_2$	$6.4 \cdot 10^{-10}$	+	UMIST
$H^+ + H_2$	$H_2^+ + H$	$2.1 \cdot 10^{-9} e^{-2.124/T}$	+	[68]
$H_2 + H$	3Н	$1.4 \cdot 10^{-8} \mathrm{T}^{-1} \mathrm{e}^{-8.41/\mathrm{T}}$	+	UMIST
$H_{2} + H_{2}$	$H_2 + 2H$	$1.4 \cdot 10^{-8} e^{-8.41/T}$		UMIST
$H_{2} + 2H$	$H_2 + H_2$	$9.5 \cdot 10^{-35} \mathrm{T}^{-1.3}$		[69]
$H^+ + 2H_2$	$H_{3}^{+} + H_{2}$	$3.2 \cdot 10^{-29}$	_	[70]

Таблица 2.1.1. Реакции водородной химии. Значения скорости реакций (Зй столбец слева) указаны в единицах сгс, температура в единицах 10<sup>4</sup> К. Источник: UMIST database: <u>http://udfa.ajmarkwick.net/</u>

 $(W_{cool},$ уравнение 2.1.6) подчас Процессы охлаждения оказываются критическими для динамики атмосфер. Помимо адиабатического, существуют механизмы охлаждения, основанные на фотохимических реакциях, молекулярных диссоциациях, а также переизлучательных процессах. Среди вышеупомянутых, наибольшее значение в контексте атмосфер экзопланет имеет процесс охлаждения за счет возбуждения атома водорода и излучения Lyα-фотона [71] последующего И охлаждение за счет инфракрасного излучения иона Н<sub>3</sub><sup>+</sup>.

43

Охлаждение за счет эмиссии Lyα-фотонов имеет сложный характер, поскольку оно происходит в плотных слоях, где эти фотоны имеют маленькую длину пробега. В результате Lyα-фотоны покидают атмосферу после большого количества актов резонансного поглощения и переизлучения. Поэтому точный учет охлаждения за счет эмиссии Lyα фотонов требует решения кинетических уравнений их транспорта.

Другой важный процесс – это инфракрасное излучение иона  $H_3^+$ , хорошо известное из исследований верхних атмосфер Юпитера и Земли [72]. Было обнаружено, что ион  $H_3^+$ , образующийся в областях с молекулярным водородом, приводит к значительным потерям энергии из-за излучения в огромном количестве перекрывающихся уровней – инфракрасном континууме. Для скорости охлаждения в модели используется результат расчета [72], которые впервые учли снижение общего излучения  $H_3^+$  в зависимости от плотности  $H_2$  в рамках не-ЛТР подхода.

Структура экзопланетарных атмосфер в существенной степени зависит от взаимодействия не только с излучением, заданным в слагаемом  $W_{XUV}$  уравнения (2.1.6), но также и с ветром родительской звезды. Таким образом, адекватная модель должна включать Звездный Ветер (ЗВ) и вычислять как поток ЗВ, так и ПВ и взаимодействие между ними в рамках одного кода. Относительно детальные сведения о ЗВ мы можем черпать из данных о Солнечном Ветре (СВ). В проблеме моделирования СВ есть ряд нерешенных принципиальных вопросов. Главный из них состоит в том, как поток плазмы с Солнца нагревается и ускоряется на расстояниях 1-10 Солнечных радиусов – так называемой зоне ускорения СВ.

Для самосогласованного описания области, включающей звезду и планету, в коде выполняется также расчет звездного ветра. Условная поверхность, от которой происходит разлет ветра - звездная корона - рассматривается в качестве одного из граничных условий, на которой устанавливаются

фиксированные значения характерных величин. В 3D гидродинамической модели для описания звездного ветра используются свободные параметры, определяющие звездный ветер:  $\dot{M}_{SW}$ – интегральное значение скорости потери массы звездного вещества, V <sub>sw,∞</sub> - асимптотическая скорость течения, а также температура короны  $T_{cor}$ . Для учета динамики протонов звездного ветра используются те же уравнения, что и для расчета планетарного ветра, с эмпирическим слагаемым, учитывающим процессы нагрева звездной плазмы в зоне ускорения. Проблематика нагрева и ускорения звездного ветра, которой посвящено отдельное направление в физике плазмы, выходит за рамки настоящей работы. Для эмпирического учета этих процессов мы используем подход, основанный на известном политропном решении:

$$W_{SW}(r) = (\gamma_a - \gamma_p) \cdot T_p(r) \cdot divV_p(r)$$

Член W<sub>SW</sub> нагрева 3В выражается через Тр и Vp – решения политропного уравнения ([73], обобщенное решение Паркера), γ<sub>a</sub>=5/3 – показатель адиабаты, и показатель политропы 1≤γ<sub>p</sub>< γ<sub>a</sub>. Любой показатель политропы меньше адиабатического вносит в уравнение энергии эффективный источниковый член, который чисто математически заменяет реальные физические процессы нагрева 3В.

В численном моделировании все величины и уравнения приводятся к безразмерной форме. Обезразмеривание происходит по простой схеме:  $f \rightarrow f_0 \bar{f}$ , где f– исходная размерная величина, f<sub>0</sub>–характерный размерный масштаб, и  $\bar{f}$  – безразмерный аналог. В качестве характерного размерного масштаба расстояния в случае моделирования атмосфер экзопланет выбирают расстояние от планеты до звезды, радиус планеты или звезды, или иной масштаб, достаточно большой и неизменный относительно прочих параметров. В нашей модели основные физические параметры и результаты моделирования масштабируются в следующих единицах характерных величин: температура  $T_0 = 10^4$  К и соответствующая ей скорость протонов

скорость  $V_0 = V_{\text{тепл}} = (kT_0/m_p)^{1/2} = 9.07 \text{ км/c}$ ; расстояние  $R_0$  в радиусах планеты  $R_p$ ; соответствующее газодинамическое время течения  $t_o = R_o / V_o$ . Выбор температуры обусловлен характерным температурным максимумом термосферы, который слабо меняется для разных горячих экзопланет. Стационарное решение ищется с критериями сходимости, определяемыми как достижение асимптотических величин, например, интегрального потока планетарного вещества на внешней границе расчетной области, достигающее на менее (1-5)% от предельного значения. Обычно для достижения стационарного состояния требуется несколько сотен безразмерных времен (~10<sup>6</sup> численных итераций) после начала нагрева планеты XUV излучением.

Границы расчетной области задаются свободными для вытекания вещества. Внутренними границами являются фотометрические радиусы планеты и звезды. На поверхности планеты задаются фиксированными температура, давление, относительное содержание элементов и нулевая скорость движения. На границе звезды температура, скорость и плотность плазмы задаются из выбранного политропного решения. Интенсивности радиационных характеристик звезды, таких как XUV излучение, поток излучения в определенных линиях, задаются для простоты сравнения различных систем на едином условном расстоянии – одной астрономической единице.

Для более быстрой сходимости решения, начальные условия вблизи планеты и звезды задаются исходя из барометрического равновесия в отсутствие движения вещества:

$$\frac{1}{\rho}\nabla P = \nabla \Phi$$

## 2.2. Особенности численного решения уравнения переноса излучения в атмосферах горячих экзопланет

При описании процессов движения в атмосфере, состоящей из нескольких элементов, корректно описывать их движение в многожидкостном подходе, решая систему уравнений (2.1.3)-(2.1.6) для каждой из компонент отдельно. Такие жидкости могут иметь различные распределения скоростей, плотностей и температур, что непосредственным образом скажется на наблюдательных проявлениях. Помимо Допплеровских эффектов, таких, как уширение и смещение спектральных линий поглощения потоками различных веществ, могут иметь место другие, чисто многожидкостные, эффекты. Яркий тому пример - сильное синее смещение поглощения в линии Lyα, обусловленное не движением планетарного вещества, а генерацией ЭНА при перезарядке быстрых протонов звездного ветра на относительно медленных атомах планетарной атмосферы. Также необходимо корректно задавать элементный состав нижней атмосферы планеты. В нашей модели в качестве отдельных жидкостей рассчитываются следующие компоненты:  $H_2$ , H,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H^+$ , He, He<sup>+</sup>, He<sup>2+</sup>. Дополнительно в случае расчета соответствующих линий поглощения, добавляются элементы О, С и другие металлы разной степени ионизации.

Для определения поглощения в различных спектральных линиях необходимо располагать информацией об эмисионном спектре звезды в данной линии. Кроме того, в силу существенного влияния фотоионизационных процессов нужно знать распределение излучения родительской звезды также и в области ультрафиолета и мягкого рентгена, что уже является нетривиальной задачей. Дело в том, что коротковолновое излучение звезд полностью поглощается межзвездным веществом, а потому для моделирования атмосфер экзопланет приходится использовать модельные спектры звезд. Такие спектры обычно восстанавливаются в рамках хромосферно-корональных моделей звезд исходя из измеряемого потока в жестком рентгене и вакуумном ультрафиолете (ВУВ), включая линию Lyα [74].

Сечение поглощения в рассматриваемых условиях определяется Фойгхтовским профилем Н - сверткой распределения Максвелла частиц по скоростям и Лоренцевского профиля линии – по следующей формуле:

$$\sigma_{abs} = f_{12}\sqrt{\pi} \frac{e^2}{m_e c^2} \cdot \frac{c}{\Delta \nu_D} \cdot H = f_{12}\sqrt{\pi} \frac{e^2 \lambda_0}{m_e c^2} \cdot \sqrt{\frac{m_j c^2}{2kT}} \cdot H$$
(2.2.1)

Фойгхтовский профиль линии поглощения единичным атомом определяется следующим образом:

$$H = \frac{1}{\pi} \alpha \int \frac{e^{-y^2}}{(x-y)^2 + \alpha^2} dy$$
 (2.2.2)

Где  $f_{12}$  – сила осциллятора,  $\alpha = \Delta \nu_L / 2\Delta \nu_D = \frac{\Delta \nu_L}{\nu_o} \sqrt{\frac{m_j c^2}{8kT}}$ ,  $x = \frac{V - V_z}{\sqrt{\frac{2kT}{m_p}}}$ , Vz– скорость

вдоль луча зрения.

Для расчета оптических транзитных поглощения в рамках численной модели необходимо провести последовательное интегрирование вдоль луча зрения с учетом количества поглощающих атомов (оптической толщины)

$$\tau(\mathbf{V}) = \int_{\mathbf{L}}^{-\mathbf{L}} d\mathbf{z} \cdot \mathbf{n}_{\mathrm{H}} \cdot \sigma_{\mathrm{abs}}(\mathbf{V}, \mathbf{V}_{\mathrm{z}}, \mathbf{T})$$
(2.2.3)

и по диску звезды:

Absorption = 
$$1 - \frac{I_{\text{transit,v}}}{I_{\text{out,v}}} = \frac{1}{\pi R_{\text{St}}^2} \int (1 - e^{-\tau}) \cdot dS$$
 (2.2.4)

как видно из формулы (2.2.3), для определения поглощения в линии необходимо знать распределение, скорость и температуру поглощающего вещества вдоль луча зрения. Для расчета величин, необходимых для получения поглощения в линии метастабильного гелия решаются уравнения (2.1.3)-(2.1.6) с учетом реакций гелиевой плазмофотохимии (Таблица 3.1). Подробное описание уравнений и процессов, влияющих на заселенность уровня метастабильного гелия, будет приведено в следующей главе.

Перейдем к рассмотрению особенностей численного решения уравнения переноса излучения (2.2.4) и интерпретации оптических транзитных

поглощений в спектральных линиях. Как видно из формулы, решение этого уравнения требует взятия трех интегралов: по длине волны (2.2.2), расстоянию (2.2.3) и площади (2.2.4). Прямое вычисление будет слишком затратным. Однако существуют приближения, позволяющее избежать интегрирования в формуле (2.2.2), заменив его набором простых арифметических действий. В нашем случае используется приближение из [75]:

$$H \approx e^{-x^2} + \frac{\alpha}{x^2 \sqrt{\pi}} \cdot q(x^2)$$
 (2.2.5)

$$q(x^{2}) = \begin{cases} \frac{21 + x^{2}}{1 + x^{2}} \cdot z(x^{2}) \cdot [0.1117 + z(x^{2})[4.421 + z(x^{2}) \cdot (5.674 \cdot z(x^{2}) - 9.207)]], \\ z(x^{2}) \ge 0 \\ 0, \quad z(x^{2}) < 0 \\ z(x^{2}) = \frac{x^{2} - 0.855}{x^{2} + 3.42} \end{cases}$$

где

Формула дает погрешность менее 1% для температур более 1 К, что более чем удовлетворительно для наших целей. Таким образом, согласно формулам (2.2.1) и (2.2.5), сечение поглощения состоит из двух слагаемых, имеющих ясный физический смысл: резонансного Допплеровского и естественной ширины линии. Первое слагаемое связано с наличием резонансных атомов соответствующими доплеровски смещенным скоростям профиля линии, которые при типичной температуре порядка  $10^4$  К имеют поперечное сечение порядка  $10^{-13}$  см<sup>2</sup>. Второе слагаемое означает нерезонансное поглощение, образованное за счет естественной ширины линии (иногда называемое атмосферным уширением), связанное с дальними крыльями профиля линии Лоренца с гораздо меньшим поперечным сечением, которое при характерной скорости 10 км/с составляет порядка  $10^{-17}$  см<sup>2</sup>.

Поскольку регистрация излучения реализуется некоторой оптической системой, невозможно избежать ее влияния на наблюдательные проявления поглощения. Спектральный профиль, измеренный телескопом, является

сверткой реального сигнала поглощения и функцией уширения спектрографа (line-spread function, LSF). Эта функция описывает отклик прибора в виде распределение света в фокальной плоскости от монохроматического источника. Доминирующим эффектом в наблюдаемом спектре является уширение спектральных линий из-за конечного разрешения прибора. Сворачивая модельный спектр с бесконечным разрешением с COS LSF Hubble, можно воспроизвести инструментальные телескопа профили спектральных линий. Для проверки влияния аппаратных погрешноситей на спектры был реализован программный анализируемые алгоритм, воспроизводящий исходную спектральную кривую при помощи метода последовательных приближений. Результат работы алгоритма для линии Lya представлен на рисунке 2.2.1. Черными точками на рисунке обозначен спектральный профиль линии Lya [5] а красная кривая демонстрирует не искаженный аппаратной функцией оптического прибора спектр. Поскольку спектр был получен спектральным прибором телескопа с некоторой погрешностью (помимо LSF искажения), можно считать, что аппаратная функция спектрального прибора спектральный профиль искажает незначительно.



Рисунок 2.2.1. Измеренный профиль линии Lyα из работы [5] (черные точки), и восстановленный профиль, в котором удалено искажение LSF, полученный автором диссертации (красная линия)

## 2.3. Оптические транзитные поглощения в линии метастабильного гелия HeI(238)

Линия поглощения триплетного гелия HeI  $\lambda$ =1083 нм как инструмент для исследования атмосфер горячих экзопланет была предложена в работе [19]. В качестве примера был сделан расчет для планеты HD209458b. Уровень, при переходе с которого образуется данная спектральная линия, является метастабильным по следующей причине. Атом гелия может существовать в двух конфигурациях, основанных на относительной ориентации спина его электронов, синглетной (антипараллельной) и триплетной (параллельной). Нижний триплетный уровень (2<sup>3</sup>S) практически не связан с основным синглетным состоянием (1<sup>1</sup>S), так как излучательные переходы между ними сильно подавлены. Из-за релятивистских поправок и поправок конечной длины волны к формуле магнитного дипольного перехода триплетное состояние может радиационно распадаться в синглетное основное с исключительно большим временем жизни 2.2 часа [76].

Состояние  $2^{3}$ S может быть заселено рекомбинацией He+ со свободными электронами или столкновительным возбуждением из основного состояния (см. рисунок 2.3.1). Опустошение этого состояния происходит медленно, что делает его многообещающим источником для диагностики поглощения. Резонансный переход из метастабильного состояния  $2^{3}$ S в состояние  $2^{3}$ P дает линию поглощения  $\lambda$ =1083 нм. Этот переход состоит из трех линий, две из которых — 1083.034 нм и 1083.025 нм — практически неразличимы на фоне различных уширений, а третья компонента находится на 1082.909 нм и хорошо разрешается современными инструментами.

Анализ линии поглощения триплетного гелия HeI λ=1083 нм для исследования атмосферы экзопланет типа «горячих юпитеров» или «теплых нептунов» методом оптических транзитных измерений было предложено относительно недавно в работе [20]. Выбор этой спектральной линии был продиктован тем,

что излучение звезд в этом диапазоне достаточно интенсивное, чтобы быть детектируемым наземными устройствами, и не подвержено поглощению как в межзвездной среде, так и в атмосфере Земли. Накачка метастабильного уровня гелия определяется в основном локальной температурой и степенью ионизации планетарного вещества. По обозначенным выше причинам поглощение в триплете дает информацию о слоях термосферы на высотах нескольких радиусов планеты, т.е. в области интенсивного нагрева и ускорения плазмосферы.

Переходы в атоме гелия можно разделить на следующие типы: столкновительные, излучательные и автоинизационные. К излучательным относятся также рекомбинационные переходы – ключевые в населении метастабильного уровня.

Балансные уравнения, описывающие переходы между состояниями гелия, записываются следующим образом:

 $\frac{\partial}{\partial t}f_1 + \nabla(V_{f1}f_1) = (1 - f_1 - f_3) n_e \alpha_1 + f_3 A_{31} - f_1 \Phi_1 e^{-\tau 1} - f_1 n_e q_{13a} + f_3 n_e q_{31a} + f_3 n_e q_{31b} + f_3 n_{Ho} Q_{31}$ 

$$\frac{\partial}{\partial t}f_3 + \nabla(V_{f3}f_3) = (1 - f_1 - f_3) n_e \alpha_3 - f_3 A_{31} - f_3 \Phi_3 e^{-\tau 3} + f_1 n_e q_{13a} - f_3 n_e q_{31a} - f_3 n_e q_{31b} - f_3 n_{Ho} Q_{31}$$

где f<sub>1</sub> и f<sub>3</sub> - фракции синглетного (основного, 1<sup>1</sup>S) и триплетного (2<sup>3</sup>S) гелия, A<sub>31</sub> – коэффициент излучательного перехода из метастабильного состояния в основное, Q<sub>31</sub> – коэффициент переходав основное состояние засчетавтоинизационных столкновений с атомами и молекулами водорода, q<sub>ij</sub> – коэффициент перехода насинглетные уровни 2<sup>1</sup>S (q<sub>31a</sub>) и 2<sup>1</sup>P (q<sub>31b</sub>) за счет столкновений с электронами, n<sub>e</sub> – плотность электронов, Ф<sub>i</sub>e<sup>-тi</sup> – коэффициент фотоионизации с учетом оптической толщины, а коэффициент α отвечает за рекомбинацию с электронами. Сечение этого процесса зависит от энергии уровня, на который произойдет распад, а также от макроскопической температуры. Для температурной зависимости можно использовать T<sup>-0.75</sup> [77]. Аналитически аппроксимацию вида рассчитанные И экспериментально коэффициенты рекомбинации подтвержденные для различных температур и переходов представлены в [78]. Фотоионизация HeI(2<sup>3</sup>S) рассчитывается с использованием зависящего от энергии сечения [78], интегрированного по спектру излучения звезды. Отметим, что в приведенных уравнениях не представлены столкновительные процессы, вклад которых невелик по сравнению с приведенными, в частности, электронное девозбуждение на основное состояние.

### 2.4. Основные выводы к главе 2

Процессы, происходящие в верхних атмосферах горячих экзопланет, и определяющие поглощение в различных спектральных линиях, являются комплексными и сложными для интерпретации. Для их описания необходимо решать систему газодинамических уравнений с учетом фото-плазмо-химии (аэрономии) составляющих элементов. Аналитическое описание атмосфер горячих экзопланет и оптических транзитных поглощений оказывается невозможным. Только комплексное самосогласованное численное трехмерное моделирование является надежным инструментом для интерпретации оптических транзитных поглощений горячих экзопланет и описания процессов, происходящих при взаимодействии атмосфер экзопланет с излучением и ветром родительских звезд.

### 3. Особенности формирования метастабильного уровня гелия в атмосферах горячих экзопланет

Заселенность метастабильного уровня гелия обусловлена рядом газодинамических и кинетических процессов, потому поглощение в линии 1083 нм существенно зависит от параметров среды. В атмосферах экзопланет выделяются следующие характерные области взаимодействия планетарного вещества с излучением и ветром родительской звезды: термосфера, область планетарного ветраи область взаимодействия планетарного и звездного ветров, включая ударный слой. Первая область характеризуется высокой концентрацией нейтральных частиц, вторая – электронов, и относительно высокой температурой (~1 эВ) и скоростью течения (~10 км/с) планетарного вещества. Третья область характеризуется параметрами звездного ветра высокой температурой (~100 эВ) и скоростью (~100 км/с). Из-за различных условий, характерных для данных областей, процессы, ответственные за заселение и расселение метастабильного уровня гелия, будут существенно разными.

Рекомбинационные процессы протекают наиболее интенсивно в области высокой концентрации электронов и ионов. В свою очередь ионы гелия образуются за счет фотоионизации атомов гелия. При фотоионизации водорода и гелия также образуются электроны. Максимальная концентрация электронов достигается на типичной высоте термосферного максимума температуры, обычно на расстоянии 2Rp, и составляет величину 10<sup>7</sup>-10<sup>9</sup> см<sup>-3</sup>. В ударной области ионов гелия как правило существенно меньше, поскольку ионы планетарного происхождения практически не проникают через контактный разрыв, разделяющий планетарную и звездную плазму. Однако туда могут проникать нейтральные частицы, в том числе атомы гелия. В контексте поглощения излучения в линии метастабильного гелия это важно, поскольку начинает играть роль прямое электронное возбуждение с основного состояния на метастабильный уровень. Основное условие осуществления

этого процесса – высокая энергия электронов (≥20 эВ), что характерно для звездного ветра. Таким образом, заселение метастабильного 2<sup>3</sup>S уровня в области ударного взаимодействия происходит за счет электронного удара. При этом конкурирующим процессом является ударная ионизация, в результате чего по мере отдаления от контактного разрыва концентрация атомов гелия быстро уменьшается.



Рисунок 3.1. Структура энергетических уровней гелия с обозначениями процессов перехода.

Реакция	Скорость при	Ссылки
	$T=10^{4} K$	
1) $\operatorname{He}(2^{3}S) \rightarrow \operatorname{He}(1^{1}S) +$	$1.27 \cdot 10^{-4} s^{-1}$	[75]
hv		
2) $He(2^{3}S) + hv \rightarrow He^{+}$	$10^{-3}s^{-1}$	[78]
$3) \operatorname{He}(2^{3}S) + e \rightarrow$	$2.68 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[79]
$He(2^1S)$		
4) He(2 <sup>3</sup> S) + e $\rightarrow$	$9.99 \cdot 10^{-8} \mathrm{cm^3  s^{-1}}$	[79]
$He(2^{1}P)$		

5) He(2 <sup>3</sup> S) + e $\rightarrow$	$2.06 \cdot 10^{-7} \mathrm{cm^3  s^{-1}}$	[79]
$He(3^{3}S)$		
6) He(1 <sup>1</sup> S) + e $\rightarrow$	$1.21 \cdot 10^{-8} \mathrm{cm^3  s^{-1}}$	[79]
$He(2^{3}S)$		
7) $He(2^{3}S)+H \rightarrow He+H^{+}$	$4.54 \cdot 10^{-9} \mathrm{cm}^3 \mathrm{s}^{-1}$	[80]
8) He(2 <sup>3</sup> S)+H <sub>2</sub> $\rightarrow$	$4.54 \cdot 10^{-9} \mathrm{cm}^3 \mathrm{s}^{-1}$	[80]
He+H+H <sup>+</sup>		
9) $\operatorname{He}^{+}(1S) + e \rightarrow \operatorname{He}(2^{3}S)$	$2 \cdot 10^{-13} \text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[77]

Таблица 3.1. Реакции, участвующие в заселении и расселении уровня метастабильного гелия HeI(2<sup>3</sup>S), скорости их протекания (второй столбец) и источники сведений об этих реакциях

Как можно увидеть из представленных в Таблице 3.1. реакций, заселение метастабильного уровня гелия 2<sup>3</sup>S и, соответственно, поглощение в линии 1083 нм на переходе  $2^{3}$ P- $2^{3}$ S, происходит в основном за счет двух процессов: рекомбинации ионов с электронами (реакция 9), протекающие преимущественно в термосфере, и ударного возбужденияиз 1<sup>1</sup>S состоянии электронами ЗВ В экзосфере. Этим процессам высокоэнергичными противостоят автоионизационные столкновения (реакции 7 и 8), в результате возбуждение которых передается атомам И молекулам водорода, фотоионизация (реакция 2), а также столкновения степловыми электронами, приводящие к передаче возбуждения на синглетные подуровни 2<sup>1</sup>Ри 2<sup>1</sup>S. Интенсивность протекания этих реакций зависит от температуры и концентрации частиц, которые значительно изменяются по высоте. Что касается естественного времени жизни метастабильного уровня гелия  $HeI(2^{3}S)$ , обусловленного излучательным распадом на  $1^{1}S$  подуровень, то оно оказывается на несколько порядков больше, чем время жизни за счет столкновений с частицами планетарной атмосферы, или фотоионизации излучением родительской звезды. Таким образом, реальное время жизни

метастабильного уровня гелия обусловлено рядом физических и химических процессов, и варьируется от планеты к планете.

Рассмотрим более подробно указанные выше процессы по мере движения от плотных слоев верхней атмосферы до ударного слоя. При анализе первых результатов измерений предполагалось, что поглощение происходит в основном в плотных слоях атмосферы, где содержание атомов гелия нарастает экспоненциально [82]. Скорость таких слоев достаточно малая (<3 км/с), и, соответственно, ширина профиля поглощения, вызванного Допплеровским уширением, должна быть порядка этой величины. Однако первое измерение в триплетной линии метастабильного гелия (НАТ-Р-11b) показало уширение более 10 км/с, что свидетельствовало о такой скорости поглощающего планетарного вещества, которую трудно ожидать для прилегающих к фотометрическому радиусу областей планеты. Впоследствии выяснилось, что в плотных слоях атмосфер метастабильный уровень гелия очень быстро расселяется в столкновениях с нейтральными частицами (реакции 7 и 8 из Таблицы 3.1). Именно из-за этого процесса поглощение в линии 1083 нм происходит на высотах>0.2Rp и зондирует верхнюю атмосферу горячих экзопланет.

Далее в термосфере, на высоте ~1 Rp, где плотности падают до 10<sup>10</sup> см<sup>-3</sup>, излучения происходит интенсивное поглощение ионизующего XUV родительской звезды. В результате термосфера оказывается заполненной свободными электронами, образованными при ионизации водорода и гелия. Рекомбинация ионов гелия с электронами является наиболее эффективным процессом заселения метастабильного уровня гелия (около  $\frac{3}{4}$ рекомбинирующих электронов попадают на уровень 2<sup>3</sup>S), а потому поглощение в линии 1083 нм происходит в основном в термосфере.

Помимо спектрального диапазона XUV, фотоны которого имеют достаточно энергии для взаимодействия с атомами в основном состоянии, есть еще один важный диапазон, влияющий на заселенность метастабильного уровня гелия –

VUV. Для фотоионизации возбужденного уровня HeI(2<sup>3</sup>S) необходимы фотоны с длиной волны короче 260 нм. Таким образом, расселение метастабильного уровня гелия за счет фотоионизации может быть важным для звезд с высоким уровнем VUV излучения. Стоит отметить, что скорость процессов фотоионизации не зависит от плотности или состава атмосферы, и остается неизменной на всех высотах.

Помимо автоионизации, существует еще один важный канал расселения метастабильного уровня гелия – столкновения с тепловыми электронами. Этот процесс требует электронов с энергией ~1 эВ, что соответствует характерной температуре термосферы. Столкновения метастабильных атомов гелия с электронами, образовавшимися в слоях повышенного поглощения ионизующего излучения родительской звезды, приводят кпрактически равновероятному переходу на синглетные уровни  $2^{1}$ S и  $2^{1}$ P, и являются основными механизмом девозбуждения HeI( $2^{3}$ S). При этом возбужденные синглетные состояния быстро релаксируют через излучательный переход в основное состояние  $2^{1}$ P- $1^{1}$ S.

Есть еще некоторые столкновительные процессы девозбуждения уровня  $HeI(2^{3}S)$ , которые, однако, вносят гораздо меньший вклад, по сравнению с рассмотренными. Переход  $2^{3}S-1^{1}S$  имеет малое сечение, переход  $2^{3}S-3^{3}S$  требует энергии электронов, заметно большей, чем в процессе  $2^{3}S-2^{1}S$ , переход на уровень  $2^{3}P$  заканчивается быстрым обратным радиационным переходом.

Процессы ударного возбуждения уровня 1<sup>1</sup>S-2<sup>3</sup>S могут происходить только в области звездного ветра, поскольку требуют электронов с энергией выше 19.8 эВ. Однако в этой области концентрация атомов гелия существенно меньше, чем в термосфере, и поэтому роль этого процесса оказывается значительной только для единичных систем.

Для демонстрации перечисленных ранее явлений будут использованы профили характерных величин и скоростей реакций различных планетарных систем, таких, как HD189733b, HD209458b, Wasp69b, GJ436b, GJ3470b и Wasp107b. Рассмотрение широкого ряда экзопланет позволяет отследить закономерности, влияющие на формирование метастабильного уровня гелия с одной стороны и выявить влияние тех или иных особенностей планетарных систем на поглощение в линии 1083 нм с другой.

#### 3.1. Оптические транзитные поглощения «горячего юпитера» HD189733b

«Горячий юпитер» HD189733b выделяется среди остального множества экзопланет своей высокой массой. Например, хорошо известный Осирис (HD209458b) в два раза легче, чем HD189733b. Эта планета вращается вокруг оранжевого карлика, HD189733A, входящего в двойную звездную систему. Звезда обладает признаками повышенной активности [83], что существенно повлияло на детектирование транзитных поглощений в водородной линии Lya, которое показало значительные отличия в разные сессии наблюдений. При этом наблюдения в линии метастабильного гелия, проведенные в разное время ([24], [25]) показали поглощения на уровне ~1%, с отличием около полутора раз, что вполне объяснимо естественными вариациями XUV излучения звезды.

Экзопланета HD189733b является хорошо изученным объектом. С достаточной точностью известны масса и радиус самой планеты и ее родительской звезды, температура поверхности, и некоторые спектральные области излучения HD189733A. Для моделирования измеренные величины принимались в качестве постоянных, а остальные, неизвестные – в качестве свободных параметров в рамках разумного диапазона вариаций. Конкретные параметры моделирования в различных расчетах представлены в таблице 3.1.2. В качестве спектрального распределения энергии излучения звезды (SED) использовался синтетический спектр, рассчитанный специально для HD189733A с помощью кода звездной атмосферы LLmodels [84]. Поток излучения в области XUV составляет  $F_{XUV} \sim 25$  эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на расстоянии 1 AE. В то же время мы выделяем в нашей модели жесткую энергетическую часть потока XUV на  $\lambda < 51$  нм с  $F_{XUV,hard} = 16$  эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на 1 AE, которая прямо влияет на заселенность метастабильного гелия. Отношение  $F_{XUV,hard}/F_{XUV} = 2/3$  в ходе моделирования сохранялось неизменным, тогда как значение полного интегрального потока F<sub>XUV</sub> варьировалась. Для ближней ультрафиолетовой (NUV, 91.2 $<\lambda<300$  нм) и ближней инфракрасной (NIR, около 1083 нм) частей потока звездного излучения были использованы значения  $F_{NUV} = 1830$  эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> и  $F_{1083} = 20$  эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>Å<sup>-1</sup> на 1 АЕ соответственно. Последний параметр определяет силу давления излучения, действующей на HeI(2<sup>3</sup>S), а поток NUV необходим для расчета фотоионизации метастабильного гелия.

N	F <sub>XUV</sub>	Fvuv	F1083	He/H	$M'_{sw}$	$M'_{pw}$	Abs. HeI	Полуширина
				$10^{10}$ г/ $10^{10}$ г/с		10 <sup>10</sup> г/с	max, %	HeI, км/с
					с			
1	7.5	10 <sup>3</sup>	20	0.006	10	10.6	0.9	19.1
2	15	10 <sup>3</sup>	20	0.006	10	17.1	1.1	21
3	25	10 <sup>3</sup>	20	0.006	10	24.7	1.35	21.2
4	40	10 <sup>3</sup>	20	0.006	10	35.8	1.6	21.9
5	55	10 <sup>3</sup>	20	0.006	10	46.3	1.75	22.2
6	7.5	10 <sup>3</sup>	20	0.005	10	7.5	0.77	19.2
7	20	10 <sup>3</sup>	20	0.005	10	16.2	1.1	22.4
8	25	10 <sup>3</sup>	20	0.003	10	21.6	0.8	22
9	55	10 <sup>3</sup>	20	0.003	10	40.4	1.05	22.4
10	25	10 <sup>3</sup>	20	0.003	250	26.6	0.81	20.7
11	25	10 <sup>3</sup>	20	0.003	2000	21.6	0.69	16.9
12	15	10 <sup>3</sup>	2	0.006	10	17.9	1	21.1
13	15	10 <sup>3</sup>	60	0.006	10	17.2	1.3	18.3
14	15	10 <sup>2</sup>	20	0.006	10	16	1.65	24
			$1.1\pm0.1^{-1*}$	22.5 <sup>1*</sup>				
							$0.7{\pm}0.1$	27.2 <sup>2*</sup>
							2*	

Таблица 3.1.1. Список расчетов с соответствующими параметрами моделирования и рассчитанными характеристиками поглощения. Столбцы слева направо: номер расчета; предполагаемое значение интегрального звездного XUV потока в диапазоне длин волн 10 <λ<91 нм и в диапазонеVUV в эрг∙см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на расстоянии 1 АЕ; поток в области 1083 нм в эрг∙см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>Å<sup>-1</sup> на расстоянии 1 АЕ; относительное содержание гелия в нижней атмосфере; скорость потери массы звезды, задающая интенсивность 3В; рассчитанная скорость потери массы планеты; рассчитанный максимум поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) и ширина профиля на полувысоте. В нижней строке указаны измеренные значения максимума поглощения, представленные в работах: (1\*) –[24], (2\*) –[25] На правой панели рисунка 3.1.1 показаны распределения основных характерных физических величин в атмосфере HD189733b, полученные в расчете №1: плотности, скорости и температуры планетарного вещества вдоль оси «звезда-планета». Из-за высокой гравитации планеты скорость истечения относительно низкая, а температура достигает 15000 К довольно близко к планете. Уровни половинной ионизации для H и HeI располагаются ниже 2Rp. Соотношение H<sup>+</sup>/H=1 достигается при r=1.6 Rp, что близко к результату аэрономного моделирования [85], но заметно дальше, чем в других одномерных моделях. Левая панель рисунка 3.1.1 демонстрирует типичное двумерное распределение атомов метастабильного гелия вокруг планеты. На рисунке видно, что планетарное вещество вытекает за полость Роша (~3 Rp) и растекается вдоль орбиты.



Рисунок 3.1.1. Слева: распределение плотности метастабильного гелия, образующееся в результате истечения атмосферы HD189733b в потоке звездного ветра. В центре системы координат находится планета, черный

кружок справа показывает звезду в масштабе. Серые и черные линии обозначают линии тока планетарного и звездного вещества соответственно. Справа: распределение основных компонент атмосферы в зависимости от расстояния. Все масштабы выражены в радиусах планеты.

На левой панели рисунка 3.1.2 показаны скорости химических процессов, увеличивающие и уменьшающие населенность метастабильного уровня гелия  $HeI(2^{3}S)$ . Видно, что рекомбинационную накачку из ионизированного гелия Не<sup>+</sup> в состояние HeI(2<sup>3</sup>S) балансируют автоионизационные столкновения с атомами Н на малых высотах r<1.3Rp, и столкновительное девозбуждение электронамина больших высотах. Примечательно, процесс что фотоионизации состояния HeI(2<sup>3</sup>S) становится существенным относительно далеко от планеты, где плотность атомов HeI(2<sup>3</sup>S) слишком низкая, чтобы влиять на интегральное поглощение. Несмотря на относительно высокий поток фотоионизирующего VUV излучения  $F_{VUV}=10^3$  эрг·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, заселенность метастабильного уровня гелия остается достаточно высокой. Фотоионизационный распад уровня HeI(2<sup>3</sup>S) оказывает относительно небольшое влияние на поглощение в линии метастабильного гелия: уменьшение F<sub>VUV</sub> на порядок приводит к относительно слабому изменению поглощения (рисунок 3.1.3, фиолетовая и зеленая линии) в отличие от случая HD209458b (рисунок 4.3.1).

Отметим, что полный баланс реакций накачки и девозбуждения, который получается после умножения скоростей реакций на соответствующие плотности частиц, хорошо соблюдается в расчетах.

Результаты моделирования показали, что радиационное давление, ускоряющее атомы HeI( $2^3$ S), для этой экзопланеты не оказывает существенное влияние на наблюдения (рисунок 3.1.3, синяя, фиолетовая и красная линии). Стоит отметить, что параметры F<sub>VUV</sub> и F<sub>1083</sub>, определяющие фотоионизацию и радиационное давление на атомы HeI( $2^3$ S), для реальной системы заданы и могут варьироваться в небольших пределах, поэтому серия расчетов N12-14 была произведена в целях демонстрации влияния обоих эффектов.







Рисунок 3.1.3. Профили транзитных поглощений HD189733b, рассчитанные для различных значений потока излучения в окрестности λ=1083 нм (N2,

66

N12, N13 из Таблицы 3.1.1) а также ослабленного потока VUV излучения (зеленая линия, N14 из Таблицы 3.1.2). Здесь и далее для аналогичных рисунков для профиля линии вместо длины волны используется

Допплеровская скорость смещения, и нулевая скорость соответствует длине волны 1083 нм.

Для детального описания геометрии и особенностей поглощения в линии метастабильного гелия в атмосфере планеты HD189733b были построены распределения поглощения в трех интервалах Допплеровских скоростей: в синем крыле [-20; -7] км/с, красном [7; 20] км/с и в центре линии [-7; 7] км/с (рисунок 3.1.4, слева направо). Видно, что поглощение в центре линии довольно симметрично, с максимальным значением около 1% вблизи поверхности планеты, сосредоточено в кольце Rp<r<3Rp.Поглощение в синем и красном крыльях линии метастабильного гелия, как в случае HD189733b, так и широкого ряда других планет (GJ436b, см рисунок 5.1.1) происходит дальше от планеты и расположено с разных сторон. Это связано с закручиванием по часовой стрелке убегающего потока вещества верхних слоев атмосферы под действием силы Кориолиса.



Рисунок 3.1.4. Распределение поглощения атомами HeI(2<sup>3</sup>S) по диску звезды, рассчитанное с набором параметров N3 для трех интервалов скоростей (слева направо), [-20, -7] км/с, [-7, 7] км/с, и[7, 20] км/с

### 3.2. Аномальное низкое поглощение в линии гелия в атмосфере «теплого нептуна» атмосфере GJ436b

«Теплый нептун» GJ436b обладает рядом особенностей, не имеющих аналогов среди остальных экзопланет. Одна из них – аномально высокое поглощение при транзите экзопланеты перед диском звезды в водородной линии Lya, составляющее ~ 60% [11], несмотря на очень малое отношение планетарного и звездного радиусов и глубине фотометрического транзита всего 0.7%. Как показало численное моделирование ([17]), такое существенное поглощение, сконцентрированное в основном в синем крыле линии, является следствием взаимодействия обширной планетарной оболочки, простирающейся на миллионов километров ([12], [17]), несколько И звездного ветра, протекающего с образованием ЭНА. Однако, несмотря на обширную атмосферу, поглощения в линии второго по численности элемента во Вселенной – гелия – не было обнаружено. Этот загадочный, на первый взгляд, факт будет исследован ниже, а здесь мы рассмотри процессы, влияющие на заселенность уровня метастабильного гелия в атмосфере планеты GJ436b.

No.	F <sub>XUV</sub> , erg·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	$M_{\rm pw}^\prime$	$M_{\rm sw}^\prime$	F1083, erg·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	FWHM HeI(23S), km/s	Abshei(238), %
				A-1		
1	0.86	0.59	25	3	12	0.74
2	0.86	0.57	100	3	12.2	0.83
3	0.86	0.56	200	3	11.9	0.75
4	0.86	0.57	400	3	10.2	0.64
5	0.86	0.63	2000	3	9.7	0.42
6	0.43	0.26	25	3	10.4	0.57
7	1.7	1.29	25	3	12.5	1.06
8	0.86	0.58	25	0.3	11.6	1.2
9	0.86	0.6	25	20	12.1	0.36
	$\sim 0.2^{1}$					

Таблица 3.2.1. Наборы параметров, использованные для моделирования атмосферы GJ436b. Столбцы слева направо: номер расчета; звездный поток XUV излучения в диапазоне длин волн 1<λ<91.2 нм на 1 AE; скорости потери массы планетарного М'<sub>pw</sub> и звездного М'<sub>sw</sub> вещества, выраженные в 10<sup>10</sup> г/с;

звездный поток излучения на длине волны λ=1083 нм; ширина рассчитанного

профиля поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) на полувысоте и его амплитуда.

Протяженность атмосферы GJ436b в десятки раз превосходит радиус планеты, однако фракция метастабильного гелия, которая может давать вклад в поглощение, локализована достаточно компактно. На правой панели рисунка 3.2.1 показаны распределения плотностей, скорости и температуры вдоль оси «звезда-планета». Можно заметить, что у GJ436b профили более обширные, чем у HD189733b, что вызвано намного меньшим гравитационным потенциалом планеты, однако основной вклад в поглощение гелия попрежнему вносят близлежащие к поверхности области. Левая панель рисунка 3.1.6 отображает относительный вклад в заселенность уровня HeI(2<sup>3</sup>S) различных реакций, скорости которых рассчитаны при наборе параметров моделирования N1 (Таблица 3.2.1). Основным источником накачки, как обычно, является рекомбинация ионов со свободными электронами (красная линия, или реакция №9 на левой панели рисунка 3.2.1; [44, 45]). Как и для других планет, на малых высотах накачка уровня балансируется реакциями автоионизации №7 и №8, (в основном с Н), а на расстояниях >2Rp электронным ударом из триплетного состояния в синглетное (реакции  $N_{2}3,4$ ). Скорость фотоионизации из состояния 23S мала по отношению к прочим скоростям реакций везде, кроме ударной области (~11Rp). Из-за сравнительно низкой температуры атмосфера GJ436b слабо ионизирована со значительным содержанием молекулярного водорода.



Рисунок 3.2.1. Слева: скорости реакций, ответственных за заселение и депопуляцию метастабильного уровня HeI(2<sup>3</sup>S), в зависимости от расстояния вдоль оси X с набором параметров N1. Справа: распределение основных компонент атмосферы в зависимости от расстояния вдоль оси X.



Рисунок 3.2.2. Спектральная плотность энергии излучения (SED) родительских звезд некоторых экзопланет, которые обсуждаются в настоящей работе. Все величины потоков представлены в единицах эрг·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> на расстоянии 1 АЕ.

# 3.3. Аномальное высокое поглощение в линии гелия в атмосфере «теплого нептуна» GJ3470b

Особняком в ряду представленных экзопланет стоит «теплый нептун» GJ3470b. Ключевой особенностью этой экзопланеты в контексте данной главы является область поглощения. Большая доля излучения звезды в линии 1083 нм поглощается не вблизи планеты, а в экзосфере. Причина этой особенности заключается в относительно слабой ионизации атомарного гелия, что приводит к относительно равномерному распределению атомов HeI(2<sup>3</sup>S). В результате этом атомы гелия попадают в область ударной волны в достаточном количестве, где эффективно возбуждаются электронным ударом.

No.	XU	$M_{pw}^{\prime}$	V <sub>sw</sub> ,	$T_{cor}$	$M_{\rm sw}^\prime$	V <sub>sw</sub> ,p	$T_{sw,pl}$	n <sub>swp</sub>	$A_{HeI,\%}$	He/H
	V		x	MK		1	MK	cm <sup>-3</sup>		
			km/s			km/s				
1	4	2.6	720	5.0	62	520	1.05	$2.5 \cdot 10^3$	5.6	0.1
2	4	2.2	720	5.0	45	520	1.05	$1.8 \cdot 10^{3}$	0.7	0.013
3	6	3.0	720	5.0	86	520	0.65	$3.5 \cdot 10^3$	0.7	0.013
4	6	3.0	720	5.0	170	520	0.65	$7 \cdot 10^{3}$	0,8	0.013
5	8	3.7	720	5.0	170	520	0.65	$7 \cdot 10^{3}$	0.7	0.013
6	10	4.5	720	5.0	340	520	0.65	$1.4 \cdot 10^4$	0.8	0.016

Таблица 3.3.1. Наборы параметров моделирования. Столбец XUV содержит звездный поток в диапазоне длин волн 10<λ<912 А, выраженный в эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>на расстоянии 1 АЕ от звезды. Темпы потери массы планеты Мрw<sup>/</sup> и звезды

Msw<sup>/</sup> выражены в 10<sup>10</sup> г/с. Индекс «sw,pl» обозначает параметры 3В на орбите планеты. Колонка А<sub>неl</sub>показывает величину поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S), усредненную по интервалу [-40; 20] км/с. Последний (правый) столбец показывает модельное содержание гелия.

Моделирование атмосферы экзопланеты и сравнение с наблюдениями позволило выявить наиболее вероятный сценарий взаимодействия планетарного вещества с излучением и ветром родительской звезды. Для наиболее точной интерпретации наблюдательных проявлений поглощения в линии метастабильного гелия был выполнен ряд расчетов, представленных в таблице 3.3.1. Моделирование с набором параметров N1 и стандартным содержанием гелия He/H=0.1 показало поглощение на уровне нескольких процентов с максимумом до 5%. Это в несколько раз больше, чем в наблюдениях, и профиль смещен в красное крыло, в то время как в работе [32] в синее крыло.



Рисунок 3.3.1. Слева: Профили поглощения в линии 1083 нм в доплеровских единицах скорости, рассчитанные для набора N2 (синяя линия), N3 (голубая),

N4 (оранжевая), N5 (красная), N6 (зеленая) с низким содержанием гелия.

Заштрихованная область соответствует результатам наблюдений [32] с низким спектральным разрешением. Справа: распределение поглощения в линии метастабильного гелия по диску звезды в интервале скоростей [-25, 25] км/с для набора параметров N1. Закрашенный синий кружок обозначает планету.
Моделирование с набором параметров N1 показало, что взаимодействие с ЗВ увеличивает поглощение в линии HeI( $2^3$ S), поэтому оно становится значительно больше, чем обнаруженное в работе [32]. Примечательно, что поглощение в центре линии происходит в области, близкой к планете, как это обычно происходило для других экзопланет: рассчитанное поглощение в области 7Rp достигает всего 1%. Таким образом, относительно удаленная от планеты область дает наибольшее поглощения для всей линии HeI( $2^3$ S). Это хорошо видно в распределении поглощения по звездному диску, показанном на рисунке 3.3.1. Видно, что оно более или менее равномерно распределено по звездному диску с максимальным поглощением, приходящимся на удаленную от планеты ударную область.

Для достижения уровня поглощения, сравнимого с наблюдениями, содержание гелия было снижено по сравнению с Солнечным в 7.5 раза до значения около He/H=0.013. Другим параметром, влияющим на поглощение в линии 1083 нм, является поток XUV. Например, увеличение потока XUV до 8  $\operatorname{spr} \cdot \operatorname{c}^{-1} \operatorname{cm}^{-2}$  приводит к более быстрой фотоионизации, меньшему количеству атомов гелия, достигающих ударную область и, следовательно, к меньшему поглощению. На рисунке 3.3.2 показаны профили поглощения линий HeI(2<sup>3</sup>S) для нескольких наборов параметров моделирования. Набор параметров N6 из таблицы 3.3.1 дает синее смещенное поглощение для обеих линий, что позволяет получить наилучшее соответствие измерениям.



Рисунок 3.3.2. Слева: скорости реакций, ответственных за заселение и депопуляцию метастабильного уровня HeI(2<sup>3</sup>S), в зависимостиот расстояния вдоль оси X с набором параметров N1. Справа: распределение основных компонент атмосферы в зависимости от расстояния от планеты.Левая ось: логарифм плотности атомарного (синяя линия) и молекулярного водорода (голубой), протонов (зеленый), ионов гелия (оранжевый), атомов гелия в основном и в метастабильных состояниях (пурпурный и красный). Правая ось: температура электронов (черным, в единицах 10<sup>4</sup> K) и скорость частиц HeI(2<sup>3</sup>S) (серым, в единицах 10 км/с). Вертикальные серые линии указывают положение ударной волны и ионопаузы.

Для определения процессов, отвечающих за населенность уровня метастабильного гелия, на рисунке 3.3.2, справа отображена плотность компонент атмосферы, участвующих в реакциях, вдоль оси, пересекающей головной скачок уплотнения перед планетой, показанной на рисунке 3.3.2. Видно, что фракция метастабильного гелия имеет два сравнимых по величине максимума: вблизи планеты и в ударной области, между ионопаузой и ударной волной. Скорости реакций на рисунке 3.3.2 слева показывают, что внутри области, где преобладает планетарный ветер, уровень HeI(2<sup>3</sup>S) накачивается за счет рекомбинации Не<sup>+</sup>. Однако в нижних слоях атмосферы, где плотность  $\mathrm{He}^+$ максимальна, он быстро опустошается в результате реакции автоионизации с H<sub>2</sub> и H, так что плотность HeI(2<sup>3</sup>S) остается относительно низкой, чтобы вносить какой-либо значительный вклад в поглощение. Отметим, что рисунок 3.3.2 справа, а также аналогичные распределения скоростей реакций для других планет, отчетливо показывают, ЧТО концентрация метастабильных атомов резко падает до нуля на высотах <0.3Rp, в то время как концентрация ионизованного гелия и электронов, из которых образуется HeI(2<sup>3</sup>S), остается все еще достаточно высокой. Дальше от рекомбинационная планеты накачка уравновешивается в основном девозбуждением электронным ударом. Отметим, что фотоионизация и

74

радиационный распад остаются незначительными. Примечательно, что при взаимодействии с УВ ударная область вносит наибольший вклад в поглощение. Температура, характерная для этой области, достаточна, чтобы накачать HeI(2<sup>3</sup>S) прямым электронным ударом из основного состояния.

### 3.4. Основные выводы к главе 3

Впервые показано, что поглощение в линии HeI(2<sup>3</sup>S) отсутствует в плотных слоях атмосферы, несмотря на то что концентрация атомов гелия нарастает экспоненциально и, как следствие, концентрация ионов гелия и электронов остается достаточно высокой. Это связано с тем, что метастабильные атомы эффективно девозбуждаются в столкновениях с нейтральными частицами. Данное обстоятельство приводит к тому, что поглощение в центре линии образуется не вблизи фотометрического радиуса планеты, а на высотах более 0.2Rp. Этот факт ранее в литературе не выделялся и его значение для наблюдений в данной линии указано впервые в данной работе.

Поглощение в линии HeI(2<sup>3</sup>S) обусловлено совместным действием спектра кинетических процессов рекомбинационной, столкновительной и излучательной природы. Скорость протекания этих процессов зависит от распределения плотности вещества и спектральной плотности излучения звезды, а потому на поглощение в линии метастабильного гелия могут оказать влияние как параметры планеты, так и особенности спектра родительской звезды.

Впервые получено, что поглощение в линии метастабильного гелия сосредоточено в основном в области 0.2 < r < 3 Rp, то есть относительно близко к планете. Однако если фотоионизация гелия слаба, то основной вклад в возбуждение метастабильного может формироваться значительно дальше от планеты в области ударной волны, где HeI( $2^3S$ ) возбуждается энергичными электронами звездного ветра. Впервые в мире получено, что поглощение в линии метастабильного гелия в верхних слоях атмосфер горячих экзопланет может формироваться за счет столкновения атомов HeI( $1^1S$ ) с горячими электронами звездного ветра.

# 4. Использование поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) для зондирования параметров звездного излучения и состава атмосферы

Обратная задача определения параметров космической погоды из наблюдений является достаточно трудной И требует привлечения нескольких спектральных диапазонов. Если полагать состав атмосферы экзопланеты эквивалентным стандартному Солнечному, речь идет об интерпретации оптических транзитных поглощений в основном водородно-гелиевой плазмой, содержанием Не/Н~0.1. Следовательно, наиболее относительным С подходящими для определения свойств и динамики верхних атмосфер экзопланет являются линии поглощения водорода и гелия.

Интерпретация транзитных поглощений в водородной линии Lyα позволяет выявить некоторые параметры звездного излучения, такие, как интенсивность XUV излучения, наиболее поглощаемого межзвездной средой, или темп потери массы звездного вещества (через параметры звездного ветра) и т.д. Однако поглощение в одной водородной линии не может предоставить исчерпывающие и достоверные данные о параметрах атмосферы экзопланеты, а потому требуются дополнительные линии. В данной главе будет исследовано влияние различных аспектов излучения и ветра родительской звезды, а также состава атмосферы на наблюдательные проявления в линии метастабильного гелия.

Как обсуждалось в предыдущей главе, рекомбинационные процессы являются ключевыми в накачке метастабильного уровня. Ионизирующее излучение является единственным источником ионизации гелия в атмосфере. Помимо этого, ионизующее излучение формирует истечение планетарного вещества и, тем самым, характерную ширину линии поглощения. Значит, интерпретация транзитных поглощений в линии HeI(2<sup>3</sup>S) позволит оценить поток излучения звезды в XUV области. Кроме того, заселенность уровня HeI(2<sup>3</sup>S) и поглощение в линии 1083 нм существенно зависит от исходного содержания гелия в атмосфере, которое задается при моделировании в качестве

свободного параметра как относительная к водороду концентрация. Соотношение He/H даже в нижних слоях газовых планетах Солнечной системы может быть разным в среднем, и в верхней атмосфере включительно в виду различных процессов сепарации и конденсации. Прочие параметры в целом влияют на поглощение в линии HeI(2<sup>3</sup>S) не так существенно. Следовательно, основными величинами, которые возможно оценить из спектральных профилей поглощения в линии метастабильного гелия, являются, в первую очередь, интенсивность ионизирующей радиации звезды, а также относительное содержание гелия в атмосфере планеты.

Проиллюстрируем вышеприведенный тезис на примере моделирования транзитных поглощений ряда горячих экзопланет: Wasp69b, HD189733b и HD209458b.

## 4.1. Оценка параметров физико-химических параметров атмосферы HD189733b по оптическим транзитным поглощениям

Интерпретация оптических транзитных поглощений в линии метастабильного гелия позволила ограничить параметры планетарной атмосферы и звездного ветра следующими величинами: содержание гелия He/H~0.03÷0.05, поток ионизующей радиации  $F_{XUV} \sim 7.5 \div 55$ , интенсивность звездного ветра M<sub>sw</sub>~10<sup>11</sup>÷2·10<sup>12</sup> г/с. Последний параметр был определен с использованием измерений в линии Lyα [28], поскольку поглощение в линии метастабильного гелия нечувствительно к вариациям M<sub>sw</sub>. Как можно увидеть на рисунке 4.1.1, средний ЗВ не влияет на профиль поглощения, в то время как сильный ветер значительно уменьшает поглощение в красном крыле линии, которое соответствует течению поглощающего вещества к звезде, а также общую ширину и глубину профиля.

На рисунке 4.1.2 слева видно, что моделируемая глубина поглощения и, в меньшей степени, ширина профиля поглощения увеличиваются с увеличением потока XUV. Это связано с более эффективной ионизацией гелия, которое приводит к увеличению скорости рекомбинации, и большей скоростью течения планетарной атмосферы в целом. Таким образом, разницу в уровне поглощения в 1,5 раза между измерениями [24] и [25], выполненными в разное время, можно объяснит переменностью звездного XUV-излучения в пределах естественных временных вариаций.



Рисунок 4.1.1. Профили поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) в условиях слабого (N8, таблица 3.1.1), среднего (N10) и сильного (N11) 3B.

На правой панели рисунка 4.1.2 отображены результаты двух сценариев, подобранных на соответствие двум различным измерениям. Первый сценарий предполагает более высокий поток XUV, необходимый для воспроизведения поглощения около 1% в центре линии HeI(2<sup>3</sup>S) и с шириной линии, соответствующим измерениям [24]. Второй сценарий задействует более низкий поток XUV, чтобы соответствовать поглощению около 0,7% в центре линии, измеренному [25]. Обоим сценариям соответствует относительно низкое содержание гелия, He/H~0.003÷0.005.



Рисунок 4.1.2. Слева: Поглощение в линии HeI (2<sup>3</sup>S) при различной величине ионизующего излучения звезды при фиксированном содержании гелия He/H=0.006. Справа: Сравнение расчетных поглощений при различных значениях интенсивности XUV-излучения и двумя разными содержаниями гелия с данными двух наблюдений ([24]- серые точки, [25]- черные) для получения наиболее близкого соответствия.

Как можно заметить на рисунке 4.1.2 справа, набор параметров N3 таблицы 3.1.1 обеспечивает относительно хорошее соответствие измерениям [25]. Приведенное значение среднеквадратичного отклонения  $\chi^2$ , рассчитанное в интервале [-40; 20] км/с составляет 0.8, и это минимальное значение среди всех рассмотренных наборов параметров моделирования. Для вычисления  $\chi^2$  в качестве значения степени свободы использовалась разность между количеством точек в данных наблюдений и количеством свободных параметров, которых в данном случае два:  $F_{XUV}$  и He/H.

Численное моделирование, нацеленное на интерпретацию наблюдений из [24], не воспроизвели третью – самую «красную» линию триплета, и соотношение между высотами линий 10828/1083 нм по данным измерений оказывается больше, чем значение статистического веса 1/8. В работе [27] по поводу этой особенности отмечалось, что увеличение плотности атмосферы (до 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>) на уровне, близком к оптическому радиусу планеты, приводит к более сильному поглощению в оптически толстой области и, следовательно, к меньшему отношению поглощения линий 1082.8/1083 нм. Однако из рисунке 3.1.3 видно, что в плотной области атмосферы HD189733b на высотах r<1.2Rp метастабильный уровень HeI( $2^3$ S) гораздо эффективнее опустошается, чем возбуждается. Стоит отметить, что в нашем моделировании плотность на уровне r = Rp принималась достаточно высокой,  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Еще одной особенностью, которую наша модель не воспроизводит, является синее смещение линий вблизи 1083 нм. Этот сдвиг, количественно равный~2,5 км/с, присутствует в данных [24], но отсутствует в данных [25]. Модельные расчеты показывают, что сложная асимметричная спиралевидная структура планетарной атмосферы HD189733b не может приводить к существенному смещению линий вблизи 1083 нм, поскольку поглощение происходит в области, где скорость потока еще достаточно мала. Один из способов объяснить возможную причину такого смещения состоит во включении учета зональных движения нижних слоев атмосферы. Это течение образуется потоками с дневной стороны на ночную, которые могут быть достаточно интенсивными из-за большой разницы в температурах ночной и дневной сторон планеты [51]. Интерпретация таких эффектов требует сочетания моделирования верхних и нижних слоев атмосферы в рамках единой модели, что является трудной задачей, на данный момент не решенной ни одной из научных групп. Поэтому на данном этапе можно применить эмпирический сдвиг линий вблизи 1083 нм, который приводит к хорошему соответствию с наблюдениями, характеризуемому очень низким значением  $\chi^2 = 0.01$ .

# 4.2. Определение физико-химических условий вблизи «теплого нептуна» Wasp69b по оптическим транзитным поглощениям

Для экзопланеты в системе Wasp69 были смоделированы различные сценарии взаимодействия планетарной атмосферы с излучением и ветром родительской звезды. Модельные параметры, соответствующие этим сценариям, представлены в Таблице 4.2.1.

N	F <sub>XUV</sub>	$\mathbf{M'_{sw}}$	He/H	$\mathbf{M'_p}$	FWHM	A <sub>HeI</sub>
	$[\operatorname{erg} \operatorname{cm}^{-2} \operatorname{s}^{1}],$ at 1 a.u.	[×10 <sup>10</sup> g/s]		[×10 <sup>10</sup> g/s]	km/s	%
1	1	10	0.1	1.82	11.68	1.52
2	3	10	0.1	5.3	12.08	2.55
3	7	10	0.1	11.35	16.46	3.5
4	5	10	0.15	8.6	15.43	3.8
5	3	10	0.2	5.5	14.68	3.46
6	3	10 <sup>2</sup>	0.1	5.3	13.44	2.5
7	3	10 <sup>3</sup>	0.1	4.8	12.5	3.8
		17.8	3.53			

Таблица 4.2.1. Список параметров моделирования с рассчитанными поглощениями в линии метастабильного гелия. Столбцы слева направо: порядковый номер расчета; предполагаемые величины: интенсивность XUV излучения звезды на расстоянии 1АЕ в эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>; общая скорость потери массы звезды в единицах 10<sup>10</sup> г/с; относительное содержание гелия в атмосфере планеты; рассчитанные значение: скорость потери массы атмосферы в единицах 10<sup>10</sup> г/с; ширина профиля поглощения по полувысоте в линии HeI(2<sup>3</sup>S); максимум поглощения.

Для Wasp69b обнаружена была существенная корреляция между интенсивностью XUV излучения и поглощением в линии метастабильного гелия, что указывает на ключевую роль рекомбинационных процессов в заселении уровня метастабильного гелия. Скорость истечения планетарного вещества, формирующая Допплеровский профиль уширения линии (рисунок 4.2.1, слева), также определяется звездным XUV излучением. Таким образом, сравнение профилей поглощения с измеренными в работе [21] позволяет ограничить параметр  $F_{XUV}$  значениями 4÷7 эрг· см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> (рисунок 4.2.1, справа). В этих расчетах применялось значение скорости потери массы звездного вещества  $10^{11}$  г/с, оцененное в работе [86].



Рисунок 4.2.1. Слева: профили поглощения в линии He I(2<sup>3</sup>S), смоделированные для разных значений потока XUV излучения при Солнечном относительном содержании гелия He/H=0.1 (№ 1-3 из Таблицы 4.2.1). Справа: сравнение расчетного поглощения при различных значениях интенсивности XUV излучения и содержания гелия с наблюдениями [21]

### (черные точки).

Параметр М'<sub>sw</sub> скорость потери массы звездного вещества, описывающий звездный ветер, не может быть определен напрямую из наблюдений. Изменение скорости потери массы звездного вещества, во многом определяющее пространственную структуру течения планетарного ветра на расстояниях нескольких планетарных радиусов, может отразиться на

профилях поглощений. На рисунке 4.2.2 представлены двумерные распределения плотности метастабильного гелия в случаях стандартного (10<sup>11</sup> г/с, рисунок 4.2.2 слева) и сильного (10<sup>13</sup> г/с, рисунок 4.2.2 справа) скоростей потерь массы звездного вещества. Можно увидеть, что в случае умеренного ветра планетарное вещество, не сдерживаемое звездным ветром, начинает частично аккрецировать на звезду, что проявляется в уширении красного крыла профиля поглощения (рисунок 4.2.3, слева, красная кривая). При увеличении М'<sub>sw</sub> на порядок не произошло существенных изменений в профилях оптических транзитных поглощений (рисунок 4.2.3 слева, синяя и черная кривые), однако сильный звездный ветер, соответствующий значению M'<sub>sw</sub>=10<sup>13</sup> г/с, вызвал значительные изменения структуры атмосферы (рисунок 4.2.4). Распределения концентрации метастабильного гелия при скоростях потери массы звездного вещества 10<sup>11</sup> и 10<sup>13</sup> г/с, представленные на рисунке 4.2.2, показывают, что при воздействии сильного ЗВ вещество планеты "уносится" в направлении от звезды, а значит и Допплеровский профиль поглощения (рисунок 4.2.3 слева, красная кривая) оказывается смещенным в синюю область по сравнению с профилем, полученном при меньших значениях М'<sub>sw</sub>. Однако это смещение оказывается незначительным, поскольку поглощение в обоих случаях происходит относительно близко к планете (рисунок 4.2.3 справа).



Рисунок 4.2.2. Распределение плотности метастабильного гелия в случае слабого (10<sup>11</sup> г/с, слева) и сильного (10<sup>13</sup> г/с, справа) скоростей потери массы звездного вещества (Msw). В центре системы координат находится планета, красной точкой отмечено положение звезды

Кроме того, профиль поглощения при М'<sub>sw</sub>=10<sup>13</sup> г/с имеет сравнительно большую амплитуду, что обусловлено образованием головной ударной волны. Ударная волна отчетливо проявляется на распределениях плотности, скорости и температуры, представленных на рисунке 4.2.4. При Х≈4Rp, перед контактной границей с 3B, происходит резкое снижение скорости и плотности метастабильного гелия (синяя и красная сплошные кривые на рисунке 4.2.4).



Рисунок 4.2.3. Слева: профили поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S), смоделированные для разных значений скорости потери массы звездного вещества (M'<sub>sw</sub>). Справа: распределение поглощения метастабильного гелия по диску звезды, полученное при умеренном значении M'<sub>sw</sub> (Таблица 3.2.3, N2). Серый кружок обозначает планету



Рисунок 4.2.4. Распределения плотности атомарного водорода (черная линия), метастабильного гелия (красная), а также температуры и скорости метастабильного гелия (левая ось, синяя и фиолетовая кривые соответственно). Сплошные кривые соответствуют случаю сильного звездного ветра (Msw=10<sup>13</sup> г/с), а пунктирные кривые - слабому ветру (Msw=10<sup>11</sup> г/с).

## 4.3. Особенности оптических транзитных поглощений HD209458b в линии метастабильного гелия

Особенность системы HD 209458 заключается в том, что поток VUV излучения от родительской звезды на длинах волн <260 нм, который фотоионизует метастабильный гелий, оказывается самым большим среди всех рассматриваемых планет из-за относительно большого размера звезды и высокой температуры фотосферы. Изменение потока менее, чем в 2 раза (рисунок 4.3.1) существенно влияет на профиль транзитного поглощения, что существенно отличается от случая HD189733b (рисунок 3.1.4). По этой причине основным процессом депопуляции метастабильного HeI(2<sup>3</sup>S) в атмосфере планеты HD209458b является его фотоионизация. Например, в случае GJ3470b и GJ436b время фотоионизации HeI(2<sup>3</sup>S) составляет ~17 мин и ~60 мин соответственно, а для HD209458b - всего 0.3 с. Это время достаточно мало, чтобы уменьшить влияние радиационного давления на атомы  $HeI(2^{3}S)$ , которое в противном случае разгоняло бы их до чрезвычайно высоких скоростей. Несмотря на высокий уровень звездного излучения в линии λ=1083 нм  $F_{1083} \sim 90$  эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>Å<sup>-1</sup> на 1 AE и силе радиационного давления, превышающей силу звездной гравитации в 460 раз, ускорение атомов на орбите планеты, достигает значений всего ~1.5 км/с<sup>2</sup>.



Рисунок 4.3.1. Профили транзитных поглощений HD209458b, рассчитанные для различных значений потока VUV излучения

Атомы  $HeI(2^{3}S)$  образуются в основном в результате рекомбинации ионов  $He^{+}$ , которые, в свою очередь, образуются при фотоионизации HeI(1<sup>1</sup>S) Таким высокоэнергетическим XUV-излучением. образом, поглощение HeI(2<sup>3</sup>S) в линии 1083 нм зависит от потока высокоэнергичного излучения F<sub>XUV</sub> и содержания гелия. Определение потока XUV излучения затруднено, поскольку оно поглощается межзвездной средой, а содержание гелия в нижней атмосфере планеты связано со множеством сложных процессов. Однако некоторые параметры,  $F_{1083}$ И F<sub>VUV</sub>, другие такие, как доступны непосредственным измерениям телескопами и являются относительно стабильными у звезд.



Рисунок 4.3.2. Слева: скорости реакций, ответственных за заселение и депопуляцию метастабильного уровня HeI(2<sup>3</sup>S), в зависимости от расстояния

вдоль оси X с набором параметров N1 для HD209458b. Справа: распределение основных компонент атмосферы в зависимости от расстояния.

На рисунке 4.3.3 показано сравнение моделирования транзитных поглощений в линии метастабильного HeI( $2^{3}$ S)  $\lambda$ =1083 нм с наборами параметров N1, N2, N3 и N4 (Таблица 4.3.1) полученных при разных значениях F<sub>XUV</sub> (сплошные работы [22]. цветные кривые) с измеренными поглощениями ИЗ Соответствующие значения содержания гелия (таблица 4.3.1, столбец Не/Н) были выбраны так, чтобы моделирования приблизительно соответствовали данным измерений. Можно увидеть относительно хорошее совпадение моделирований с измерениями [22] по амплитуде и ширине линии. Центр линии поглощается очень близко к планете, на высотах (1–1.5) Rp, где, помимо фотоионизации, реакция с атомами Н также эффективно уничтожает популяцию метастабильного HeI(2<sup>3</sup>S). Поэтому время ускорения атомов HeI(2<sup>3</sup>S) радиационным давлением всегда остается малым. Поскольку значения F<sub>XUV</sub> оцениваются недостаточно точно и могут меняться в несколько раз, содержание гелия, полученное путем сравнения результатов моделирования с измеренным поглощением в  $HeI(2^{3}S)$ , может быть оценено в достаточно широких пределах, He/H~0.05÷0.1.

N	F <sub>XUV</sub>	F <sub>VUV</sub>	$\mathbf{M'}_{sw}$	He/H	$M'_p$	A <sub>HeI</sub>
	[erg cm <sup>-</sup>	[erg cm <sup>-</sup>	[×10 <sup>10</sup>		[×10 <sup>10</sup> g/s	%
	$^{2}$ s <sup>1</sup> ], at	$^{2}$ s <sup>1</sup> ], at	g/s]		]	
	1 a.u.	1 a.u.				
1	7.5	$5.10^{4}$	10 <sup>2</sup>	0.05	16.9	0.65
2	4.0	$5 \cdot 10^4$	10 <sup>2</sup>	0.1	7.4	0.67
3	15	$5 \cdot 10^4$	10 <sup>2</sup>	0.02	32.4	0.45
4	10	3·10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup>	0.02	25.8	0.51
5	10	3.104	2.5·10 3	0.02	15.6	0.89
						$0.47 \pm 0.1^{[1]}$

Таблица 4.3.1. Список параметров моделирования и рассчитанные поглощения в линии метастабильного гелия. Столбцы слева направо: порядковый номер расчета; предполагаемые значения звездных потоков XUV и VUV на расстоянии 1 АЕ в эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>;предполагаемая общая скорость потери массы звезды в единицах 10<sup>10</sup> г/с, относительное содержание гелия; расчетная скорость потери массы планеты в единицах 10<sup>10</sup> г/с; рассчитанное полное интегральное поглощение в линии и HeI(2<sup>3</sup>S).

Интегрирование поглощения по линии HeI(2<sup>3</sup>S) проводилось в доплеровском интервале скоростей±10 км/с около 1083.32 нм. В нижнем ряду показаны измеренные значения поглощения из работы [22]



Рисунок 4.3.3. Профили транзитных поглощений для HD209458b, полученные для набора параметров из таблицы 3.1.3, наилучшим образом соответствующие измеренным поглощениям из [22] (показаны черными точками)

Увеличение поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) в результате взаимодействия со звездным ветром было обнаружено также при моделировании HD209458b. В случае сильного 3B (N5, Таблица 4.3.1) глубина поглощения увеличивается в 1,5÷2 раза, как это показано на рисунке 4.3.4. Это является следствием сжатия области планетарного вещества давлением звездного ветра.



Рисунок 4.3.4. Профили транзитных поглощений для HD209458b при различной интенсивности звездного ветра (таблицы 3.1.3) в сравнении с измеренным поглощениям (точки с барами, [22]).



Рисунок 4.3.5. Слева: распределение плотности и температуры для сильного (сплошные кривые) и слабого (пунктирные) Звездного Ветра вдоль оси

### планета-звезда. Справа: распределение температуры в плоскости терминатора Z-Y.

В случае среднего значения звездного ветра (Таблица 4.3.1, N4) наблюдается небольшое красное смещение относительно наблюдений, которое соответствует течению поглощающего вещества к звезде. Большее значение скорости потери массы звездного вещества дает небольшое синее смещение, наблюдаемое также и в измерениях.

#### 4.4. Основные выводы к главе 4

На основе численного моделирования нескольких планетарных систем было впервые в мире показано, что основными параметрами, которые возможно оценить из спектральных профилей поглощения в линии метастабильного гелия, являются поток излучения ионизирующей радиации звезды  $F_{XUV}$  и относительное содержание гелия в атмосфере планеты He/H.

Использование линии метастабильного гелия для оценки интенсивности звездного ветра не всегда оправдано. Это связано с тем, что обычно поглощение происходит вблизи планетs, а не в области взаимодействия планетарного и звездного ветров. В некоторых системах возможны исключения, и значительная часть поглощения происходит в ударном слое. В этом случае профиль поглощения в линии метастабильного гелия претерпевает смещение в синюю область спектра, или существенно уширяется профиль в синем крыле линии, что позволяет использовать наблюдения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) для оценки параметров звездного ветра.

## 5. Влияние радиационного давления излучения звезды на наблюдательные проявления оптических транзитных поглощений горячих экзопланет

При исследовании динамики экзопланетных атмосфер в контексте анализа оптических транзитных поглощений в спектральных линиях необходимо учитывать возможные эффекты радиационного давления на поглощающие частицы. Скорость атомов метастабильного гелия, а значит и профиль поглощения в линии 1083 нм, может существенно измениться за счет радиационного ускорения. После создании атома метастабильного гелия, либо в результате рекомбинации, либо ударного возбуждения, он начинает ускоряться в результате поглощения фотонов 1083 нм (на переходе 2<sup>3</sup>S-2<sup>3</sup>P) и их быстрого переизлучения. При этом, поскольку атом поглощает от звезды направленные фотоны, а излучает равновероятно в сферу, то средний получаемый импульс направлен от звезды. Темп и продолжительность ускорения определяется интенсивностью звездного излучения на длине волны F<sub>1083</sub> и временем жизни метастабильного уровня. Практически для всех звезд спектр излучения в области 1083 нм является сплошным и определяется тепловым излучением фотосферы, и легко измеряется оптическими телескопами. По этой причине ускоренный атом метастабильного гелия продолжает претерпевать действие звездного излучения практически неограниченно, будучи способным ускоряться практически всё время жизни, которое определяется в основном столкновениями с электронами, как это обсуждалось в предыдущей главе. Отметим, что ускорение может ограничиваться также упругими столкновениями с другими атомами, что учитывается в численном моделировании.

Радиационное давление излучения родительской звезды на атомы и ионы может существенно влиять на поглощение в оптически тонких средах, к которым относятся исследуемые в настоящей работе верхние слои экзопланет. Для некоторых горячих экзопланет радиационное давление на

метастабильные атомы гелия превышает силу звездной гравитации на два порядка, а давление на атомы водорода звездным излучением Lyα – на порядок величины, потому анализ действия радиационного давления на поглощение в линии метатсабильного гелия особенно важен в контексте настоящей работы. Излучение звезды в линии, длина волны которой соответствует переходу между уровнями атома, воздействует на атомы с силой ([87], формула 7):

$$F_{rad} = \frac{1}{c} \int F_{\lambda}(\lambda) \sigma_{nat} d\lambda$$
 (5.1)

где интегрирование осуществляется по всему контуру линии поглощающей частицы, с - скорость света,  $F_{\lambda}(\lambda)$  - поток излучения звезды в данной линии в эрг·см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>Å<sup>-1</sup>. Поскольку поток излучения вблизи линии 1083 нм постоянен, давление излучения на ансамбль атомов не зависит от распределения их скорости, и на поглощение излучения влияет только естественная ширина линии. Для расчета силы радиационного давсления атом представляется полностью поглощающим телом с эффективным сечением  $\sigma_{\lambda}(\lambda)$ , которое для получения силы надо умножить на плотность потока импульса излучения звезды, которое связано с плотностью потока энергии излучения простым и универсальным образом (надо поделить на скорость света). Из квантовой теории механического действия света на атомы известно [88, 89], что такие представления работают для слабого поля излучения, когда можно ограничиться низшим линейным по полю приближением в отклике атома, что применимо в случае воздействия излучения звезды на атомы атмосфер экзопланет. Также отсутствие нелинейно-оптических эффектов сказывается в том, что слабое поле излучения звезды не производит перераспределения по энергетическим подуровням, задействованным в поглощении на длине волны 1083 нм, а изменение распределения по скоростям за счет эффекта радиационного давления не сказывается на поглощениии, потому что спектр излучения звезды вблизи линии 1083 нм практически постоянен.

Сечение поглощения для формулы (5.1) определяется естественной шириной линии и вычисляется по формуле, согласно [90], формула (1.49) и прочим классическим тематическим методическим пособиям:

$$\sigma_{nat} = f_{1083} \frac{e^2}{m_e c^2} c \frac{\Delta v_{nat}}{(\nu - \nu_o)^2 + \Delta v_{nat}^2}$$
(5.2)

где  $\Delta v_{nat}$  – естественная ширина линии, а  $v_0$  – резонансная частота в системе отсчета атома. Ускорение атомов водорода или метастабильных атомов гелия под воздействием резонансных фотонов звездного излучения может во много раз превосходить силу гравитационного притяжения звезды. Это означает, что в разреженной плазме в отсутствии прочих сил одиночные атомы будут ускоряться от звезды. При поглощении фотона атом гелия приобретает импульс:

$$\Delta \mathbf{p} = \Delta V \cdot m_{\mathrm{He}} = \mathbf{F}_{\mathrm{rad}} \tau \tag{5.3}$$

где для вычисления F<sub>rad</sub> была использована формула (5.1), m<sub>He</sub> – масса атома гелия, а τ – время жизни уровня, определяемое по формуле

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \sum \frac{1}{\tau_i}$$
(5.4)

Где  $\tau_0 = 8 \cdot 10^3 \, \text{с}$  – естественное время жизни метастабильного уровня гелия,  $\tau_i$ – время от образования метастабильного атома до его перехода на прочие уровни.

Анализ факторов, влияющих на радиационное ускорение, в настоящей работе проводится на основе численного моделирования, а не аналитических оценок. Однако существует возможность сделать некоторые приближенные оценки эффекта радиационного давления на наблюдаемые величины. Для учета относительного эффекта радиационного давления к гравитационному потенциалу звезды используют коэффициент β, который является отношением силы радиационного давления к силе гравитационного притяжения звезды, действующей на единичный атом метастабильного гелия. Для расчета

коэффициента  $\beta$  необходимо взять интеграл (5.1), используя выражение (5.2) с учетом того, что поток излучения звезды в спектральной области 1083 нм практически постоянен, а дифференциал можно представить как  $d\lambda = \frac{c}{v_0^2} d\mathbf{v} = \lambda_0$ 

$$\frac{1}{v_0}dv$$

$$F_{rad} = \frac{F(\lambda_0) \cdot \lambda_0}{c \cdot \nu_0} \int_0^\infty \sigma(\nu, \nu o) d\nu = \frac{F(\lambda_0) \cdot \lambda_0 \cdot r_0 \cdot f_{1083}}{\nu_0}$$
(5.5)

где  $r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.82 \cdot 10^{-13}$  см – классический радиус электрона,  $f_{1083} = 0.3$  – сила центральной линии метастабильного гелиевого триплета, безразмерная величина, значение которой было заимствовано из ресурса <u>https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\_form.html</u>,  $v_0 = \frac{c}{\lambda_0} = 3 \cdot 10^{14} \Gamma \mu$  – частота, соотвествующая длине волны 10830 Å,  $F(\lambda_0)$  – поток излучения звезды в линии 10830 Å в эрг·см<sup>-2</sup>c<sup>-1</sup>Å<sup>-1</sup> на орбите планеты – 0.03 AE.

Согласно формуле (5.5) выражение для коэффициента β можно записать в универсальном для различных планетарных систем виде:

$$\beta = \frac{F(\lambda_0)|_{1AE}}{M_{st}} \cdot \frac{\lambda_0 \cdot r_0 \cdot f_{1083} \cdot (1 \ AE[cm])^2}{G \cdot \nu_0 \cdot m_{He} \cdot M_{Sun}} = 1.5 \cdot \frac{F(\lambda_0)|_{1AE}}{M_{st}}$$
(5.6)

где  $F(\lambda_0)|_{1AE}$  - поток излучения звезды в линии 10830 Å в эрг·см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>Å<sup>-1</sup> на 1 AE, M<sub>st</sub> – масса звезды, выраженная в массах Солнца, M<sub>Sun</sub> = 1.9·10<sup>33</sup> г – масса Солнца, 1 AE = 1.5·10<sup>13</sup> см – астрономическая единица, выраженная в сантиметрах.

Подставляя параметры планетарных систем, рассматриваемых в натоящей главе, получаем  $\beta_{Wasp107b}=21.7$  ( $F(\lambda_0)|_{1AE}=10$ ,  $M_{st}=0.69$   $M_{Sun}$ ) и  $\beta_{GJ436b}=10$  ( $F(\lambda_0)|_{1AE}=3$ ,  $M_{st}=0.45$   $M_{Sun}$ ) – превышение силы радиационного давления над силой звездной гравитации на порядок величины, что довольно существенно.

Расчеты, проведенные для ряда экзопланет (Рисунки 3.1.3, 3.1.5, 3.1.7), показывают, что в области наиболее эффективного поглощения энергии ионизирующего излучения планетарными атомами доминирует

рекомбинационная накачка метастабильного уровня атома гелия. Этот компенсируется процесс В плотных слоях верхней атмосферы автоинизационными реакциями с метастабильным гелием, однако эффективное расселение уровня обусловлено в основном электронным ударом, приводящем к переходу триплетного метастабильного уровня на синглетные уровни 2<sup>1</sup>S и 2<sup>1</sup>P. Следовательно, процессы девозбуждения будут приводить к расселению уровня за время

$$\frac{1}{\tau_{i}} = \frac{1}{n_{e}q_{31}} + \frac{1}{n_{e}q_{31}} + \frac{1}{n_{H}Q} + \frac{1}{\tau_{coll}}$$
(5.7)

где n<sub>e</sub> и n<sub>H</sub> – концентрации электронов и атомов водорода соответственно, q<sub>ij</sub> – коэффициент перехода на синглетные уровни 2<sup>1</sup>S (q<sub>31a</sub>) и 2<sup>1</sup>P (q<sub>31b</sub> = 4·10<sup>-9</sup> см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>) за счет столкновений с электронами, Q<sub>31</sub> – коэффициент перехода за счет столкновений с водородом. Изменение скорости за время т таким образом будет зависеть от множества параметров, таких, как плотность атомов водорода и электронов в термосфере, температура электронов (входит в коэффициенты q), а также сечения упругих столкновений. Например, скорость, приобретаемая при радиационном воздействии на атомы гелия в случае  $\tau_i \sim \tau_e = 1/(n_e q_{31b}) = 2.5$  с и характерной концентрации электронов n<sub>e</sub>=10<sup>8</sup> см<sup>-3</sup> согласно (5.3) будет приблизительно равной

$$\Delta v = \frac{F_{rad} \cdot \tau}{m_{He}} = \frac{F(\lambda_0) \cdot \lambda_0 \cdot r_0 \cdot f_{1083} \cdot \tau}{\nu_0 \cdot m_{He}} \approx 2 \text{ KM/c}$$
(5.8)

на концентрацию электронов  $n_e=10^8$  см<sup>-3</sup>. Для вычисления силы  $F_{rad}$ , действующей на неподвижные атомы метастабильного гелия, в формуле (5.6) были использованы выражения (5.1)-(5.3) с учетом того, что в звездном спектре  $F_{\lambda}$  практически не зависит от длины волны. Расчет радиационного давления согласно формул (5.1)-(5.3) является широко распространенным в астрофизике с начала исследования экзопланет ([60] и соответствующие ссылки, [91]). Поскольку при поглощении происходит передача направленного импульса, а спонтанное излучение происходит изотропно, взаимодействие атомов метастабильного гелия с излучением звезды приводит

к направленному движению атомов гелия в метастабильном состоянии по направлению от звезды. Эффекты квантовых флуктуаций и последующего повышения температуры атомов не принимались в расчет ни в одной из работ, где учитывалось радиационное давление на атомы атмосфер, потому в настоящей работе этот эффект также не рассматривался.

Значение изменения скорости, приобретаемое метастабильными атомами гелия атмосферы за счет взаимодействия с излучением родительской звезды, быть может детектировано телескопами, следовательно, влияние на наблюдательные проявления радиационного давления оптических транзитных поглощений может быть существенным. Радиационное давление может несущественно компенсироваться некоторыми физическими процессами, связанными с особенностями переноса излучения. В этой связи стоит упомянуть о самоэкранировании (self-shielding), то есть поглощении направленного излучения звезды атомами атмосферы, плотность которых экспоненциально нарастает при приближении к планете. Поскольку спонтанное излучение не имеет выделенного направления, то эффект отчасти ослабляется. ускорения атомов Эффект самоэкранирования оказывается очень важным для атомов водорода и их ускорения излучением линии Lyα [17], но несущественным для атомов метастабильного гелия.

Рассмотрим действие радиационного давления на метастабильные атомы гелия в атмосферах на примерах пары «теплых нептунов» GJ436b и Wasp107b. Особенность этих экзопланет состоит в том, что радиационное давление на атомы HeI(2<sup>3</sup>S) превосходит звездную гравитацию на порядок и имеет существенное влияние на наблюдательные проявления.

### 5.1. GJ436b: причины отсутствия оптических транзитных поглощений в линии метастабильного гелия

В работе [17] были определены параметры, при которых достигается наилучшее соответствие между моделированием и наблюдениями в водородной линии Lya. Среди них – терминальная скорость 3B V<sub>sw</sub>=540 км/с, интегральный поток плазмы M'<sub>sw</sub>= $2.5 \cdot 10^{11}$  г/с, а также интенсивность ионизирующего излучения звезды F<sub>XUV</sub>=0.86 эрг·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> на 1 AE. Однако реальные звездные системы могут быть подвержены временным вариациям вышеупомянутых параметров. Для выявления влияния изменения различных характеристик излучения и ветра родительской звезды, а также состава атмосферы GJ436b на поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) были выполнено отдельное моделирование с различными наборами параметров (серия расчетов N1-5, Таблица 5.1.1).

На левой панели рисунка 5.1.1 показаны распределения основных параметров атмосферы GJ436b, смоделированные для случаев слабого (N1, т.е. малого  $M'_{sw}$ ), среднего (N2-N4, значения типичные для Солнца) и сильного (N5) ЗВ. Согласно этим распределениям, область столкновительной ударной волны между планетарным и звездным ветрами в случае большого  $M'_{sw}$  (набор параметров N5) очень близко подходит к планете. Как можно увидеть на рисунке 5.1.2 (нижняя панель справа) такая интенсивность ЗВ может привести к проникновению ЗВ в область термосферы, и только в этом случае взаимодействие планетарного и звездного вещества влияет на поглощение в линии. Однако такая интенсивность ветра, судя по интерпретациям транзитных поглощений в линии  $Lу\alpha$ , не свойственна для звезды GJ436, а потому может быть рассмотрена исключительно гипотетически. Для прочих рассмотренных значений ЗВ (N1-4, Таблица 5.1.1) область взаимодействия планетарного ветров расположена значительно дальше области поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) ~3Rp (нижняя панель рисунка 5.1.2, слева и по

No.	Fxuv, erg·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	$M_{\rm sw}^\prime$	He/H	F1083, erg·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> Å	$M_{pw}^{\prime}$	FWHM HeI(238), km/s	Abs HeI(238), %
1	0.86	25	0.03	3	0.59	12	0.74
2	0.86	100	0.03	3	0.57	12.2	0.83
3	0.86	200	0.03	3	0.56	11.9	0.75
4	0.86	400	0.03	3	0.57	10.2	0.64
5	0.86	2000	0.03	3	0.63	9.7	0.42
6	0.43	25	0.03	3	0.26	10.4	0.57
7	1.7	25	0.03	3	1.29	12.5	1.06
8	0.86	25	0.03	0.3	0.58	11.6	1.2
9	0.86	25	0.03	20	0.6	12.1	0.36
10	0.86	25	0.1	3	0.74	14.1	2.1
11	0.86	25	0.2	3	0.77	15.6	2.7
Наблюдения							

середине), и поэтому размер поглощающей области остается примерно одинаковым и не чувствителен к ЗВ.

Таблица 5.1.1. Наборы параметров моделирования GJ436b. Столбцы слева направо: интенсивность излучения в XUV диапазоне 1<λ<91.2 нм на 1 AE; содержание гелия; скорости потери масс звезды М'<sub>sw</sub> (в 10<sup>10</sup> г/с); интенсивность излучения 1083 нм; рассчитанная величина планетарного потока вещества М'<sub>pw</sub> (в 10<sup>10</sup> г/с); ширина профиля поглощения на полувысоте HeI(2<sup>3</sup>S) и максимум поглощения. В последнем ряду - данные наблюдений из [21]



Рисунок 5.1.1. Слева: распределения логарифма плотности (вверху), температуры и скорости (внизу) метастабильного гелия вдоль оси «звездапланета», смоделированные со слабым (N1, черный), средним (N2, N3 и N4,

голубой, синий и зеленый) и сильным (N5, красный) ЗВ. Справа: Распределение метастабильного гелия в экваториальной плоскости (XY) в

расчете N1. Черные и зеленые линии показывают линии течения атомов HeI(2<sup>3</sup>S) атмосферы и звездных протонов соответственно. Планета находится в центре системы координат (0,0) и движется против часовой стрелки вокруг звезды, расположенной в точке (158,0). Пространственные масштабы заданы в единицах планетарных радиусов Rp.



Рисунок 5.1.2. Верхняя панель: профили поглощения HeI(23S), смоделированные для разных значений скорости потери массы звезды M'sw, т.е. в расчетах со слабым (N1, черный), средним (N2, N3 и N4, голубой, синий и зеленый) и сильным (N5, красный) ЗВ. Данные измерений ([21]) здесь и ниже показаны звездочками.

Нижняя панель, слева направо: распределение поглощения в атмосфере GJ436b по диску звезды в линии HeI(2<sup>3</sup>S) в середине транзита, смоделированные со слабым (N1), средним (N3) и сильным (N5) 3B.

Для проверки возможной роли ионизирующего излучения звезды были выполнены расчеты с наборами параметров N6 и N7 (Таблица 5.1.1), с вдвое меньшим и вдвое большим потоком  $F_{XUV}$  от значения, принятого в работе [17]. Как видно на правой части рисунка 5.1.3, максимальное поглощение в центре линии HeI( $2^3$ S) увеличивается с увеличением потока  $F_{XUV}$ , однако не пропорционально, из-за сложного взаимодействия всех реакций, ответственных за заселение метастабильного уровня гелия.



Рисунок 5.1.3. Профили поглощения HeI(2<sup>3</sup>S), смоделированные для различных потоков XUV и фиксированного содержания гелия He/H = 0,03 с наборами параметров N1, N6 и N7 из Таблицы 3.2.1.

Расчеты с разным содержанием гелия (N1, N8, N9) показывают, что увеличение концентрации гелия в атмосфере GJ436b в диапазоне

He/H=0.03÷0.2 слабо влияет на интенсивность истечения планетарного вещества (Таблица 5.1.1, колонка M<sup>'</sup><sub>pw</sub>). При этом поглощение в линии HeI(2<sup>3</sup>S) заметно растет, но значительно медленнее, чем линейным образом.



Рисунок 5.1.4. Профили поглощения HeI(23S) (слева) и проекция скорости атомов метастабильного гелия на ось наблюдения X, рассчитанные с наборами параметров (N1, N8 и N9) с разными потоками F<sub>1083</sub>, т. е. разными силами радиационного давления, действующими на атомы HeI(2<sup>3</sup>S).

Перейдем к анализу действия радиационного давления на атомы HeI( $2^{3}$ S). Для этого, помимо моделирования с измеренным для GJ436 значением потока F<sub>1083</sub> = 3 эрг c<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>Å<sup>-1</sup> на расстоянии 1 AE от звезды (N1), были выполнены расчеты с наборами параметров N8 и N9 с более низким и более высоким потоками F<sub>1083</sub> соответственно. Моделирование показало, что сила давления излучения ближнего ИК диапазона действительно влияет на динамику атомов HeI( $2^{3}$ S) и связанное с этим поглощение (рисунок 5.1.4). В частности, в случае типичного потока F<sub>1083</sub> = 3 эрг c<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>Å<sup>-1</sup> на 1 AE сила радиационного давления на порядок превышает силу звездного притяжения и ускоряет атомы HeI( $2^{3}$ S) до скоростей ~ 30 км/с (синяя линия на правой панели рисунка 5.1.4).



Рисунок 5.1.5. Верхняя панель: модельные профили поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S) с набором параметров N1 (оранжевая линия), а также расчет, выполненный в работе [20] (зеленая линия).

Нижняя панель: распределение поглощения атомами HeI(23S) по диску звезды, рассчитанное с набором параметров N1 с усреднением в трех интервалах скоростей (слева направо), [-20, -7] км/с, [-7, 7] км/с и [7, 20] км/с. Планета показана серым кружком.

В работе [20], посвященной моделированию транзитных поглощений в линии HeI(2<sup>3</sup>S) в атмосфере GJ436b простой полуаналитической одномерной
моделью величина поглощения (8%) на порядки превосходила верхний предел не обнаружения поглощения (0.2%), полученный из измерений. Как видно на левой панели рисунка 5.1.4, одной из причин был не учет радиационного давления в работе [20]. Ускорение радиационным давлением приводит к тому, что метастабильные атомы гелия становятся рассеянными по более широкой области вдоль оси наблюдения. Это приводит к уплощению профиля поглощения и уменьшению его пикового значения за счет перераспределения с синее крыло. Можно видеть, что если центр линии поглощается вблизи планеты r<4Rp, то синее крыло – за пределами этой области 4Rp<r<7Rp. По результатам моделирования можно сделать вывод, что учет силы давления излучения, безусловно, необходим для корректного описания динамики атомов HeI(2<sup>3</sup>S) и поглощения в линии 1083 нм в атмосфере планеты GJ436b.

## 5.2. Теплый нептун Wasp 107b: баланс радиационного давления и столкновительного девозбуждения

Теплый нептун Wasp107b обладает самым выраженным поглощением в линии метастабильного гелия, достигая значений 7%, как показали наблюдения [30]. Интерпретация транзитных поглощений этой планеты численными моделями показала ([45], [88]), что это реализуется при относительно высокой скорости истечения атмосферы  $M'_{sw}\sim 10^{11}$  г/с, вызываемой потоком XUV на уровне  $F_{XUV}\sim 10$  эрг·см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Для определения параметров космической погоды в окрестности Wasp107b, дающих наиболее приближенный к измерениям профиль поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S), были выполнены расчеты с параметрами, указанными в Таблице 5.2.1

N	F <sub>XUV</sub>	F <sub>1083</sub>	He/H	M′ <sub>p</sub>	$A_{He,\%}$	$A_{\mathrm{He},\%}$	A <sub>He</sub> ,%	$A_{\mathrm{He},\%}$
	$[erg cm^{-2} s^1]$	[erg cm <sup>-2</sup>		[×10 <sup>10</sup>	max	[-10;	[-40; -10]	[10; 20]
		s <sup>1</sup> Å <sup>-1</sup> ]		g/s]		10]		
1	3	11	0.1	7.6	5.7	4.3	1.8	0.2
2	6	11	0.1	12.5	8.4	6.8	2.8	1.3
3	8	11	0.1	15.3	9.4	7.9	3.5	2.3
4	10	11	0.1	18	10.3	8.9	4.2	3.2
5	6	5.0	0.1	12.5	7.5	6.4	1.9	4.9
6	6	7.5	0.1	12.5	9.4	7.3	2.0	2.8
7	6	15	0.1	12.5	7.4	5.6	3.4	0.6
8	3	11	0.25	7.0	7.7	5.5	2.9	2.5
9	6	11	0.15	11.8	9.8	8.0	3.5	1.5
10	10	11	0.075	18	8.7	7.5	3.4	2.8
[30]					10.0	7.2	3.5	3.6
		[92]			7.3	6.0	2.9	2.1

Таблица 5.2.1. Наборы параметров моделирования транзитных поглощений экзопланеты Wasp107b. Слева направо: интегральный поток F<sub>XUV</sub> (1-91.2 нм) на 1 АЕ; поток излучения звезды Wasp107 вблизи длины волны 1083 нм на 1

АЕ; относительное содержание гелия; пик поглощения в линии HeI(2<sup>3</sup>S); рассчитанная потеря массы атмосферы планеты; поглощение, усредненное в доплеровском диапазоне скоростей [-10; 10] км/с (центр линии), [-40; -10] км/с (синее крыло) и [10; 20] км/с (красное крыло) соответственно. Также приведены данные измерений в двух разных наблюдениях. На рисунке 5.2.1, показано распределение поглощения в линии HeI( $2^3$ S) по диску звезды, а также профили плотности основных частиц, включая температуру и скорость атомов метастабильного гелия вдоль оси Z, полученные при численном моделировании с набором параметров N1 из таблицы 5.2.1. Ось Z в данном случае выбрана, вместо оси X, для демонстрации возможностей кода, а не физических особенностей. Можно заметить, что даже самое малое используемое в расчетах значение  $F_{XUV}$  создает протяженную оболочку, распространяющуюся на десятки планетарных радиусов. Область поглощения в центре линии метастабильного гелия ([-9; 9 км/с], Рисунок 5.2.1 (слева) показывает, что поглощающая область занимает практически весь диск звезды, в то время как в случаях прочих экзопланет поглощение происходит в области порядка нескольких планетарных радиусов. Это различие является причиной рекордно высокого уровня поглощения в линии HeI( $2^3$ S) при транзитах планеты Wasp107b.



Рисунок 5.2.1. Слева: распределение поглощения метастабильного гелия по диску звезды. Справа: распределение основных компонент атмосферы в зависимости от расстояния от планеты (левая ось абсцисс), а также температуры и скорости атомов HeI(2<sup>3</sup>S) (правая ось).

На рисунке 5.2.2 показаны скорости реакций образования и распада уровня  $HeI(2^{3}S)$  в зависимости от расстояния до планеты. Основные процессы, уравновешивающие рекомбинационную накачку, носят столкновительный характер. Они включают реакции автоионизации  $HeI(2^{3}S)$  с  $H_{2}$  и H, которые важны относительно близко к планете (<2Rp), и переход из триплетного состояния в синглетное за счет электронного удара (реакции  $N_{2}3$ ,4). Фотоионизация из состояния  $2^{3}S$  везде пренебрежимо мала, кроме дальней области (>10Rp), где плотность частиц значительно уменьшается.



Рисунок 5.2.2. Скорости реакций, ответственных за накачку и девозбуждение метастабильного уровня HeI(2<sup>3</sup>S), в зависимости от расстояния вдоль оси Z, смоделированные с набором параметров N1.

Чтобы подчеркнуть роль радиационного давления, действующего на атомы HeI(2<sup>3</sup>S), помимо расчетов с измеренным значением звездного излучения на длине волны 1083 нм  $F_{1083} = 11$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> Å<sup>-1</sup> на 1 AE (наборы параметров N1-4 из Таблицы 5.2.1), было проведено моделирование с более низкими и более высокими потоками  $F_{1083}$  с сохранением прочих параметров (рисунок 5.2.3) слева). Повышенное ускорение HeI(2<sup>3</sup>S) из-за высокого радиационного смещает профили поглощения в давления сторону синей области скоростей. Набор допплеровских параметров N5 С самым слабым радиационным давлением показывает дополнительное поглощение в красном крыле [10; 20] км/с. Он образуется в широком гало ~10Rp, простирающемся за пределы полости Роша, где атомы HeI(2<sup>3</sup>S) также движутся к звезде под действием звездной гравитации.



Рисунок 5.2.3. Слева: профили транзитных поглощений в линии HeI(2<sup>3</sup>S), смоделированные при различных радиационных давлениях, задаваемых потоком F<sub>1083</sub>, включая измеренное для звезды значение (расчет N2). Справа: сравнение профиля поглощения, полученного в модельном прогоне N2 (синяя линия), с профилями, полученными при тех же параметрах, но без фотоионизации уровня HeI(2<sup>3</sup>S) (красная линия), без электронного удара (зеленая линия) и без столкновительной депопуляции в целом (оранжевая линия).

Эффект ускорения радиационным давлением уменьшается за счет сокращения времени жизни атомов HeI(2<sup>3</sup>S) под действием различных процессов девозбуждения. На рисунке 5.2.3, справа представлены профили поглощения, смоделированные с набором параметров N2 при «выключении» некоторых реакций, отвечающих за расселение уровня HeI(2<sup>3</sup>S). Это выключние фотоионизации HeI(2<sup>3</sup>S) (реакция 2, рисунок 5.2.2), без перехода из

триплетного состояния в синглетное за счет электронного удара (реакция 3), и без какой-либо столкновительной депопуляции метастабильного состояния  $HeI(2^{3}S)$  (реакции 3-8). Сравнение красных линий на левой и правой частях рисунка 5.2.3 показывает, что фотоионизация HeI(2<sup>3</sup>S) имеет незначительное влияние на форму спектра поглощения, в то время как отсутствие столкновительной депопуляции HeI(2<sup>3</sup>S) приводит к значительно более широкому профилю поглощения с гораздо более сильным пиком по сравнению с наблюдениями и дополнительным пиком в синей области спектра. Этот эффект связан с сильным влиянием радиационного давления, действующего на атомы HeI(2<sup>3</sup>S) в отсутствии столкновений. Этот случай подобен рассмотренному в [30], где при расчете поглощения с аналогичным набором параметров столкновительное девозбуждение уровня HeI(2<sup>3</sup>S) не учитывалось. Большое поглощение, сильно смещенное в синее крыло, вызванное радиационным ускорением не сдерживаемое столкновениями, привело авторов работы [30] к необходимости необоснованного 100-кратного уменьшения интенсивности звездного излучения в ближнем ИК диапазоне для согласования моделирования с измерениями.

Анализируя эффект радиационного ускорения на метастабильные атомы гелия в атмосфере Wasp 107b, необходимо упомянуть о работе [93]. Авторы этой работы также рассчитывали транзитные поглощения в линии метастабильного гелия и исследовали влияние различных параметров космической погоды на наблюдательные проявления, используя трехмерный МГД код Athena++. В числе прочих параметров, в работе было рассмотрено также радиационное давление, однако с существенными недочетами, из-за которых выводы работы [93] по радиационному давлению остаются под сомнением. В частности, вместо реального звездного спектра в работе [93] использовалась достаточно узкая линия в окрестности 1083 нм, из-за чего атомы, приобретя скорость, соответствующую ширине линии, перестают ускоряться. Однако в реальных звездных спектрах линия 1083 нм не выделяется из сплошного спектра и не имеет конечной ширины, а потому эффект радиационного давления в работе [93] оказывается искусственно заниженным. В итоге по результатам моделирований авторы пришли к выводу, что радиационное давление не оказывает существенного влияния на транзитные профили вблизи линии метастабильного гелия, и для интерпретации транзитных поглощений пришлось добавить сильный ЗВ, чтобы добиться смещения максимума поглощения в синюю область.

## 5.3. Основные выводы к главе 5

Эффект радиационного давления на атомы метастабильного гелия определяется главным образом временем жизни уровня, которое для некоторых планет может быть довольно большим, позволяя достаточно длительное ускорение до высоких скоростей в несколько десятков км/с. Было впервые показано, что иные модели, не учитывающие радиационного некоторых систем существенно давления, дают ДЛЯ различные С наблюдениями результаты, и некорректную интерпретацию транзитных измерений. В тоже время, учет радиационного давления необходимо делать вместе с корректным расчетом столкновительных процессов девозбуждения, что оказывается не всегда возможным с использованием моделей Монте-Карло, как в работе [30]. Таким образом, настоящая работа впервые в мире демонстрирует на ряде примеров важность учета радиационного давления в частности, вместе с комплексным подходом к численному моделированию наблюдательных проявлений в целом.

Учет радиационного давления на метастабильные атомы гелия в атмосфере GJ436b критически важен для интерпретации оптических транзитных поглощений. Кроме того, необнаружение поглощения в линии метастабильного гелия связано с малым отношением между поглощающей площадью и проекцией звездного диска.

Для экзопланеты Wasp107b был впервые найден диапазон значений интенсивности ионизующей радиации звезды, при котором достигается наилучшее соответствие наблюдаемым поглощениям в триплетной линии HeI(2<sup>3</sup>S). Установлено, что радиационное давление на атомы метастабильного гелия для этой системы необходимо учитывать для количественного совпадения результатов моделирования с наблюдениями, также как процессы депопуляции HeI(2<sup>3</sup>S) за счет столкновений.

## Заключение

Транзитные поглощения горячих экзопланет в триплетной линии HeI(2<sup>3</sup>S), измеренные с использованием наземных телескопов, предоставили новую возможность зондирования параметров экзопланетных систем. Интерпретация данных в этой линии с помощью моделирования дали новый импульс в развитии существующих моделей и физических сценариев взаимодействия атмосфер экзопланет с излучением и ветром родительских звезд, а в будущем могут быть использованы для исследования атмосфер землеподобных планет и, потенциально, биомаркеров.

Основные выводы настоящей работы:

- Методом интерпретации оптических транзитных поглощений горячих экзопланет были оценены параметры космической погоды в окрестности следующих систем: HD189733A, HD209458, Wasp107, Wasp69, GJ3470.
- Показано, что транзитные поглощения в линии метастабильного гелия дают количественную информацию о потоке ионизирующего излучения звезды и относительном содержания гелия в атмосферах планет.
- Поглощение в центре линии HeI(2<sup>3</sup>S) с малыми допплеровскими скоростями <1 км/с образуется не вблизи фотометрических радиусов планет, а на высотах более 0.2Rp, что позволяет зондировать верхнюю атмосферу планеты.
- В основном поглощение в линии метастабильного гелия сосредоточено в области 0.2<r<3Rp, то есть относительно близко к планетам. Это значительно ограничивает возможность использования ее для зондирования параметров звездного ветра.
- Поглощение в линии HeI(23S) обусловлено совместным действием ряда кинетических процессов - рекомбинация, столкновения с электронами и атомами, излучение и фотоионизация, каждый из которых играет

важную роль в определенной пространственной области истекающей атмосферы планеты.

 Радиационное давление излучения звезды на атомы метастабильного гелия является важным фактором и должно учитываться при численном моделировании оптических транзитных поглощений горячих экзопланет.

## Список используемой литературы

- Mayor M., Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star //nature. 1995. – T. 378. – №. 6555. – C. 355-359.
- Lammer H. et al. Atmospheric loss of exoplanets resulting from stellar X-ray and extreme-ultraviolet heating //The Astrophysical Journal. 2003. T. 598. №.
   2. C. L121.
- 3. Vidal-Madjar A. et al. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b //Nature. 2003. T. 422. №. 6928. C. 143-146.
- Ben-Jaffel L. Spectral, spatial, and time properties of the hydrogen nebula around exoplanet HD 209458b //The Astrophysical Journal. – 2008. – T. 688. – №. 2. – C. 1352.
- Des Etangs A. L. et al. Temporal variations in the evaporating atmosphere of the exoplanet HD 189733b //Astronomy & Astrophysics. – 2012. – T. 543. – C. L4.
- Des Etangs A. L. et al. Evaporation of the planet HD 189733b observed in H i Lyman-α //Astronomy & Astrophysics. – 2010. – T. 514. – C. A72.
- Ehrenreich D. et al. Hint of a transiting extended atmosphere on 55 Cancri b //Astronomy & Astrophysics. – 2012. – T. 547. – C. A18.
- Lavie, B., Ehrenreich, D., Bourrier, V., Des Etangs, A. L., Vidal-Madjar, A., Delfosse, X., ... & Wheatley, P. J. (2017). The long egress of GJ 436b's giant exosphere. Astronomy & Astrophysics, 605, L7.
- Koskinen T. T. et al. Characterizing the thermosphere of HD209458b with UV transit observations //The Astrophysical Journal. 2010. T. 723. №. 1. C. 116.
- 10.Ben-Jaffel L. Exoplanet HD 209458b: Inflated hydrogen atmosphere but no sign of evaporation //The Astrophysical Journal. 2007. T. 671. №. 1. C. L61.
- 11.Ehrenreich D. et al. A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b //Nature. 2015. T. 522. №. 7557. C. 459-461.

- 12.Bourrier V. et al. An evaporating planet in the wind: stellar wind interactions with the radiatively braked exosphere of GJ 436 b //Astronomy & Astrophysics. 2016. T. 591. C. A121.
- 13.Lavie B. et al. The long egress of GJ 436b's giant exosphere //Astronomy & Astrophysics. 2017. T. 605. C. L7.
- 14.Vidal-Madjar A. et al. Detection of oxygen and carbon in the hydrodynamically escaping atmosphere of the extrasolar planet HD 209458b //The Astrophysical Journal. – 2004. – T. 604. – №. 1. – C. L69.
- 15.Holmström M. et al. Energetic neutral atoms as the explanation for the high-velocity hydrogen around HD 209458b //Nature. 2008. T. 451. №. 7181. C. 970-972.
- 16.Loyd R. O. Investigating an SPI and Measuring Baseline FUV Variability in the GJ 436 Hot-Neptune System //HST Proposal. 2017. C. 15174.
- 17.Khodachenko M. L. et al. Global 3D hydrodynamic modeling of in-transit Lyα absorption of GJ 436b //The Astrophysical Journal. 2019. T. 885. №. 1. C. 67.
- 18. Villarreal D'Angelo C. et al. GJ 436b and the stellar wind interaction: simulations constraints using Ly α and H α transits //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2021. T. 501. №. 3. C. 4383-4395.
- 19.Seager S. V., Sasselov D. D. Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits //The Astrophysical Journal. 2000. T. 537. №. 2. C. 916.
- 20.Oklopčić A., Hirata C. M. A new window into escaping exoplanet atmospheres: 1083 нм line of helium //The Astrophysical Journal Letters. – 2018. – Т. 855. – №. 1. – С. L11.
- 21.Nortmann L. et al. Ground-based detection of an extended helium atmosphere in the Saturn-mass exoplanet WASP-69b //Science. 2018. T. 362. №. 6421. C. 1388-1391.
- 22.Alonso-Floriano F. J. et al. He I λ 10 830 Å in the transmission spectrum of HD209458 b //Astronomy & Astrophysics. 2019. T. 629. C. A110.

- 23.Spake J. J. et al. Helium in the eroding atmosphere of an exoplanet //Nature. –
  2018. T. 557. №. 7703. C. 68-70.
- 24.Salz M. et al. Detection of He I λ1083 нм absorption on HD 189733 b with CARMENES high-resolution transmission spectroscopy //Astronomy & Astrophysics. 2018. Т. 620. С. А97.
- 25.Guilluy G. et al. The GAPS programme at TNG-XXII. The GIARPS view of the extended helium atmosphere of HD 189733 b accounting for stellar activity //Astronomy & Astrophysics. 2020. T. 639. C. A49.
- 26.Bourrier V., Des Etangs A. L. 3D model of hydrogen atmospheric escape from HD 209458b and HD 189733b: radiative blow-out and stellar wind interactions //Astronomy & Astrophysics. – 2013. – T. 557. – C. A124.
- 27.Lampón M. et al. Modelling the He I triplet absorption at 10 830 Å in the atmospheres of HD 189733 b and GJ 3470 b //Astronomy & Astrophysics. 2021. T. 647. C. A129.
- 28.Rumenskikh M. S. et al. Global 3D Simulation of the Upper Atmosphere of HD189733b and Absorption in Metastable HeI and Lyα Lines //The Astrophysical Journal. – 2022. – T. 927. – №. 2. – C. 238.
- 29.Ben-Jaffel L. et al. Signatures of strong magnetization and a metal-poor atmosphere for a Neptune-sized exoplanet //Nature Astronomy. – 2022. – T. 6. – №. 1. – C. 141-153.
- 30.Allart R. et al. Spectrally resolved helium absorption from the extended atmosphere of a warm Neptune-mass exoplanet //Science. – 2018. – T. 362. – №. 6421. – C. 1384-1387.
- 31.Oklopčić A. Helium absorption at 1083 nm from extended exoplanet atmospheres: Dependence on stellar radiation //The Astrophysical Journal. – 2019. – T. 881. – №. 2. – C. 133.
- 32.Ninan J. P. et al. Evidence for He I 1083 нм Absorption during the Transit of a Warm Neptune around the M-dwarf GJ 3470 with the Habitable-zone Planet Finder //The Astrophysical Journal. 2020. Т. 894. №. 2. С. 97.

- 33.Kirk J. et al. Keck/NIRSPEC studies of He I in the atmospheres of two inflated hot gas giants orbiting K dwarfs: WASP-52b and WASP-177b //The Astronomical Journal. – 2022. – T. 164. – №. 1. – C. 24.
- 34.Paragas K. et al. Metastable Helium Reveals an Extended Atmosphere for the Gas Giant HAT-P-18b //The Astrophysical Journal Letters. 2021. T. 909. №. 1. C. L10.
- 35.Czesla S. et al. Hα and He I absorption in HAT-P-32 b observed with CARMENES-Detection of Roche lobe overflow and mass loss //Astronomy & Astrophysics. 2022. T. 657. C. A6.
- 36.Spake J. J. et al. Non-detection of He I in the Atmosphere of GJ 1214b with Keck/NIRSPEC, at a Time of Minimal Telluric Contamination //The Astrophysical Journal Letters. – 2022. – T. 939. – №. 1. – C. L11.
- 37.Kasper D. et al. Nondetection of helium in the upper atmospheres of three sub-Neptune exoplanets //The Astronomical Journal. – 2020. – T. 160. – №. 6. – C. 258.
- 38.Casasayas-Barris N. et al. CARMENES detection of the Ca II infrared triplet and possible evidence of He I in the atmosphere of WASP-76b //Astronomy & Astrophysics. – 2021. – T. 654. – C. A163.
- 39.Fossati L. et al. The GAPS Programme at TNG-XXXII. The revealing nondetection of metastable He I in the atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b //Astronomy & Astrophysics. – 2022. – T. 658. – C. A136.
- 40.Kreidberg L., Oklopčić A. Non-detection of a Helium Exosphere for the Hot Jupiter WASP-12b //Research Notes of the American Astronomical Society. 2018. T. 2. №. 2. C. 44.
- 41.Shaikhislamov I. F. et al. Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. I. Modeling of hydrodynamic escape of upper atmospheric material //The Astrophysical Journal. 2014. T. 795. №.
  2. C. 132.

- 42.Khodachenko M. L. et al. Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. II. Effects of planetary magnetic field; structuring of inner magnetosphere //The Astrophysical Journal. 2015. T. 813. №. 1. C. 50.
- 43.Shaikhislamov I. F. et al. 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets
  //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. T. 481. №. 4.
   C. 5315-5323.
- 44.Shaikhislamov I. F. et al. 3D Modeling of Transit Absorption of GJ3470b in Hydrogen and Helium Lines //The Eleventh Moscow Solar System Symposium 11M-S3. – 2020. – C. 349-351.
- 45.Khodachenko M. L. et al. Simulation of 10 830 Å absorption with a 3D hydrodynamic model reveals the solar He abundance in upper atmosphere of WASP-107b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. 2021. T. 503. №. 1. C. L23-L27.
- 46.Khodachenko M. L. et al. The impact of intrinsic magnetic field on the absorption signatures of elements probing the upper atmosphere of HD209458b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2021. T. 507. №. 3. C. 3626-3637.
- 47. Winske D., Omidi N. Computer space plasma physics: simulation techniques and software. 1993.
- 48.Lipatov A. S. The hybrid multiscale simulation technology: an introduction with application to astrophysical and laboratory plasmas. Springer Science & Business Media, 2002.
- 49.Winske D. et al. Hybrid simulation codes: past, present and future-a tutorial //LECTURE NOTES IN PHYSICS-NEW YORK THEN BERLIN-. – 2003. – C. 136-165.
- 50.Tishchenko V. N., Shaikhislamov I. F. Wave merging mechanism: formation of low-frequency Alfven and magnetosonic waves in cosmic plasmas //Quantum Electronics. – 2014. – T. 44. – №. 2. – C. 98.

- 51.Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. УРСС, 1992.
- 52.Бисикало Д., Жилкин А., Боярчук А. Газодинамика тесных двойных звезд. Litres, 2022.
- 53.Yelle R. V. Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances //Icarus. – 2004. – T. 170. – №. 1. – C. 167-179.
- 54.Koskinen T. T. et al. Characterizing the thermosphere of HD209458b with UV transit observations //The Astrophysical Journal. 2010. T. 723. №. 1. C. 116.
- 55.Erkaev N. V. et al. XUV-exposed, non-hydrostatic hydrogen-rich upper atmospheres of terrestrial planets. Part I: atmospheric expansion and thermal escape //Astrobiology. – 2013. – T. 13. – №. 11. – C. 1011-1029.
- 56.Lammer H. et al. Atmospheric escape and evolution of terrestrial planets and satellites //Space Science Reviews. – 2008. – T. 139. – C. 399-436.
- 57.Lammer H. et al. Probing the blow-off criteria of hydrogen-rich 'super-Earths' //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2013. T. 430. №. 2. C. 1247-1256.
- 58.Trammell G. B., Arras P., Li Z. Y. Hot Jupiter magnetospheres //The Astrophysical Journal. 2011. T. 728. №. 2. C. 152.
- 59.Showman A. P., Polvani L. M. Equatorial superrotation on tidally locked exoplanets //The Astrophysical Journal. 2011. T. 738. №. 1. C. 71.
- 60.Bourrier V., Ehrenreich D., Des Etangs A. L. Radiative braking in the extended exosphere of GJ 436 b // Astronomy & Astrophysics. 2015. T. 582. C. A65.
- 61.Шематович В. И., Маров М. Я. Диссипация планетных атмосфер: физические процессы и численные модели //Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 3. – С. 233-265.
- 62. Avtaeva A. A., Shematovich V. I. Photochemical losses in the upper atmosphere of exoplanet π Men c depending on the state of the neutral atmosphere //INASAN Science Reports. – 2022. – T. 7. – C. 189-194.

- 63. Avtaeva A. A., Shematovich V. I. Nonthermal atmospheric loss of the exoplanet GJ 436b due to H2 dissociation processes //Solar System Research. 2021. T. 55. №. 2. C. 150-158.
- 64.Avtaeva A., Shematovich V. Comparison of non-thermal atmospheric losses for hot exoplanets //ASTRONOMY AT THE EPOCH OF MULTIMESSENGER STUDIES. – 2021. – C. 211.
- 65.Yan M., Sadeghpour H. R., Dalgarno A. Photoionization cross sections of He and H2 //The Astrophysical Journal. 1998. T. 496. №. 2. C. 1044.
- 66.Dalgarno A., McCray R. A. Heating and ionization of HI regions //Annual review of astronomy and astrophysics. 1972. T. 10. №. 1. C. 375-426.
- 67.Voronov G. S. A practical fit formula for ionization rate coefficients of atoms and ions by electron impact: Z= 1–28 //Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1997. T. 65. №. 1. C. 1-35.
- 68.McConnell J. C., Majeed T. H3+ in the Jovian ionosphere //Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1987. T. 92. №. A8. C. 8570-8578.
- 69. Tsang W., Hampson R. F. Chemical kinetic data base for combustion chemistry. Part I. Methane and related compounds //Journal of physical and chemical reference data. – 1986. – T. 15. – №. 3. – C. 1087-1279.
- 70.Kim Y. H., Fox J. L. The chemistry of hydrocarbon ions in the Jovian ionosphere //Icarus. – 1994. – T. 112. – №. 2. – C. 310-325.
- 71.Murray-Clay R. A., Chiang E. I., Murray N. Atmospheric escape from hot Jupiters //The Astrophysical Journal. – 2009. – T. 693. – №. 1. – C. 23.
- 72.Miller S. et al. Cooling by H3+ emission //The Journal of Physical Chemistry A.
   2013. T. 117. №. 39. C. 9770-9777.
- 73.Keppens R., Goedbloed J. P. Stationary and Time-Dependent MHD Simulations of the Solar Wind //Magnetic Fields and Solar Processes. – 1999. – T. 448. – C. 1177.
- 74.France K. et al. The MUSCLES treasury survey. I. Motivation and overview //The Astrophysical Journal. – 2016. – T. 820. – №. 2. – C. 89.

- 75.Tasitsiomi A. On the transfer of resonant-line radiation in mesh simulations //The Astrophysical Journal. 2006. T. 648. №. 1. C. 762.
- 76.Drake G. W. F. Theory of Relativistic Magnetic Dipole Transitions: Lifetime of the Metastable 2 S 3 State of the Heliumlike Ions //Physical Review A. 1971.
   T. 3. №. 3. C. 908.
- 77.Badnell N. R. Radiative recombination data for modeling dynamic finite-density plasmas //The Astrophysical Journal Supplement Series. 2006. T. 167. №.
  2. C. 334.
- 78.Osterbrock D. E., Ferland G. J. Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei. – University science books, 2006.
- 79.Norcross D. W. Photoionization of the He metastable states //Journal of Physics
  B: Atomic and Molecular Physics. 1971. T. 4. №. 5. C. 652.
- 80.Bray I. et al. Thermally averaged electron collision strengths for //Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 2000. T. 146. №. 3. C. 481-498.
- 81.Roberge W., Dalgarno A. The formation and destruction of HeH/+/in astrophysical plasmas //Astrophysical Journal, Part 1, vol. 255, Apr. 15, 1982, p. 489-496. – 1982. – T. 255. – C. 489-496.
- 82.Allart R. et al. The near-infrared helium triplet: A tracer of extended atmospheres //EPSC-DPS Joint Meeting 2019. – EPSC, 2019. – C. EPSC-DPS2019-1529.
- 83.Pillitteri I. et al. FUV variability of HD 189733. Is the star accreting material from its hot Jupiter? //The Astrophysical Journal. 2015. T. 805. №. 1. C. 52.
- 84.Shulyak D. et al. Line-by-line opacity stellar model atmospheres //Astronomy & Astrophysics. 2004. T. 428. №. 3. C. 993-1000.
- 85.Menager H. et al. Calculation of the H Lyman α emission of the hot Jupiters HD 209458b and HD 189733b //Icarus. 2013. T. 226. №. 2. C. 1709-1718.
- 86.Wang L., Dai F. Metastable Helium Absorptions with 3D Hydrodynamics and Self-consistent Photochemistry. I. WASP-69b, Dimensionality, X-Ray and UV Flux Level, Spectral Types, and Flares //The Astrophysical Journal. – 2021. – T. 914. – №. 2. – C. 98.

- 87.Spitzer Jr L. The Dynamics of the Interstellar Medium. I. Local Equilibrium //Astrophysical Journal, vol. 93, p. 369. – 1941. – T. 93. – C. 369.
- 88.Казанцев А. П., Сурдутович Г. И., Яковлев В. П. Механическое действие света на атомы. – Наука, 1991.
- 89.Летохов В. С., Миногин В. Г. Основы лазерной спектроскопии
   //БИБЛИОГРАФИЯ. 1985. Т. 535. №. 375. С. 049.3.
- 90.Dijkstra M. et al. Correction to: Physics of Ly α Radiative Transfer //Lymanalpha as an Astrophysical and Cosmological Tool: Saas-Fee Advanced Course 46. Swiss Society for Astrophysics and Astronomy. – 2019. – C. C1-C2.
- 91.Lagrange A. M. et al. The Beta Pictoris circumstellar disk. XXIV. Clues to the origin of the stable gas //Astronomy and Astrophysics. 1998. T. 330. C. 1091-1108.
- 92.Kirk J. et al. Confirmation of WASP-107b's Extended Helium Atmosphere with Keck II/NIRSPEC //The Astronomical Journal. 2020. T. 159. №. 3. C. 115.
- 93.Wang L., Dai F. Metastable Helium Absorptions with 3D Hydrodynamics and Self-consistent Photochemistry. II. WASP-107b, Stellar Wind, Radiation Pressure, and Shear Instability //The Astrophysical Journal. 2021. T. 914. №. 2. C. 99.