

# ГОРЯЧИЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ, НОВЫЙ КЛАСС ПЛАНЕТ, НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ



**ШАЙХИСЛАМОВ Ильдар Фаритович,**

доктор физико-математических наук  
Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН

**ХОДАЧЕНКО Максим Леонидович,**

Институт космических исследований,  
Австрийская академия наук, Грац, Австрия

DOI: 10.7868/50044394820030020

***В настоящее время обнаружение и изучение экзопланет является одной из самых бурно развивающихся отраслей астрофизики и астрономии, которая к тому же стимулирует другие области физики, химии и астробиологии. Значительная часть астрономических наблюдений активно переключилась на эту область. Были специально созданы и успешно проработали на орбите такие телескопы как CoRoT и Kepler, которые открыли тысячи экзопланет. Планируется также запуск Российской ультрафиолетовой обсерватории «Спектр-УФ». Благодаря космическому телескопу им. Хаббла были получены уникальные данные о транзитах экзопланет в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Все больше рабочего времени наземных телескопов посвящаются наблюдениям экзопланетных атмосфер, и в последнее время были получены высококачественные спектры поглощения в линиях видимого и инфракрасного диапазонов. На следующие 10 лет запланирован ввод в эксплуатацию гигантских наземных телескопов, которые тоже будут нацелены на изучение экзопланет. Эта активность связана с тем, что данная область знаний только формируется, и в ближайшие годы будет сделано большое количество фундаментальных открытий и создан задел на многие годы вперед.***

**И**з большого разнообразия экзопланет особо выделяются так называемые горячие юпитеры, которые, по меркам Солнечной системы, обращаются экстремально близко к звезде. В силу относительно короткого периода транзита и достаточно большого размера объекта такие планеты создают хорошо выраженную модуляцию кривой блеска. Их гораздо легче обнаружить на фоне естественных и инструментальных шумов даже без длительных непрерывных наблюдений. Таким образом, и в дальнейшем горячие юпитеры останутся многочисленным классом вновь открываемых экзопланет и важным объектом исследований. В настоящий момент около 10% всех обнаруженных экзопланет являются горячими юпитерами или теплыми нептунными, то есть обладают массой от 0.05 до 5 масс Юпитера и имеют радиус орбиты <0.2 а.е. При этом практически половина из них обращаются вокруг своих звезд на расстояниях менее чем 0.05 а.е., что в 8 раз меньше, чем орбита Меркурия и составляет менее десятка радиусов звезды.

Сам факт обнаружения горячих юпитеров поставил вопрос о пересмотре теорий формирования планетных систем, и в настоящее время разрабатываются модели интенсивной миграции планет, либо их формирования непосредственно вблизи звезды. Только детальное понимание эволюции горячих планет позволит решить эту проблему. Транзитная спектроскопия открывает уникальные возможности для определения независимым образом химического состава планет за пределами Солнечной системы и сравнения с другими способами измерений. Она также способна дать информацию о параметрах

плазменного ветра звезд. Поскольку непосредственное измерение скорости, температуры и плотности ветра других звезд является недоступным, создание соответствующих методов имеет большую научную значимость.

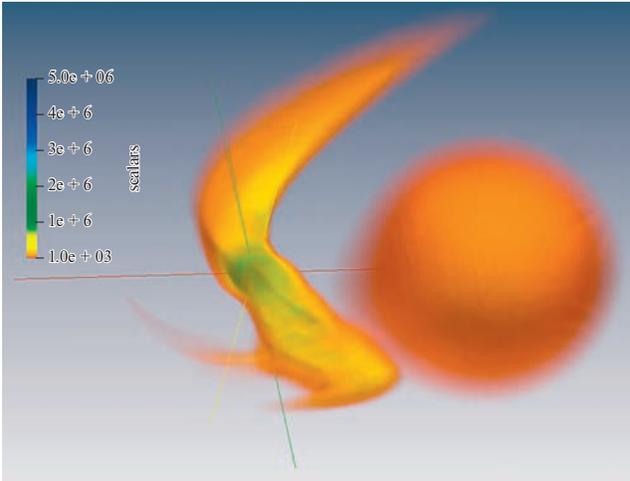
Плазма атмосфера горячих экзопланет, образованная истечением верхней атмосферы под воздействием звездной радиации, является новым объектом в астрофизике и космической плазме.

*Плазма атмосфера горячих экзопланет, образованная истечением верхней атмосферы под воздействием звездной радиации, является новым объектом в астрофизике и космической плазме.*

Интенсивный выброс планетарного вещества в форме ветра, зачастую сверхзвукового, оказывает влияние на всю звездную систему и порождает ряд новых, ранее не изучавшихся процессов. В связи с этим возникло несколько задач, которые охватывают ряд научных направлений – миграция

планет, планетные атмосферы и их эволюция, аккреция планетарного вещества на звезду. Исследование и моделирование плазмосфер горячих экзопланет необходимо в первую очередь для интерпретации наблюдательных данных, поскольку значительно расширяет возможности по измерению самых разных физических и химических характеристик как самих планет, так и родительских звезд. Вопросы эволюции планетарных атмосфер и наблюдательный потенциал горячих экзопланет также затрагивают общенаучные проблемы – формирование планетарных систем пригодных для жизни, поиск биомаркеров, космическая погода вокруг других звезд.

Понимание того, что газовые планеты, вращающиеся на экстремально близких орбитах, создают вокруг себя уникальную плазменную и экзосферу, начало складываться с 2003 года. Гельмут Ламмер из Института космических исследований Австрийской академии



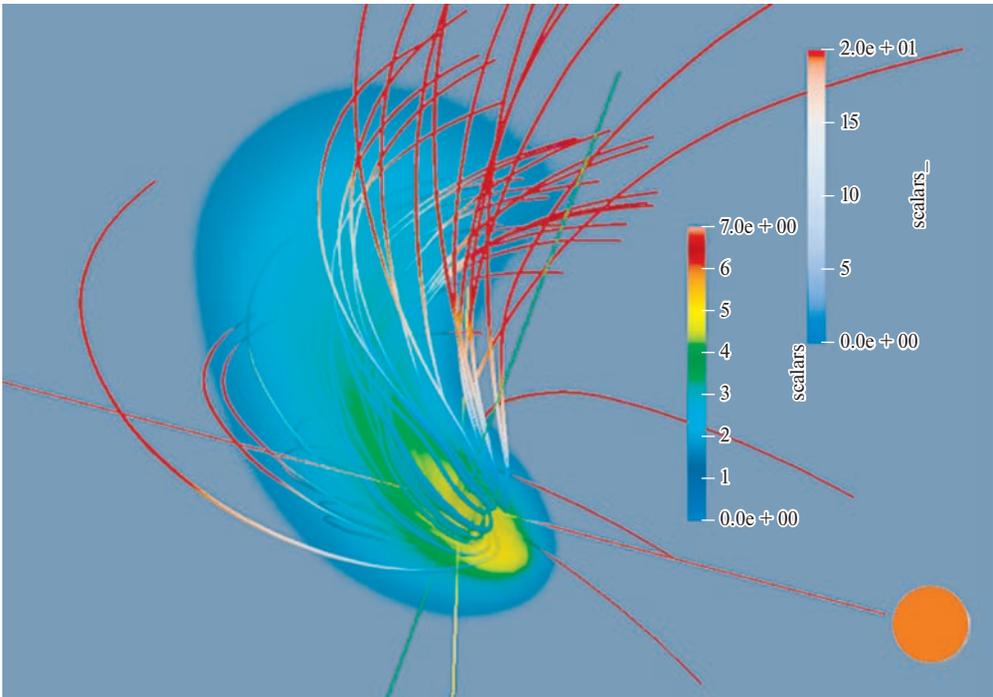
Планетарное течение горячего Юпитера HD209458b на фоне родительской звезды Солнечного типа. Концентрация протонов. Источник: Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Al-Ubaidi T., Lammer H., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., & Rumenskikh M.S. (2018, September). *Global 3D multi-fluid aeronomy simulation of the HD209458b*. In *European Planetary Science Congress (Vol. 12)*

наук и его коллеги в 2003 г. впервые показали, что водородная атмосфера газовых гигантов должна нагреваться до температуры в несколько тысяч кельвинов и не может удерживаться гравитацией планеты. Механизм нагрева – поглощение ионизирующей радиации с образованием ионов и энергичных фотоэлектронов – хорошо известен для планетарных атмосфер Солнечной системы. Именно таким образом формируется ионосфера Земли. Баланс энергии поддерживается процессами охлаждения атмосферы через переизлучение в инфракрасной и видимой области спектра, которое в основном зависит от плотности и температуры. Поскольку интенсивность радиации растет квадратично с уменьшением орбитального расстояния, то достаточно близко к звезде баланс нагрева и охлаждения нарушается, и верхняя атмосфера (термосфера) переходит в качественно иное состояние. Ее

температура значительно вырастает, пока не становится существенным переизлучение в ультрафиолетовой области спектра, в основном в линии Ly $\alpha$ , через возбуждение атомов водорода горячими электронами. Оценки показывают, что новое сбалансированное состояние термосферы достигается при температуре порядка 10 000 К. Однако, если планета не является сверхмассивной и не обладает значительным магнитным полем, то при такой температуре термосфера не может быть статической. Как было показано Паркером для солнечного ветра, когда тепловая скорость частиц достигает

около 30% от второй космической скорости, развивается сверхзвуковое течение газа.

В том же 2003 г. было сделано по сути революционное открытие на телескопе Хаббл – Видал Мадьяр и коллеги обнаружили 15% уменьшение интенсивности в звездной линии излучения Ly $\alpha$  во время транзита горячего юпитера HD209458b. Дополнительный анализ и повторные измерения дали несколько меньшую величину 7–10%. При этом глубина фотометрического транзита этой планеты составляет всего 1.5%. Сравнение данных величин показывает, что вокруг HD209458b имеется плотное облако атомов водорода, размер которого в 2–3 раза превышает размер планеты. Это является прямым подтверждением существования обширной частично ионизированной плазмосферы вокруг горячих экзопланет. Вскоре поглощение в линии Ly $\alpha$  на уровне 10% также было обнаружено



Огромное планетарное облако вокруг теплового непуна GJ 436 b (расположен в центре координат), сформированное в результате истечения верхней атмосферы под воздействием ионизирующей радиации родительской звезды (красный карлик GJ 436, красный кружок в масштабе). Расстояние от звезды до планеты составляет 4.35 млн км. Линиями показаны траектории течения планетарного вещества. Цветовые шкалы показывают градации концентрации в логарифмической шкале от  $10^0$  до  $10^7$   $\text{см}^{-3}$  и скорости движения от 0 до 200 км/с. Источник: Шайхисламов И.Ф. Семинар «На пути к пониманию разнообразия планетарных атмосфер» состоялся в Международном институте космических наук, Берн, Швейцария, 12–16 ноября 2018 г.

у горячего юпитера HD189733b и газового гиганта 55 Сnc.

Качественно новый уровень данных о плазмосфере горячих экзопланет дали транзитные наблюдения теплового непуна GJ 436b, впервые проведенные Дженифер Кулоу и коллегами с помощью телескопа Хаббл и описанные в их статье 2014 г. Измерения показали значительное, до 70%, поглощение в линии  $\text{Lu}\alpha$ , что в 100 раз превышает фотометрическую глубину транзита! Величина сигнала, хорошее отношение шум/сигнал, повторяемость в нескольких сеансах наблюдений

впервые позволили построить в спектральной линии транзитную кривую, то есть зависимость поглощения от времени по мере прохождения планеты на фоне диска звезды. В частности, обнаружилось, что для GJ 436b заметное поглощение начинается за два часа до максимума оптического поглощения и продолжается после него долгое время. Это указывает на существование обширной поглощающей плазмосферы, превышающей по размеру диск звезды. Самое интересное то, что это поглощение наблюдается в основном в синем крыле линии, в интервале

доплеровских скоростей 50–150 км/с. Атомы водорода с такими скоростями называются Энергичные Нейтральные Атомы (ЭНА) и хорошо известны в экзосферах Меркурия, Венеры, Земли и Марса. В случае GJ 436b, энергия ЭНА, их количество и выделенное направление движения от звезды к наблюдателю невозможно объяснить исключительно нагревом и ускорением расширяющейся планетарной термосферы.

Помимо линии Луа, транзитные измерения телескопом Хаббл в дальней ультрафиолетовой области обнаружили для ряда экзопланет поглощение в сильных резонансных переходах таких элементов, как углерод, кислород, кремний, магний. Наибольшее количество измерений сделано для горячего юпитера HD 209458b. Глубина поглощения для мультиплетов атома кислорода (130.5 нм) и иона углерода (133.6 нм) составила 10.5% и 7.5% соответственно, то есть сравнимо или даже больше чем для атомов водорода! Учитывая, что полуширина этих линий в пересчете на относительную скорость составляет 25–30 км/с и что содержание этих элементов в атмосфере планеты должно быть существенно меньше, чем водорода, факт поглощения указывает на то, что истекающий планетарный ветер является достаточно плотным, чтобы уносить с собой тяжелые элементы, и что характерные скорости истечения достигают нескольких десятков км/с.

Вскоре после обнаружения первых горячих юпитеров для описания их плазмосферы были применены 1D аэрономические газодинамические модели, которые в том числе были соз-

даны и российскими учеными (можно обратиться к работам автора, а также работам сотрудников Института астрономии РАН, например, В.И. Шематовича). Основой таких моделей стали исследования, проведенные ранее для ионосфер и экзосфер Земли, Марса и Юпитера. Численное моделирование подтвердило, что из-за экстремального нагрева коротковолновым излучением звезды, способным ионизовать атомы водорода ( $\lambda < 91.2$  нм), близко-орбитальные планеты действительно должны формировать поток вещества в форме газо-плазменного планетарного ветра, который преодолевает гравитационное притяжение планеты и уходит за границу полости Роша со сверхзвуковыми скоростями. В этих работах были рассмотрены по отдельности основные факторы и процессы, влияющие на формирование

планетарного ветра, такие как ультрафиолетовый и мягкий рентгеновский спектр звезды и особенности его поглощения, приливные силы, водородная плазмо-фото-химия и более тяжелые элементы в составе атмосферы, газодинамика ускорения частично ионизованной плазмы, процессы инфракрасного и ультрафиолетового охлаждения, неоднородность нагрева.

Расчетная температура экзосферы в  $\sim 10^4$  К, скорость истечения  $\sim 10$  км/с и потеря массы в диапазоне  $\sim 10^9$ – $10^{12}$  г/с качественно соответствуют транзитным спектральным наблюдениям. Однако, количественная интерпретация спектральных измерений потребовала перехода с относительно простых одномерных кодов к двух- и трехмерным.

*Самое интересное то, что это поглощение наблюдается в основном в синем крыле линии, в интервале доплеровских скоростей 50–150 км/с. Атомы водорода с такими скоростями называются Энергичные Нейтральные Атомы (ЭНА) и хорошо известны в экзосферах Меркурия, Венеры, Земли и Марса.*

Для типичного орбитального периода экзопланеты  $P \sim 3$  суток и скорости течения  $V \sim 10$  км/с, характерное расстояние, на котором течение в системе отчета планеты начинает закручиваться силой Кориолиса,  $L = VP/2\pi$ , составляет 5–10 радиусов Юпитера. Это сравнимо с типичным размером полости Роша, а также типичным расстоянием перехода течения в сверхзвуковой режим. Более того, оказывается, что если предполагать для звезды солнечного типа типичное давление Солнечно-го Ветра, то оно сравнивается с тепловым и кинетическим давлением планетарного ветра на тех же расстояниях порядка 10 радиусов Юпитера. Все это и диктует необходимость моделирования задачи 3D кодами, позволяющими корректно учесть эффекты приливных и инерционных сил, а также зональные течения с дневной на ночную сторону планеты.

Одним из факторов, который может значительно изменить сложившиеся подходы к моделированию горячих экзопланет, являются примеси металлов в их атмосфере. Несмотря на их предполагаемое малое содержание в газовых планетах, интенсивность фотоионизации и образования фотоэлектронов резко нарастают с уменьшением потенциала ионизации элемента. Это связано с резким увеличением интенсивности спектра излучения звезд с уменьшением энергии кванта в диапазоне 5–15 эВ. Например, для Солнца интенсивность в этом диапазоне меняется на четыре порядка величины! Сложность моделирования кинетики основных примесных элементов, таких как углерод, кислород, железо, хорошо известна из исследований ионосфер Земли и Юпитера. Соответствующая фото-плазма-

*Одним из факторов, который может значительно изменить сложившиеся подходы к моделированию горячих экзопланет, являются примеси металлов в их атмосфере.*

химия включает сотни реакций, взаимное влияние которых в различных условиях остается мало изученным. Более того, сечения реакций измерены только в ограниченном диапазоне параметров, и в будущем можно ожидать их существенной корректировки.

Другим сложным фактором является кинетика возбужденных состояний и каналы охлаждения фотоэлектронов (за более подробной информацией можно обратиться к работам Д.В. Бисикало и В.И. Шематовича, ученых из Института астрономии РАН). Несмотря на то, что типичное время жизни возбужденных уровней резонансных переходов обычно очень мало (порядка 1–100 нс), для близко-орбитальных планет фотоионизация с возбужденных уровней может оказаться важнее фотоионизации с основного состояния. Ввиду того, что плазма атмосферы горячих экзопланет достаточно плотная и протяженная, резонансные фотоны захватываются и медленно диффундируют в процессе поглощения и переизлучения. В результате образуется популяция возбужденных атомов. Излучение звезды в линии  $\text{Ly}\alpha$ , которая обычно является самой сильной в спектре, накачивает второй уровень основного элемента газовых гигантов – атома водорода, что приводит к поглощению в линии  $\text{H}\alpha$ . Это создает два важных эффекта. В отличие от  $\text{Ly}\alpha$ , линия  $\text{H}\alpha$  хорошо детектируется наземными телескопами и в последние годы было обнаружено поглощение для нескольких транзитных горячих юпитеров: HD 189733b, HD 209458b, KELT-9b, KELT-20b. Другой эффект состоит в том, что возбужденный атом водорода фотоионизируется гораздо быстрее и гораздо более широким спектром излуче-

ния звезды  $\lambda < 656.4$  нм, что приводит к дополнительному нагреву плазмосферы фотоэлектронами и значительному усилению планетарного ветра. В первую очередь, это касается горячих звезд спектральных классов А и В, для которых наклон спектра от видимой области до ультрафиолетовой особенно сильный, таких как, например, Kelt 9.

В последние годы в связи с резким ростом числа обнаруженных транзитных экзопланет значительно увеличилось количество и качество наблюдений наземными телескопами. Спектральное разрешение наземных телескопов даже средних размеров в видимой и инфракрасной области на один-два порядка превышает возможности космических телескопов Хаббл или Спитцер. Также, наземные инструменты, в отличие от космических телескопов, могут обеспечить длительное время наблюдений одного и того же объекта. В результате измерений поглощения в большом количестве транзитов качество данных по параметру сигнал/шум у наземных телескопов принципиально выше. Это позволяет детектировать поглощение в линиях даже на уровне 0.1%. Такая чувствительность резко увеличивает как набор линий, так и элементов, которые поддаются детектированию.

Одной из самых ярких и легко наблюдаемых линий является дублет натрия (589–589.5 нм), поглощение которой зарегистрировано для ряда горячих юпитеров. Однако, атомарный натрий очень легко ионизируется и находится в относительно плотных слоях атмосферы. Поэтому разница между фотометрическим поглощением и поглощением в этой линии очень мала, порядка 0.1%, а получаемая информация отражает состояние относительно глубоких и плотных слоев атмосферы. Другая ситуация с линиями атомарного водорода H $\alpha$  (656.3 нм) и гелия

(1083 нм). Эти элементы могут присутствовать в плазмосфере горячих экзопланет очень высоко. Если поглощение в H $\alpha$  образуется за счет первичного поглощения линии Ly $\alpha$ , как это описано выше, то возбуждение метастабильного уровня линии триплетного гелия происходит в процессе рекомбинации He<sup>+</sup> и определяется в основном локальной температурой и степенью ионизации планетарного вещества. Таким образом, поглощение в этих линиях дает информацию о слоях термосферы планеты на высотах 1–2 радиуса планеты, то есть в области интенсивного нагрева и ускорения плазмосферы. Один из последних результатов получен для горячего нептона HAT-P-11b. Зарегистрированное превышение поглощения в 1% означает, что плазмосфера с высоким содержанием гелия простирается как минимум на два радиуса планеты. Самое интересное, что спектральная ширина поглощения соответствует Доплеровской скорости  $\pm 15$  км, объяснить которую не просто. Одна из гипотез в связи с этим предполагает, что термосфера планеты имеет сильные зональные и турбулентные течения, скорость которых может быть сверхзвуковой.

Как известно на примере Солнечной системы, магнитное поле является одним из важных и наиболее сложных факторов околопланетной космической среды. Оно прямо влияет на ионосферы/экзосферы планет и на их взаимодействие с плазмой солнечного ветра. При этом геометрия такого взаимодействия при наличии магнитного поля качественно меняется. Теоретические оценки предсказывают, что магнитные поля близко-орбитальных горячих юпитеров могут быть в несколько раз меньше, чем у солнечных газовых гигантов. Это связано с тем, что они, вероятно, являются приливно захваченными и вращаются вокруг своей оси в несколько раз медленнее.

Из примера Юпитера также известно, что мощный источник плазмы внутри магнитосферы порождает разнообразные плазменные структуры типа магнитодиска, а взаимодействие с солнечным ветром приводит к генерации интенсивного радиоизлучения, на порядки превосходящего светимость звезды в этом диапазоне.

Как показали в своей работе от 2012 г. М.Л. Ходаченко с коллегами, в применении к горячим юпитерам истекающая плазма принципиально меняет топологию магнитосферы. В первых попытках учесть влияние планетарного магнитного поля на планетарный ветер использовался теоретический анализ, предложенный в свое время для плазменного ветра магнитных звезд, который показал существование в такой структуре экваториальной зоны стагнации и высокоширотной зоны ветра. Численное МГД-моделирование подтвердило эту картину и позволило оценить, при какой величине магнитное поле планеты значительно уменьшает процесс истечения и потери массы. Для типичных горячих юпитеров такое поле оказалось вполне вероятным, в диапазоне 0.3–3 Гс. Также было обнаружено формирование истекающим потоком планетарной плазмы экваториального магнитодиска, морфологически подобного гелиосферному токовому слою. Интересно отметить, что подобный магнитодиск был также получен в лабораторном эксперименте, проведенном в Институте лазерной физики СО РАН, и только потом в численном моделировании, результаты которого представлены М.Л. Ходаченко и коллегами в 2015 г.

Неожиданным и новым результатом численного моделирования стало обнаружение того, что магнитодиск имеет ярко выраженную циклическую динамику, состоящую из последовательных фаз формирования, утончения и

быстрого магнитного пересоединения с выбросом плазмоида кольцевого типа. В отличие от суббурь в магнитосфере Земли, в плазмосфере горячего юпитера накопление магнитного потока происходит за счет планетарного течения, которое выносит этот поток из верхней атмосферы и вытягивает замкнутые силовые линии дипольного магнитного поля. Частота периодических событий пересоединения и диполяризации или релаксации магнитного поля увеличивается с увеличением собственного магнитного момента планеты. Подобные квазипериодические выбросы плазмоидов должны сопровождаться генерацией нетепловых частиц и специфических излучений, которые возможно будут обнаружены в будущих наблюдениях.

Одной из интересных проблем физики экзопланет, которая активно рассматривается в последние годы, является возможное радиоизлучение магнитных горячих юпитеров и его регистрация на Земле. Пример Солнечной системы показывает, что циклотронное излучение электронов в ионосфере магнитных планет на много порядков превосходит светимость Солнца в мегагерцовом диапазоне и его обнаружение станет прямым подтверждением существования магнитных полей у планет. Предпринятые наблюдения пока не зафиксировали такого радиоизлучения, но они активно продолжаются, и недавно на конференции EPSC-DPS в 2019 г. Джей Тёрнер и коллеги объявили о возможном первом обнаружении радиосигнала от близкой системы с горячим юпитером  $\tau$  Волопаса. Совершенствование современных радиотелескопов и будущие космические системы несомненно достигнут чувствительности, необходимой для детектирования радиоизлучения, сопоставимого по мощности с юпитерианским, но на расстояниях десятков световых лет, в пределах которых находится достаточно много экзопланет.

Важным следствием истекающего планетарного ветра является потеря массы, скорость которой может достигать значений  $10^{12}$  г/с, и за времена жизни планеты составлять заметную долю от ее полной массы. Например, для WASP-12b оценка составляет 6–12%. Некоторые системы с экстремально близко-орбитальными ( $\sim 0.01$  а.е.) газовыми гигантами показывают признаки пониженной активности звезды (низкого излучения в EUV области), что может свидетельствовать о накоплении вблизи звезды значительного количества вещества, поставляемого экзопланетой (например, WASP-12b).

Анализ распределения экзопланет на диаграмме масса – орбитальный период обнаруживает провал между популяциями каменных суперземель и газовых мининептунов. В связи с этим в настоящий момент интенсивно исследуется гипотеза о том, что промежуточные планеты с относительно малой массой и обширной первичной атмосферой не являются долго живущими объектами по причине того, что водородная оболочка, захваченная такой протопланетой, достаточно быстро теряется. В процессе эволюции планет имеется критический период первых сотен миллионов лет, когда интенсивность ионизирующей радиации звезды может на два порядка превосходить значения, характерные для последующих эпох. Такое изменение светимости в ВУФ и рентгеновских областях связано со скоростью вращения звезд, которые могут быть медленными или быстрыми ротаторами. Таким образом, для образования на планетах земного типа потенциально пригодных для жизни условий важным является процесс сброса первичной газовой оболочки вокруг каменистого ядра за первые сотни миллионов лет эволюции, когда планета находится в режиме интенсивного газодинамического истечения

атмосферы. Существование такой стадии в эволюции планет подтверждается большим разбросом наблюдаемых планетарных радиусов при относительно небольшой массе. Вполне вероятно, что потеря первоначальной газовой оболочки является определяющим фактором в процессе формирования потенциально обитаемых малых планет вокруг красных карликов.

Формирование вокруг звезды вторичного аккреционного тора из-за истечения атмосферы близко-орбитальной планеты представляет собой в настоящее время одну из актуальных, но совершенно не изученных проблем. В работе Фоссати и коллег 2019 г. впервые сделана попытка обнаружить такие системы на основе статистического анализа имеющихся наблюдательных данных. В работе Дебрехта и коллег 2018 г. впервые реализовано трехмерное МГД-моделирование динамики накопления вещества такого тора на масштабе времени порядка сотни орбит. В 2019 г. впервые обнаружен теплый газовый гигант с экстремально низкой плотностью  $\sim 0.1$  г/см<sup>3</sup>. Это указывает на то, что вскоре будет обнаружено большое количество экзопланет, находящихся на стадии интенсивного испарения, вещество которых заполняет всю систему. Изучение долговременной динамики таких объектов требует новых подходов, как в теоретическом анализе, так и численном моделировании.

В заключение хочется отметить, что горячие экзопланеты можно смело выделить как особый класс астрофизических объектов. Отдельные аспекты таких объектов хорошо изучены в Солнечной системе, но их специфическое сочетание в горячих экзопланетах создает качественно новые свойства. Их исследование в равной степени стимулируется как наблюдениями, так и численным моделированием.

Если раньше свет звезд в основном давал нам данные о самих светилах, то теперь он будет использоваться как инструмент для просвечивания экзопланетных атмосфер и прилегающего космического пространства. Наблюдательные данные в сочетании с теоретическим пониманием позволят в скором будущем получать уникальную информацию о далеких планетных системах. Создание моделей горячих экзопланет и их взаимодействия с межпланетной средой и родительской звездой идет бурными темпами. В России фундаментальным изучением экзопланет на основе комплексного численного моделирования и на уровне,

не уступающем мировому, занимаются три группы: в Институте астрономии РАН, в Лаборатории космического моделирования Института лазерной физики СО РАН, и в Институте вычислительной математики СО РАН. Все три группы активно сотрудничают между собой и с Институтом космических исследований Австрийской академии наук, а также с Институтом космических исследований Российской академии наук. Область экзопланет, будучи очень молодой, дает в настоящий момент самые широкие возможности для начинающих молодых ученых приложить свою энергию и раскрыть таланты исследователей.