

# Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

## 1. Аннотация

В нашей работе используется газодинамическая 3D-модель с учетом процессов ионизации и рекомбинации, плазмо-фото химии водородных компонент (рисунок 1). С помощью данной модели было проведено исследование взаимодействия верхних слоев атмосферы теплого Нептуна Gliese-436b с натекающей плазмой звездного ветра. При расчете транзитного поглощения линии Лайман-альфа было установлено, что оно производится в основном энергетическими нейтральными атомами за пределами лепестка Роша из-за резонансного уширения тепловой линии, в то время как влияние радиационного давления незначительно. Смоделированное поглощение хорошо согласуется с измерениями по таким признакам, как сильная асимметрия между синей и красной областями линии Лайман-альфа, а также по глубине транзита в синей области спектральной линии.

| N  | Reaction      | Product        | Rate   | Importance | Ref.                    |
|----|---------------|----------------|--|------------|-------------------------|
| 1  | $H + h\nu$    | $H^+ + e$      | $\sigma_o = 6.3 \cdot 10^{-18}$              | +          |                         |
| 2  | $H_2 + h\nu$  | $H_2^+ + e$    | $\sigma_{H_2} \approx (2 \div 2.5) \sigma_H$ | +          | Yan et. al. (1998)      |
| 3  | $H + e$       | $H + e + h\nu$ | $* 2.9 \cdot 10^{-19} T^{-0.5} e^{-11.84/T}$ | —+         | Dalgarno, McCray (1972) |
| 4  | $H + e$       | $H^+ + 2e$     | $7.3 \cdot 10^{-9} T^{0.5} e^{-15.776/T}$    | —          | Voronov (1997)          |
| 5  | $H^+ + e$     | $H + h\nu$     | $2.5 \cdot 10^{-13} T^{-0.75}$               | — +        | UMIST database          |
| 6  | $H_2^+ + e$   | 2H             | $3.5 \cdot 10^{-9} T^{-0.43}$                | —          | UMIST                   |
| 7  | $H_3^+ + e$   | $H_2 + H$      | $4 \cdot 10^{-9} T^{-0.5}$                   | +          | UMIST                   |
| 8  |               | 3H             | $7.6 \cdot 10^{-9} T^{-0.5}$                 | +          | UMIST                   |
| 9  | $H_2^+ + H_2$ | $H_3^+ + H$    | $2.1 \cdot 10^{-9}$                          | +          | UMIST                   |
| 10 | $H_3^+ + H$   | $H_2^+ + H_2$  | $2.1 \cdot 10^{-9} e^{-1.99/T}$              | —          | UMIST                   |
| 11 | $H_2^+ + H$   | $H^+ + H_2$    | $6.4 \cdot 10^{-10}$                         | +          | UMIST                   |
| 12 | $H^+ + H_2$   | $H_2^+ + H$    | $2.1 \cdot 10^{-9} e^{-2.124/T}$             | +          | McConnel et. al. (1987) |
| 13 | $H_2 + H$     | 3H             | $1.4 \cdot 10^{-8} T^{-1} e^{-8.41/T}$       | +          | UMIST                   |
| 14 | $H_2 + H_2$   | $H_2 + 2H$     | $1.4 \cdot 10^{-8} e^{-8.41/T}$              | —          | UMIST                   |
| 15 | $H_2 + 2H$    | $H_2 + H_2$    | $9.5 \cdot 10^{-35} T^{-1.3}$                | —          | Tsang & Hampson (1986)  |
| 16 | $H^+ + 2H_2$  | $H_3^+ + H_2$  | $3.2 \cdot 10^{-29}$                         | —          | Kim & Fox (1994)        |

Рисунок 1. Реакции водородной плазмо-фото-химии.

## 2. Тема работы.

Экзосфера горячих экзопланет и ее наблюдательные проявления.

## 3. Состав коллектива

- 1) Шайхисламов Ильдар Фаритович, д. ф.-м. наук, зам. директора по научной работе, ИЛФ СО РАН (руководитель)
- 2) Мирошниченко Илья Борисович, к. ф.-м. наук, научный сотрудник ИЛФ СО РАН (исполнитель)
- 3) Березуцкий Артем Григорьевич, аспирант, м.н.с ИЛФ СО РАН (исполнитель)

4) Руменских Марина Сергеевна, магистрант НГУ, инженер ИЛФ  
СО РАН (исполнитель)

#### **4. Информация о гранте**

Грант РФФИ 18-12-00080 «Экзосфера горячих экзопланет и ее наблюдательные проявления»

#### **5. Научное содержание**

##### **5.1 Современное состояние проблемы.**

Со времен первого запуска телескопа хаббл в открытый космос популярность исследования космических объектов резко возросла. В частности, лишь за последние 3 месяца было открыто порядка сотни экзопланет. Однако по причине удаленности данных объектов контактные способы измерения таких параметров, как температура, интенсивность ультрафиолетового излучения, плотность и скорость звездного ветра неприменимы. Поэтому в данном случае применяются транзитные и спектральные измерения.

Объект нашего исследования, Gliese-436b является так называемым «Теплым Нептуном», то есть имеет размер и массу, сходные с таковыми у Нептуна, однако расположен к своей родительской звезде значительно ближе (~0.03 а.е.). Атмосфера Gliese-436b состоит в основном из водорода, и звездная линия Ly- $\alpha$  активно поглощается в этой среде, поэтому транзитные измерения проводились в первую очередь именно на этой длине волны. Эта линия уширяется из-за эффекта Доплера и поглощается на определенных скоростях атомами планетарной атмосферы. По поглощенным областям спектра можно судить о скоростях компонент атмосферы и ее взаимодействия со звездным плазменным ветром. [1, 2]

1. Ehrenreich D., Bourrier V. // Nature, 2015, V. 522, P. 459-461

2. Lavie B., Ehrenreich D., Bourrier V. // A&A, 2017, V. 605

##### **5.2 Постановка задачи и описание работы.**

Предмет исследования, Gliese-436b, относится к классу Теплых Нептунов с периодом обращения 2,64 Земных суток. Из-за малого расстояния между планетой и звездой (0,03 а.е.) верхняя атмосфера ионизируется и формирует сверхзвуковое течение (рисунок 2).

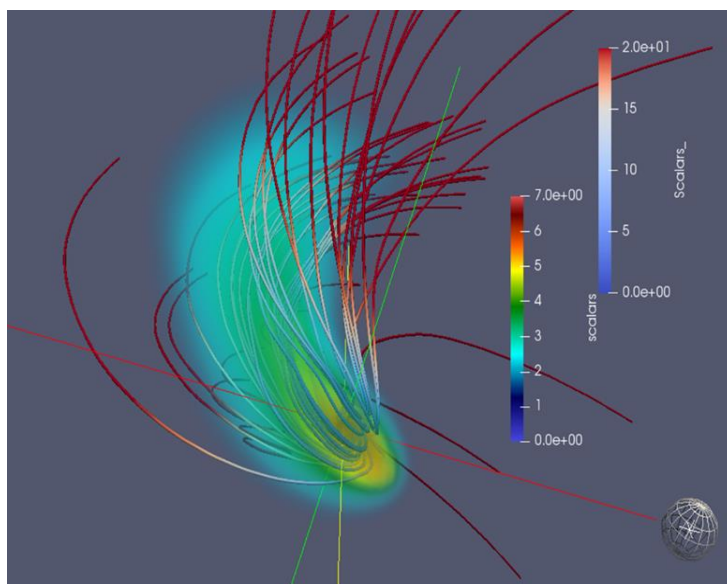


Рисунок 2. Истечение атмосферы Gliese-436b, образующее гигантский водородный хвост ~50 млн. км.

Gliese-436b, проходя перед диском звезды, поглощает часть ее излучения, что наглядно показывает транзитная кривая, зарегистрированная телескопом Хаббл (рисунок 3, точки). Для наблюдения была выбрана линия Лу-а, поскольку истекающая атмосфера планеты насыщена водородом. Время прохождения планеты через диск звезды свидетельствует о наличии облака перед планетой и протяженного хвоста позади. В работе исследовалась зависимость поглощения от таких параметров как интенсивность ионизирующего излучения (на графике XUVint) плотность звездного ветра ( $n$ ) а также его скорости и температуры. Сравнивая построенные с помощью газодинамической 3D-модели транзитные и спектральные кривые с экспериментальными данными, можно сделать вывод о параметрах ветра родительской звезды Gliese-436b.

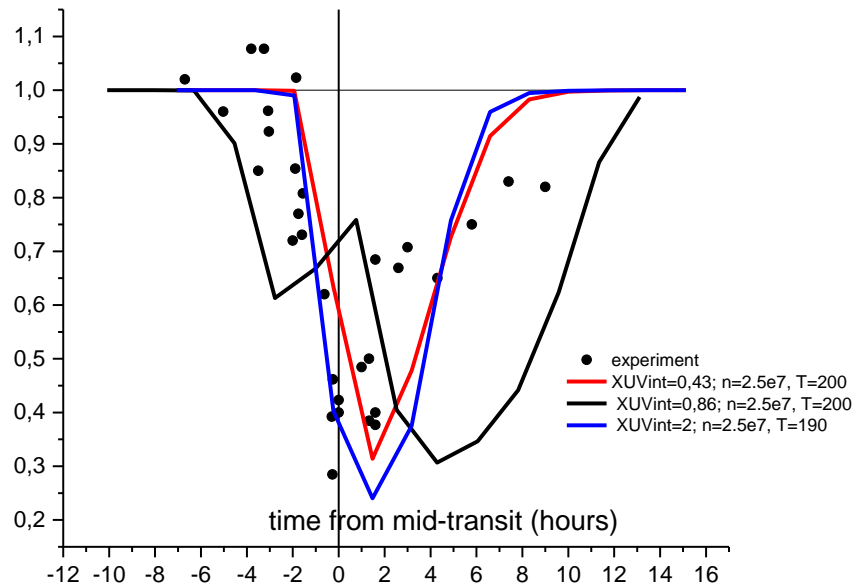


Рисунок 3. Транзитная кривая, образуемая при переходе планеты через диск звезды, снятая телескопом Хаббл (точки) а также построенные транзитные кривые при различных параметрах звездного ветра.

### 5.3 Результаты

Спектр линии Ly- $\alpha$ , излучаемый звездой Gliese-436 и зарегистрированный телескопом Хаббл, представлен на рисунке 4 (розовый пунктир). В транзите планеты линия показывает выраженное поглощение в голубом крыле в области скоростей -120 до -40 км/с— спектр звезды (красный пунктир). Это показывает существование обширного облака нейтралов, движущегося от звезды со значительной скоростью. Ускорение планетарных атомов происходит в модели за счет взаимодействия с быстрыми протонами звездного ветра, включая процесс перезарядки.

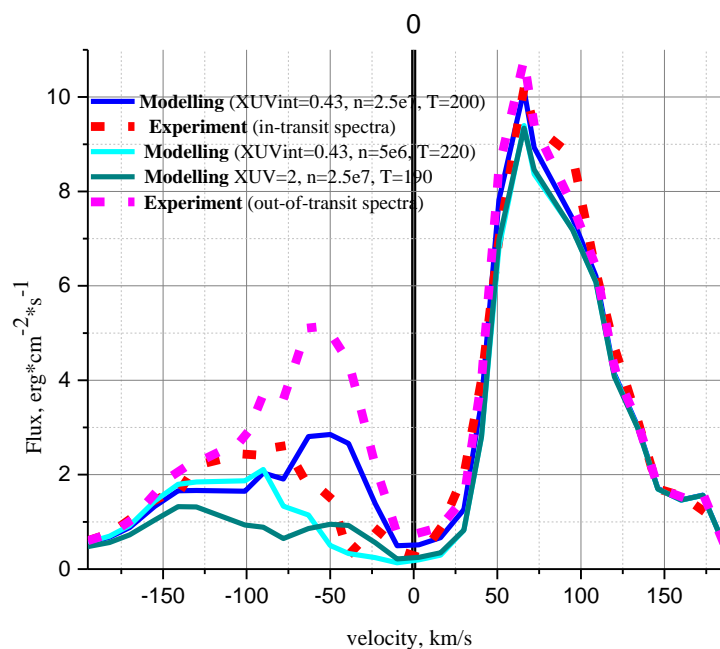


Рисунок 4. Поглощение доплеровски уширенной водородной эмиссионной линии Лайман-альфа вне транзита (розовый пунктир) и при переходе планеты через диск звезды (красный пунктир) а также построенные транзитные кривые при различных параметрах звездного ветра

В заключение стоит отметить, что в ходе работы были найдены параметры звездного ветра (интенсивность ионизирующей радиации  $0,43 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  на сравнительном расстоянии 1 а.е. ; концентрация протонов звездного ветра  $3000 \text{ см}^{-3}$  и скорость  $200 \text{ км/с}$  на орбите планеты при температуре короны  $T=2 \text{ МК}$ ) при которых спектральные и транзитные кривые хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными телескопом Hubble/STIS. Сравнение экспериментальных данных с моделированными позволяют утверждать, что газодинамическая модель достаточно точно описывает взаимодействие атмосферы Gliese-436b со звездным ветром.

В дальнейшем планируется включить в существующую модель учет влияния магнитного поля.

## 6. Эффект от использования кластера в достижении цели работы

Использование численного моделирования процессов, происходящих в атмосфере экзопланет, является ключевой частью данной работы. Гидродинамическая многожидкостная 3D-модель включает в себя учет множества факторов, потому расчеты на базе оборудования ИВЦ НГУ является значимой частью всей работы, так как применение многопроцессорных суперкомпьютеров позволяет значительно сократить время, требуемое на расчеты.

## **7. Список публикаций по теме работы.**

1. I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko, H. Lammer, A. G. Berezutsky, I. B. Miroschnichenko. 3D Aeronomy Modeling of Close-in Exoplanets . Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018
2. А.Г. Березуцкий, И.Ф. Шайхисламов, И.Б. Мирошниченко, М.С. Руменских, М.Л. Ходаченко. Взаимодействие расширяющейся атмосферы со звездным ветром вокруг экзопланеты Gliese 436 b. АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2019
3. Khodachenko M. L., Shaikhislamov I. F., Lammer H., Berezutsky A. G., Miroschnichenko I. B., Rumenskikh M. S., Kislyakova K. G, Interpretation of deep absorption in Ly $\alpha$  at transits of GJ 336b by global 3D gasdynamic model (готовится к печати).