

# Нобелевская премия по физике 2019

“За открытие экзопланеты,  
обращающейся вокруг звезды  
солнечного типа”

Michel Mayor and Didier Queloz  
University of Geneva, Switzerland

*“Using custom-made instruments, they were able to see at 6 October 1995 at the Haute-Provence Observatory in southern France, the planet around the star 51 Pegasi (Bellerophon), a gaseous ball comparable with the solar system’s biggest gas giant, Jupiter”*

# Параметры экзопланеты *51 Pegasi b*

- Период обращения 4.2 дня
- Радиус орбиты 0.053 астр. ед.
- Масса – 0.5 массы Юпитера.
  
- Расстояние до звезды 50.45 световых года.
- Имя данное международным астрономическим союзом – Dimidium.
- Метод обнаружения – измерение радиальной скорости чувствительным спектрографом, способным измерить Доплеровское смещение линий на уровне лучше 100 м/с.
- Открытие было независимо подтверждено Калифорнийской обсерваторией Lick через неделю после объявления.

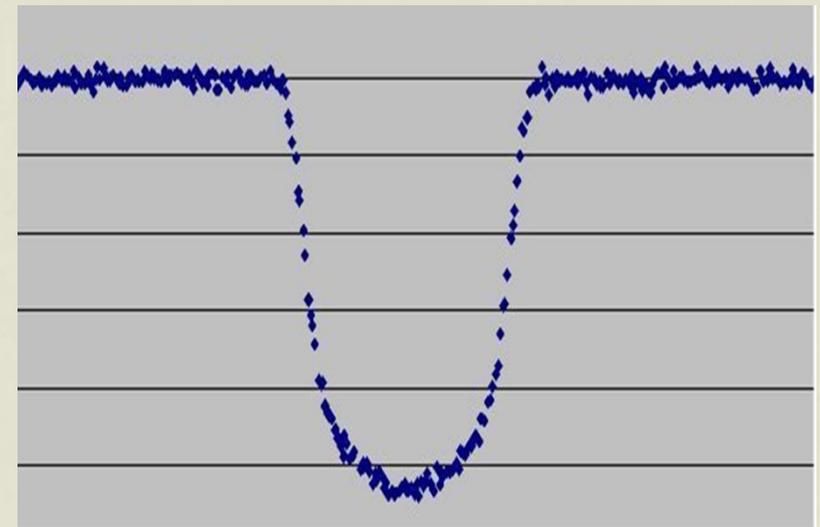
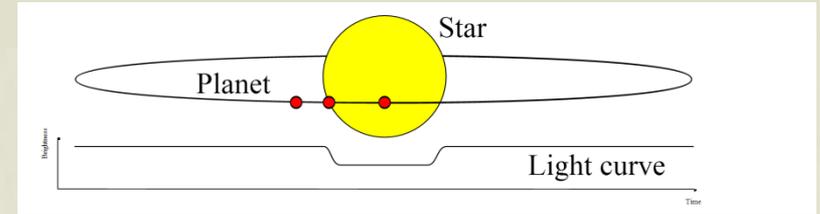
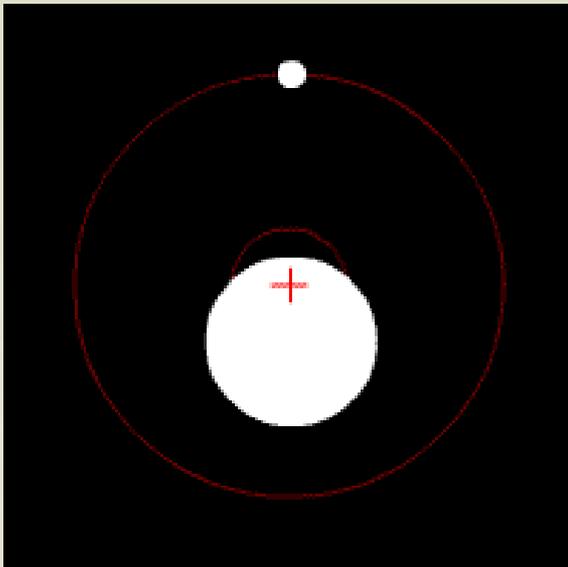
# Предыстория

- Джордано Бруно первым предположил, что звезды на небосклоне аналогичны Солнцу и должны иметь планеты.
- Исаак Ньютон также упоминает об этой возможности в своем труде "General Scholium".
- **Первое опубликованное открытие экзопланеты** сделано в 1988 году канадскими астрономами Bruce Campbell, G. A. H. Walker, and Stephenson Yang. (звезда Gamma Cephei, двойная система). **Подтверждение** получено только в 2002 г.
- В 1992 году была открыта планета вокруг пульсара PSR 1257.

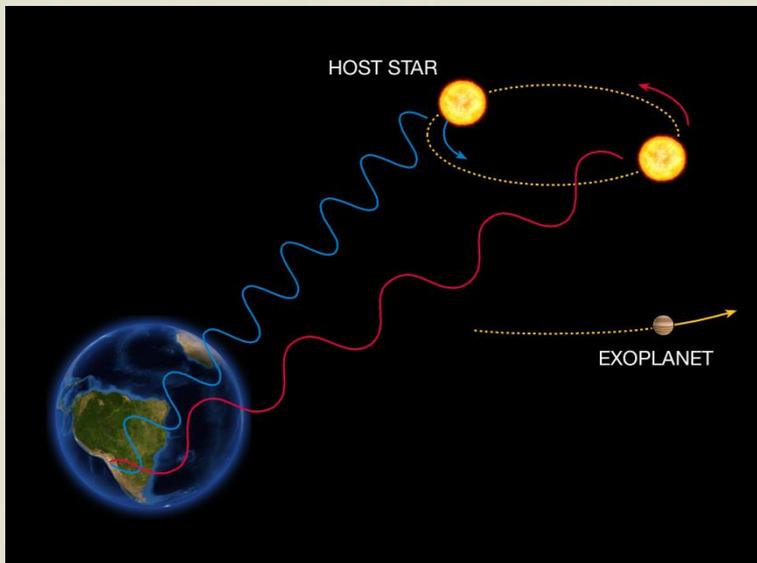
# Некоторые факты

- К настоящему времени открыто около 4000 экзопланет в 3000 звездных системах.
- Спектрограф HARPS на Европейской обсерватории в Чили обнаружил с 2004 около 100 экзопланет.
- Космический телескоп Kepler совершил революцию, обнаружив в период 2009-2016 около 2500 экзопланет.
- В сентябре начал действовать Космический телескоп TESS, который позволит обнаружить порядка 10000 экзопланет.
- В среднем каждая звезда имеет одну планету. Около 1 из 5 звезд солнечного типа должны иметь земле-подобную планету в зоне обитаемости, ближайшая ожидается в радиусе 12 световых лет.
- Ближайшая экзопланета - звезда Проксима Центавра, 4.25 св. года

# Методы обнаружения



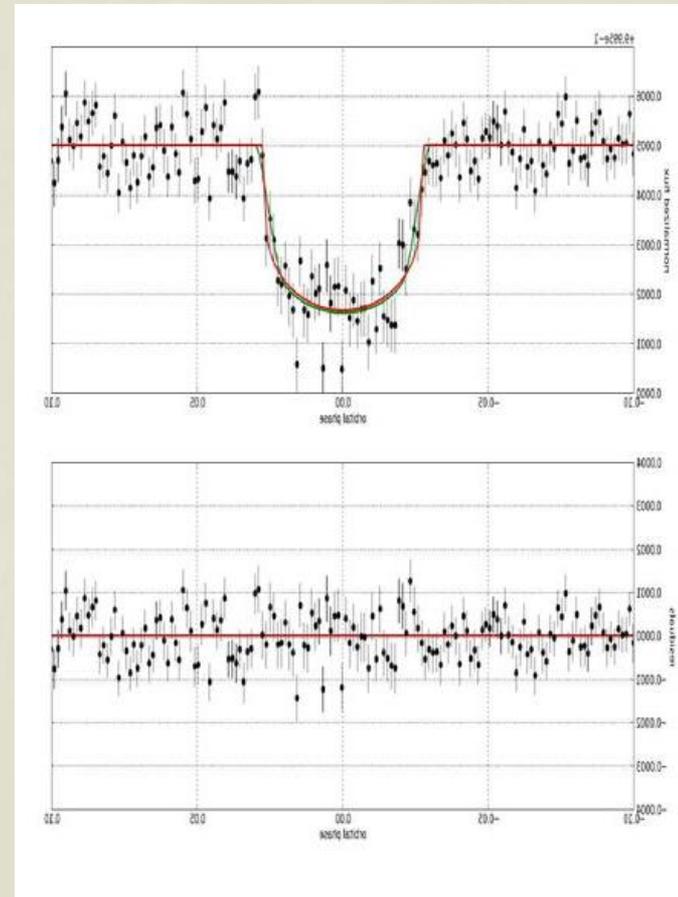
Транзитные периодические осцилляции яркости звезды



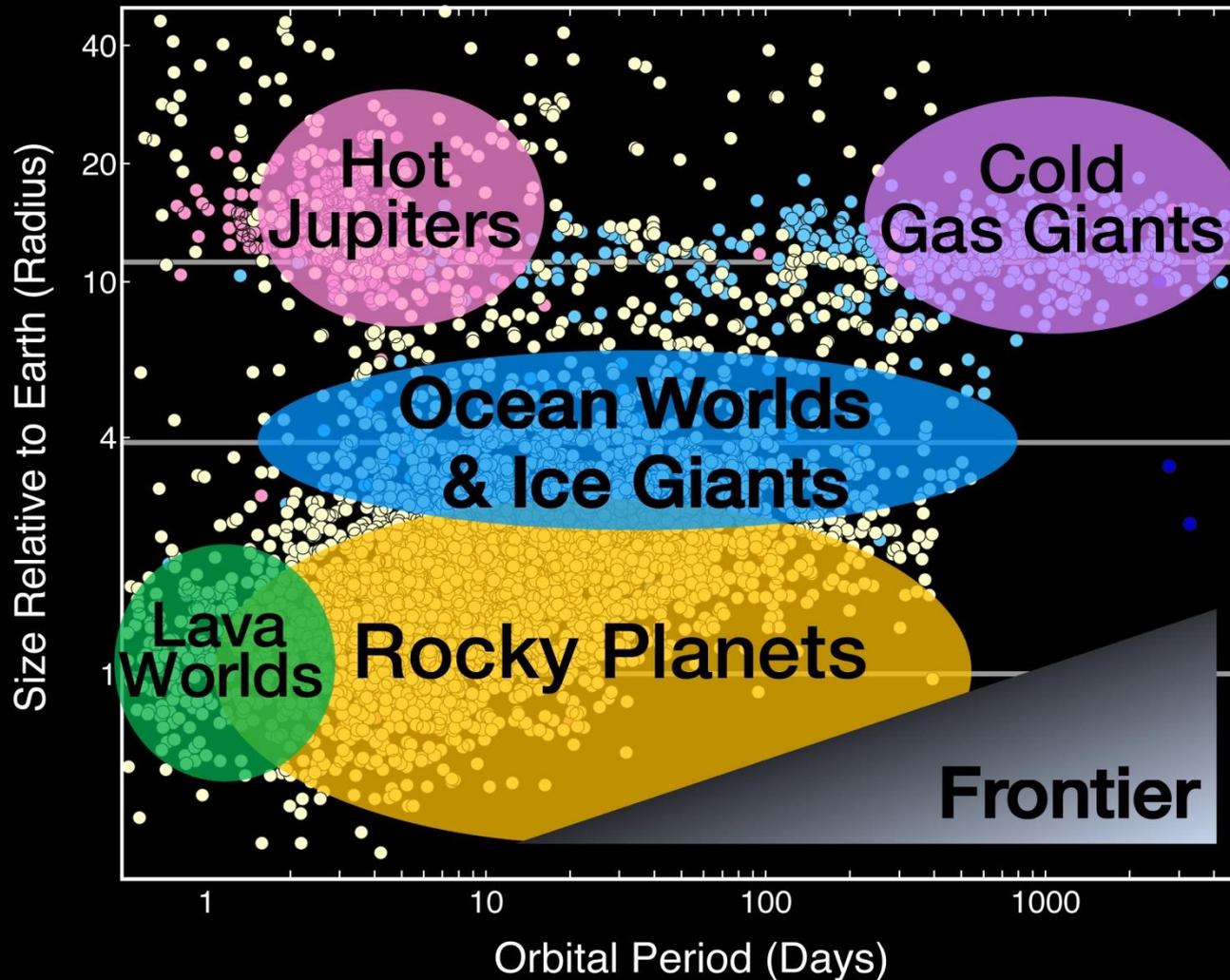
Периодическое смещение центра линий излучения звезды за счет Доплеровского сдвига.

# Пример транзитных фотометрических измерений

- **CoRoT** (**CO**nvection **RO**tation et **T**ransits planétaires) is European space observatory launched into orbit in 2006 by Soyuz rocket. Operated until November 2012. It is based on 27 cm telescope and 4 CCD array 2048 by 2048 pixels. **Accuracy of brightness measurement is  $10^{-4}$ .**

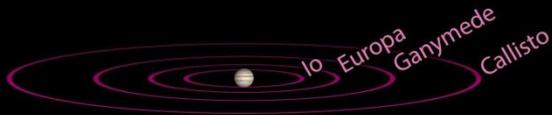


# Статистика экзопланет

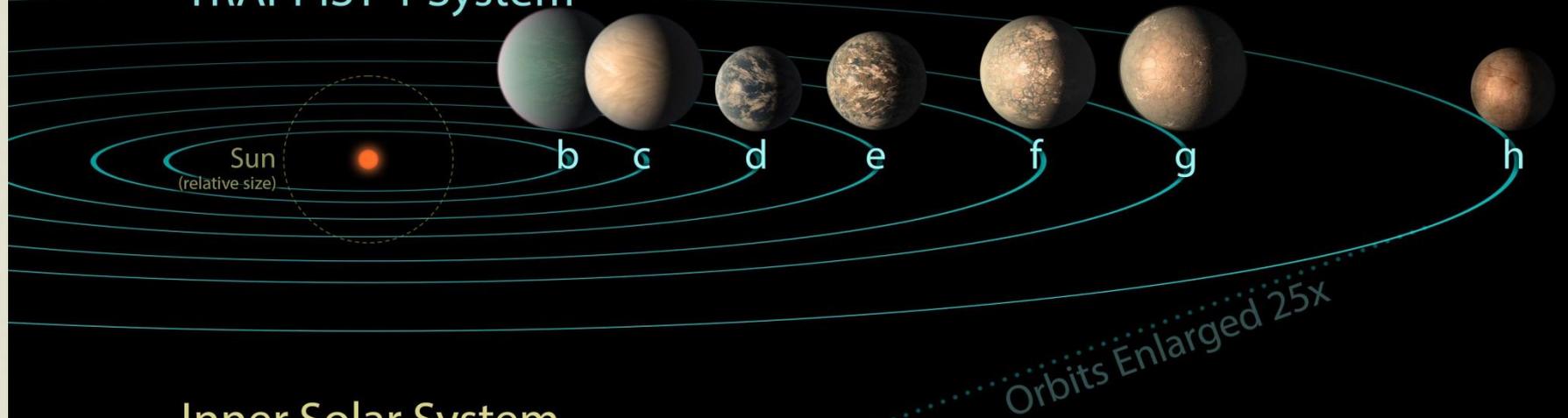


# Пример много-планетной системы

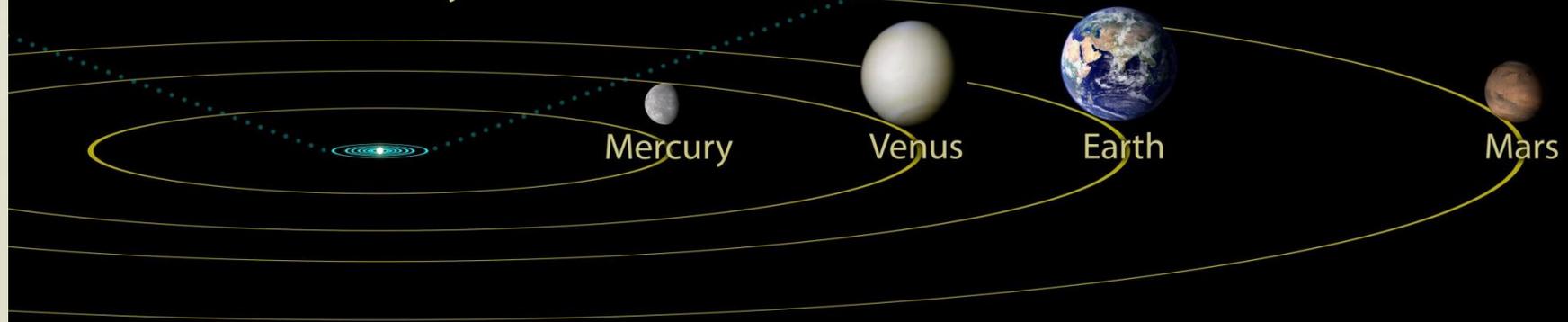
## Jupiter & Major Moons



## TRAPPIST-1 System



## Inner Solar System



**Great Paris Exhibition Telescope**

(lens at the same scale)  
Paris, France (1900)

**Yerkes Observatory**  
(40" refractor lens at the same scale)  
Williams Bay, Wisconsin (1893)

**Hooker (100")**  
Mt Wilson, California (1917)

**Hale (200")**  
Mt Palomar, California (1948)

**Multi Mirror Telescope**  
(1979-1998)  
Mount Hopkins, Arizona

**Hobby-Eberly Telescope**  
Davis Mountains, Texas (1996)

**BTA-6 (Large Altazimuth Telescope)**  
Zelenchuksky, Russia (1975)

**Large Zenith Telescope**  
British Columbia, Canada (2003)

**Gaia**  
Earth-Sun L2 point (2014)

**Kepler**  
Earth-trailing solar orbit (2009)

**James Webb Space Telescope**  
Earth-Sun L2 point (planned 2018)

**Hubble Space Telescope**  
Low Earth Orbit (1990)



Tennis court at the same scale

**Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope**  
Hebei, China (2009)



**Hobby-Eberly Telescope**  
Davis Mountains, Texas (1996)

**Large Binocular Telescope**  
Mount Graham, Arizona (2005)

**Very Large Telescope**  
Cerro Paranal, Chile (1998-2000)

**Magellan Telescopes**  
Las Campanas, Chile (2000/2002)

**Gran Telescopio Canarias**  
La Palma, Canary Islands, Spain (2007)

**Southern African Large Telescope**  
Sutherland, South Africa (2005)

**Large Binocular Telescope**  
Mount Graham, Arizona (2005)

**Very Large Telescope**  
Cerro Paranal, Chile (1998-2000)

**Magellan Telescopes**  
Las Campanas, Chile (2000/2002)

**Keck Telescope**  
Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)

**Gemini North**  
Mauna Kea, Hawaii (1999)

**Gemini South**  
Cerro Pachón, Chile (2000)

**Large Synoptic Survey Telescope**  
El Peñón, Chile (planned 2020)

**Giant Magellan Telescope**  
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)

**Giant Magellan Telescope**  
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)

**Overwhelmingly Large Telescope**  
(cancelled)  
Arecibo radio telescope at the same scale

**Keck Telescope**  
Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)

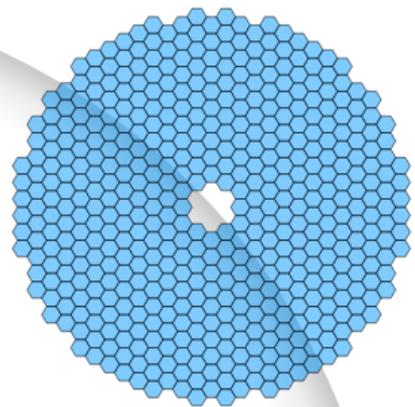
**Subaru Telescope**  
Mauna Kea, Hawaii (1999)

**Gemini South**  
Cerro Pachón, Chile (2000)

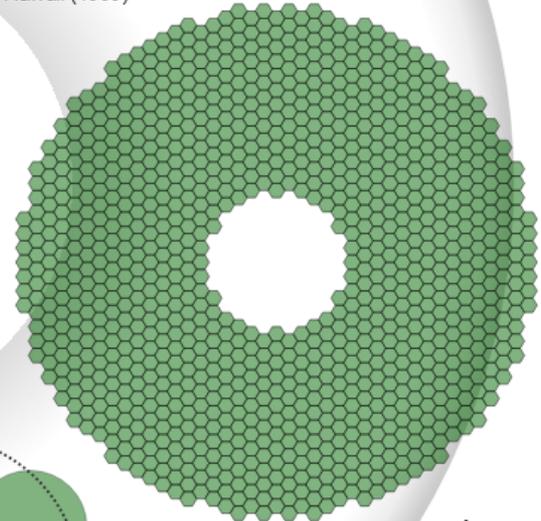
**Large Synoptic Survey Telescope**  
El Peñón, Chile (planned 2020)

**Giant Magellan Telescope**  
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)

**Giant Magellan Telescope**  
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)

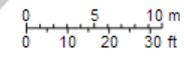


**Thirty Meter Telescope**  
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)



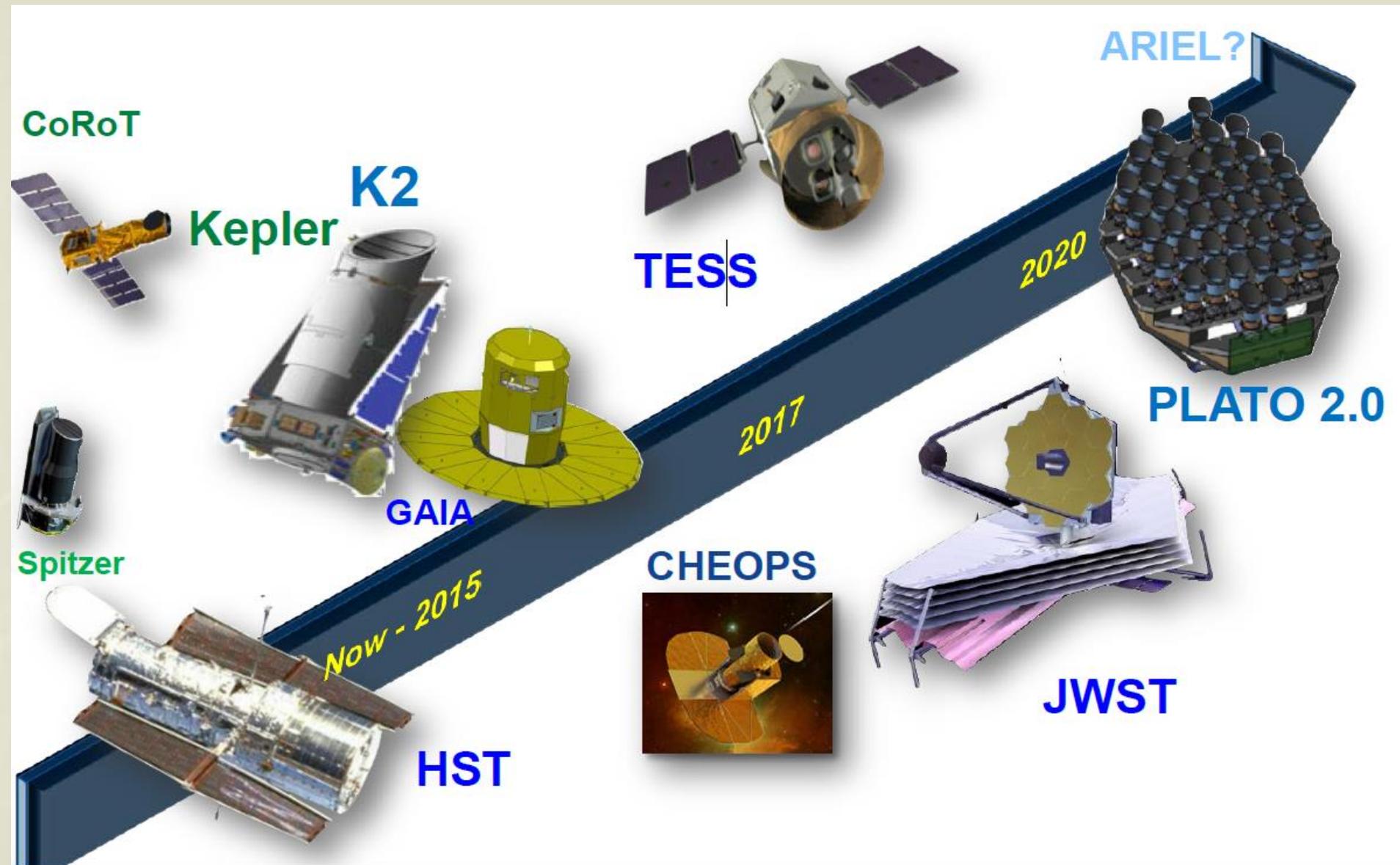
**European Extremely Large Telescope**  
Cerro Armazones, Chile (planned 2022)

Human at the same scale



Basketball court at the same scale

# Космические миссии

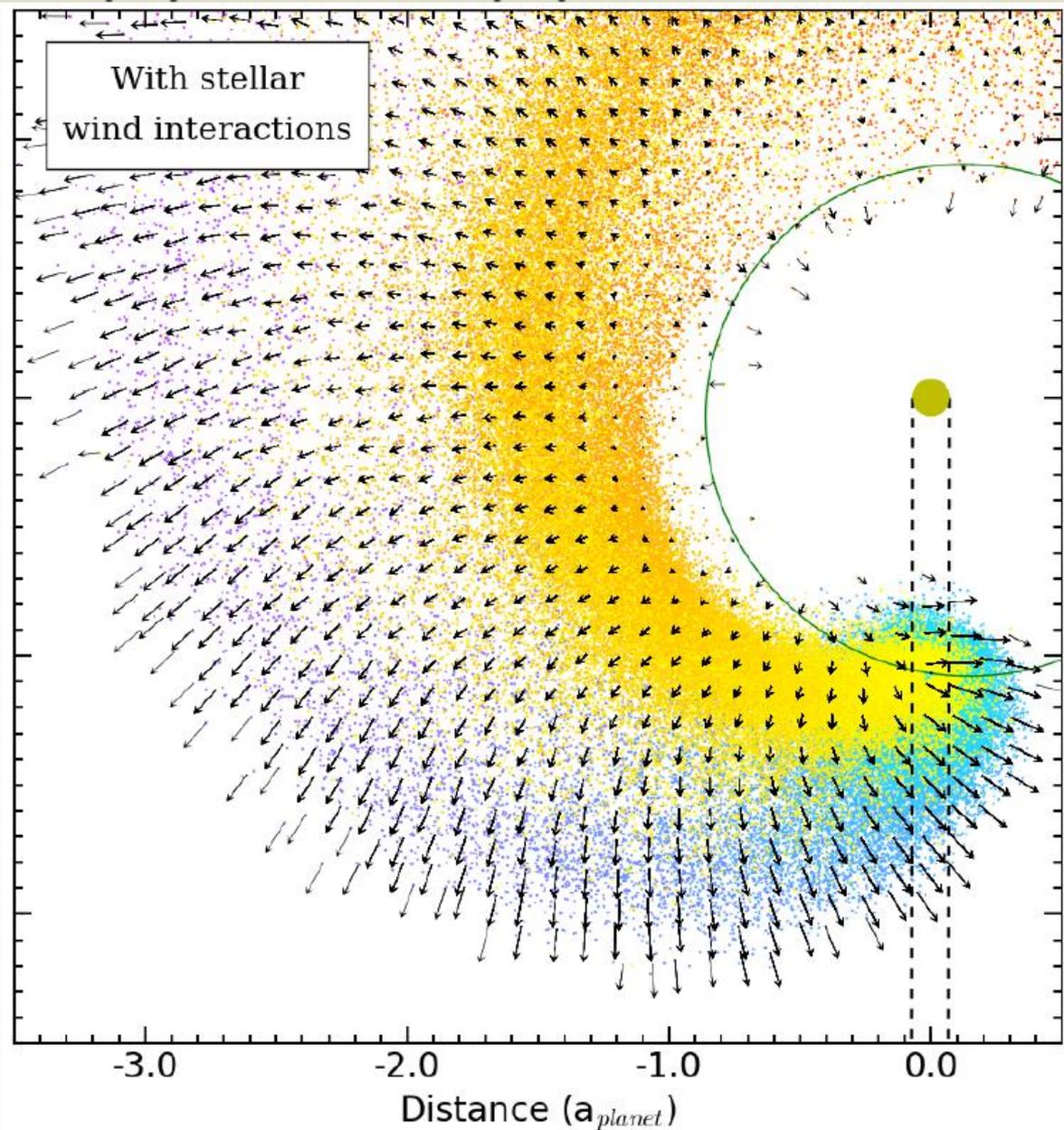
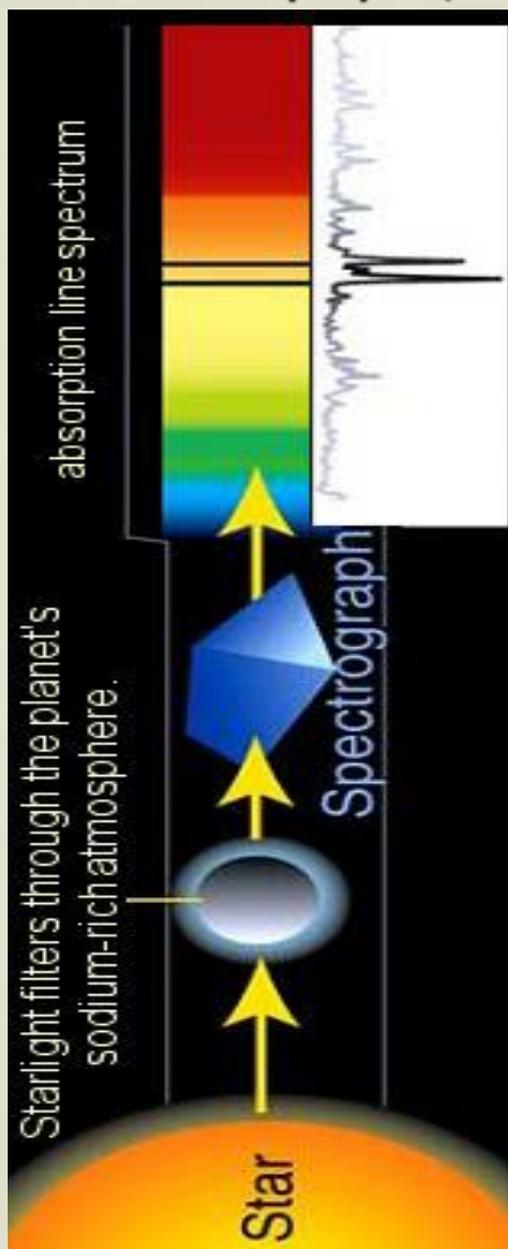


Российский телескоп Спектр-УФ – 2024 г.

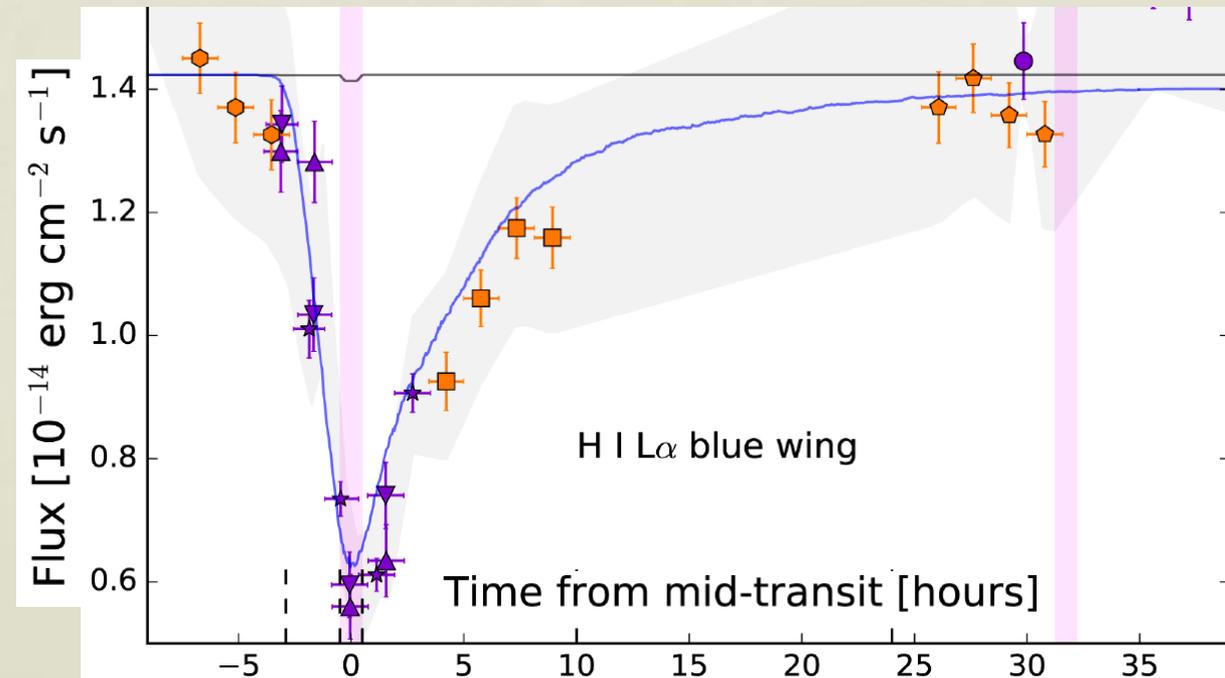
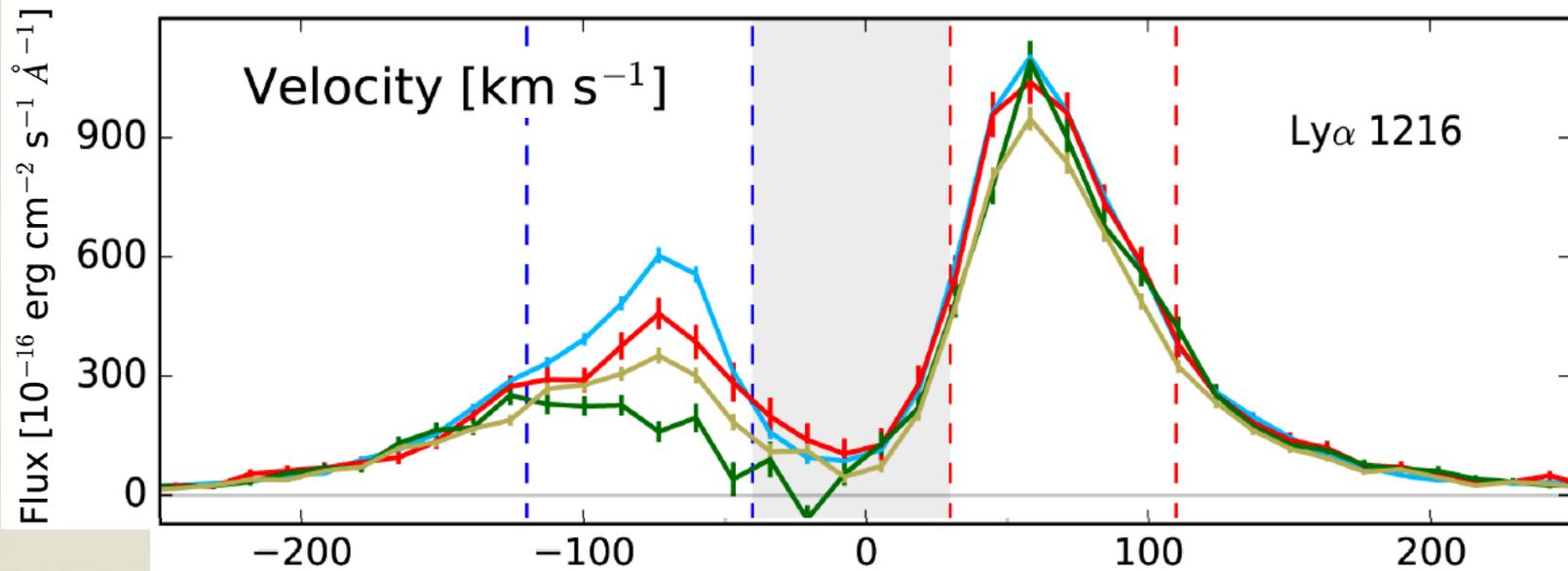
# Горячие Юпитеры – новый класс астрофизических объектов

- Первые обнаруженные экзопланеты оказались газовыми гигантами на экстремально близких к звезде орбитах  $<0.1$  а.е.
- **Открытие таких систем перевернуло существовавшие теории формирования планет.**
- Оценочно не менее 1% звезд имеют Горячие Юпитеры, помимо других планет.
- Основная физическая уникальность в том, что ионизирующее излучение звезды настолько нагревает верхнюю атмосферу планеты, что она испытывает **газодинамическое сверхзвуковое истечение – планетарный ветер.**
- **Взаимодействие планетарной плазмосферы со звездной космической средой вызывает наблюдательные проявления, позволяющие получить данные, недоступные другими методами.**

# Транзитные системы – возможность наблюдать атмосферы, ионосферы и экзосферы экзопланет



# Транзитные наблюдения телескопом Хаббл



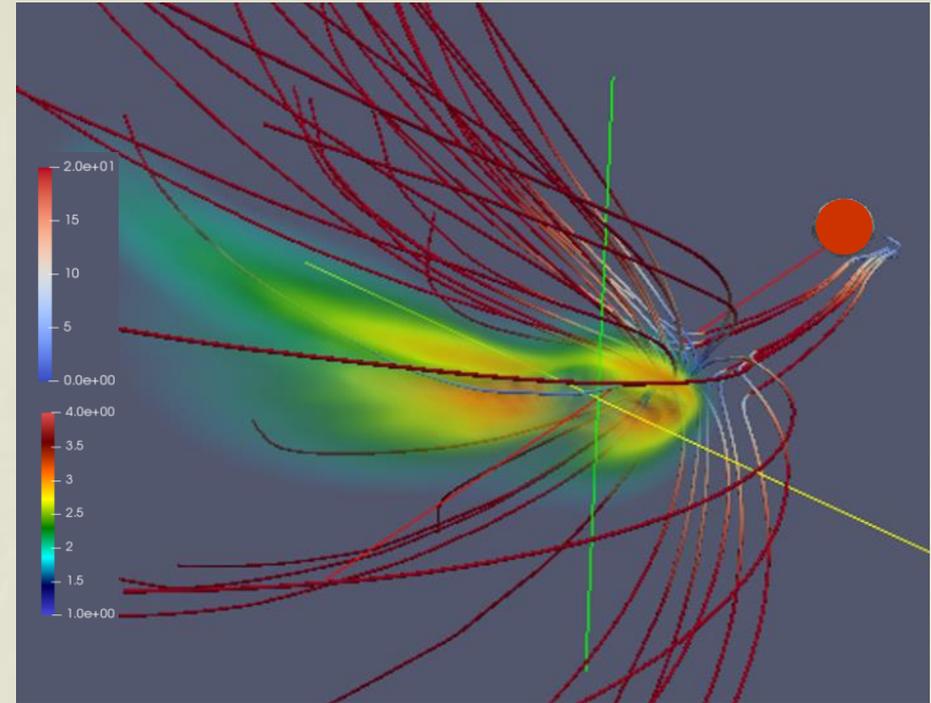
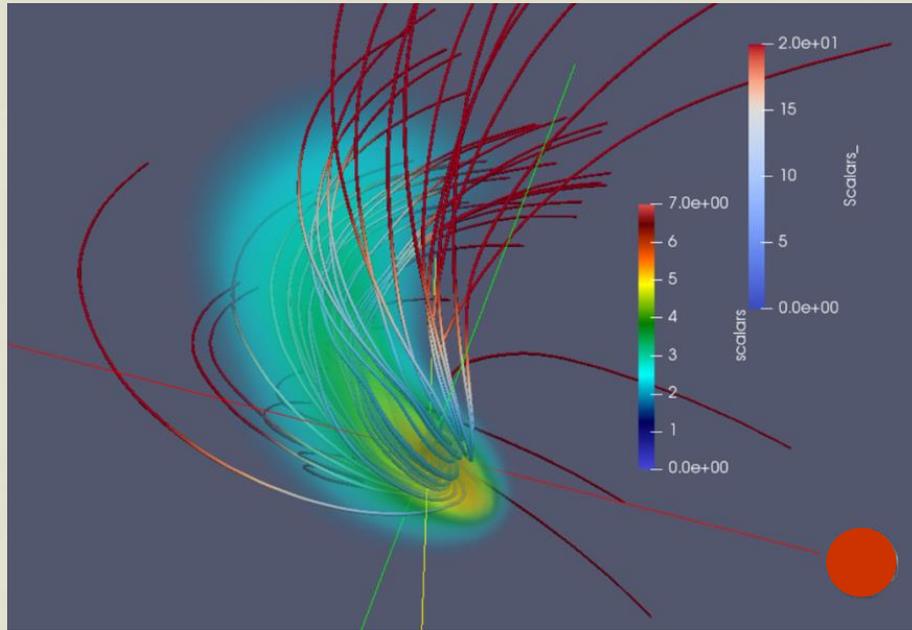
*From Lavie et al. 2017*

*Наблюдения отражают взаимодействие планетарной и звездной плазмы. По ним можно определить параметры атмосферы планеты и космическую погоду вокруг других звезд !*

# Резюме

- Экзопланеты являются новой областью на стыке астрономии, атмосферных и планетарных наук, химии и космической плазмы.
- Существует бесчисленное количество планет, популяции которых намного разнообразнее чем звезды.
- **Практически все новые открытия в этой области выходят за рамки существующих взглядов и требуют новых подходов, гипотез и теорий.**
- В обозримом будущем станет возможным детектировать признаки органической жизни на других планетах.
- В ближайшем будущем будет открыта планета, подобная Земле, с океаном и атмосферой.
- Развитие моделей разного типа экзопланет, включая горячие планеты, открывает возможности измерения физических величин, которые ранее были полностью недоступны.

# 3D моделирование горячих экзопланет: взаимодействие планетарного ветра со звездным ветром в системе GJ 436



Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Lammer, H., Kislyakova, K. G., Fossati, L., Johnstone, C. P., ... & Posukh, V. G. Two regimes of interaction of a Hot Jupiter's escaping atmosphere with the stellar wind and generation of energized atomic hydrogen corona. *The Astrophysical Journal*, 2016

Khodachenko, M. L., Shaikhislamov, I. F., Lammer, H., Kislyakova, K. G., Fossati, L., Johnstone, C. P., ... & Posukh, V. G. Ly $\alpha$  Absorption at Transits of HD 209458b: A Comparative Study of Various Mechanisms Under Different Conditions. *The Astrophysical Journal*, 2017

Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Lammer, H., Fossati, L., Dwivedi, N., Güdel, M., ... & Posukh, V. G. Modeling of Absorption by Heavy Minor Species for the Hot Jupiter HD 209458b. *The Astrophysical Journal*, 2018

# 3D моделирование: взаимодействие планетарного ветра со звездным ветром в системе HD 209458

