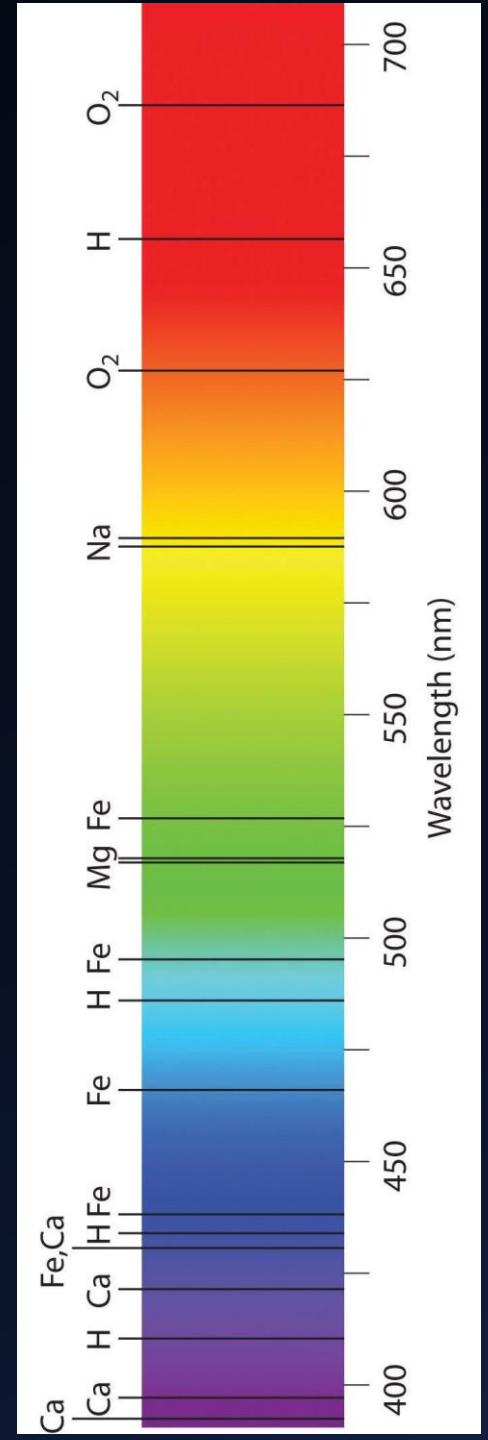
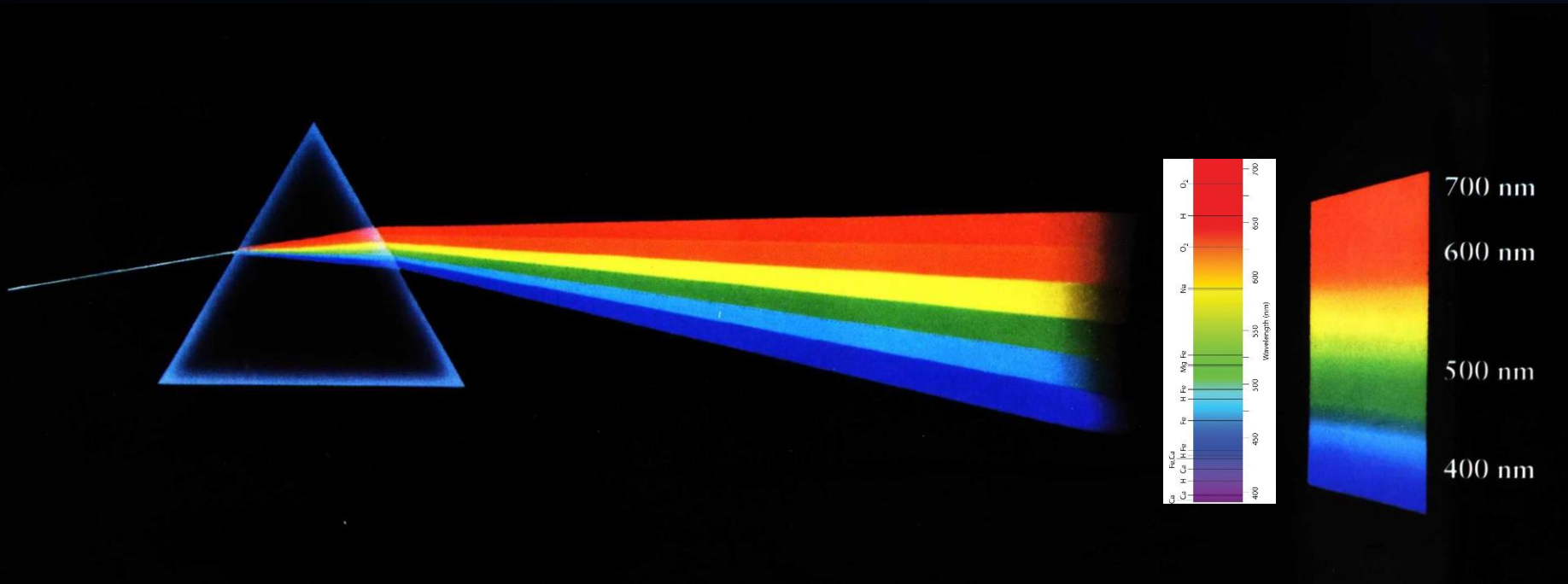


Экзопланеты: спектры и атмосферы

Спектр

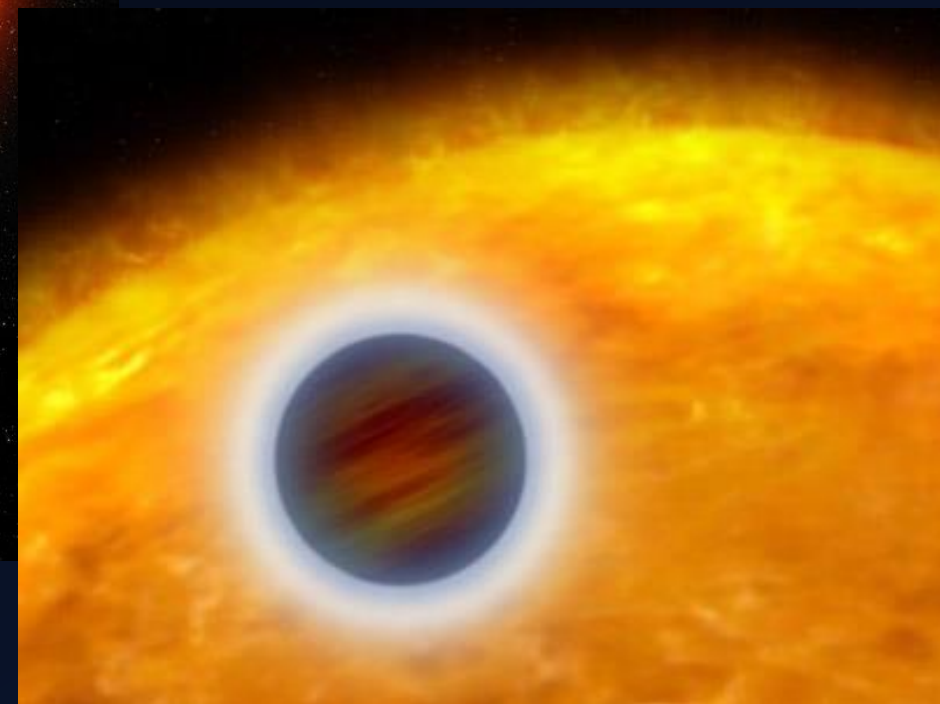
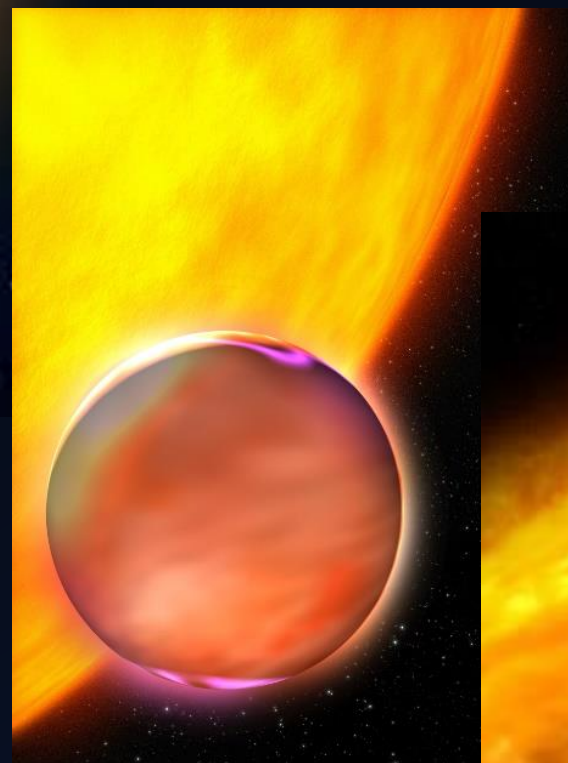


Анализ спектра позволяет установить химический состав атмосфер экзопланет.

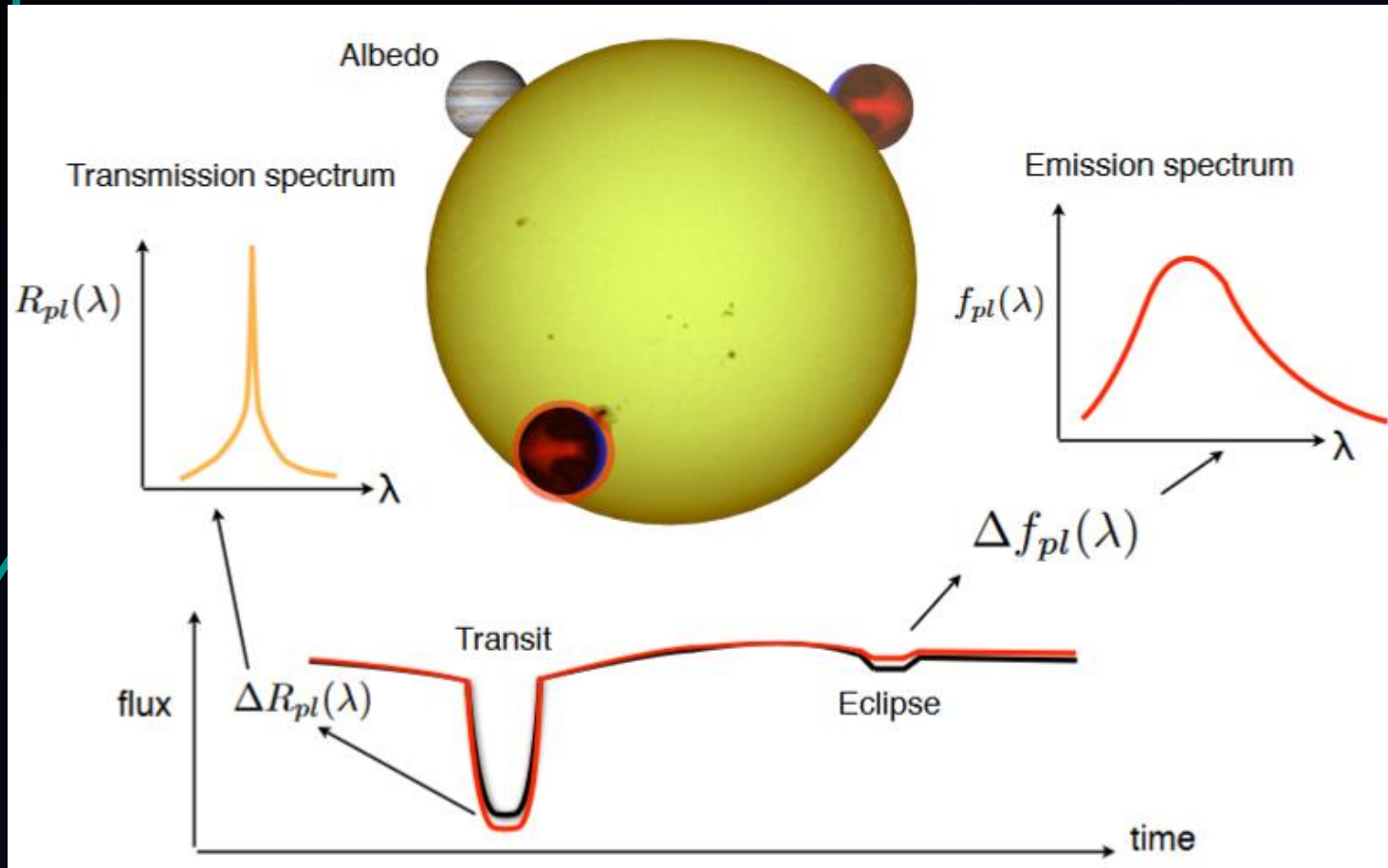
Атмосферы экзопланет



Есть несколько возможностей для получения спектров атмосфер экзопланет.



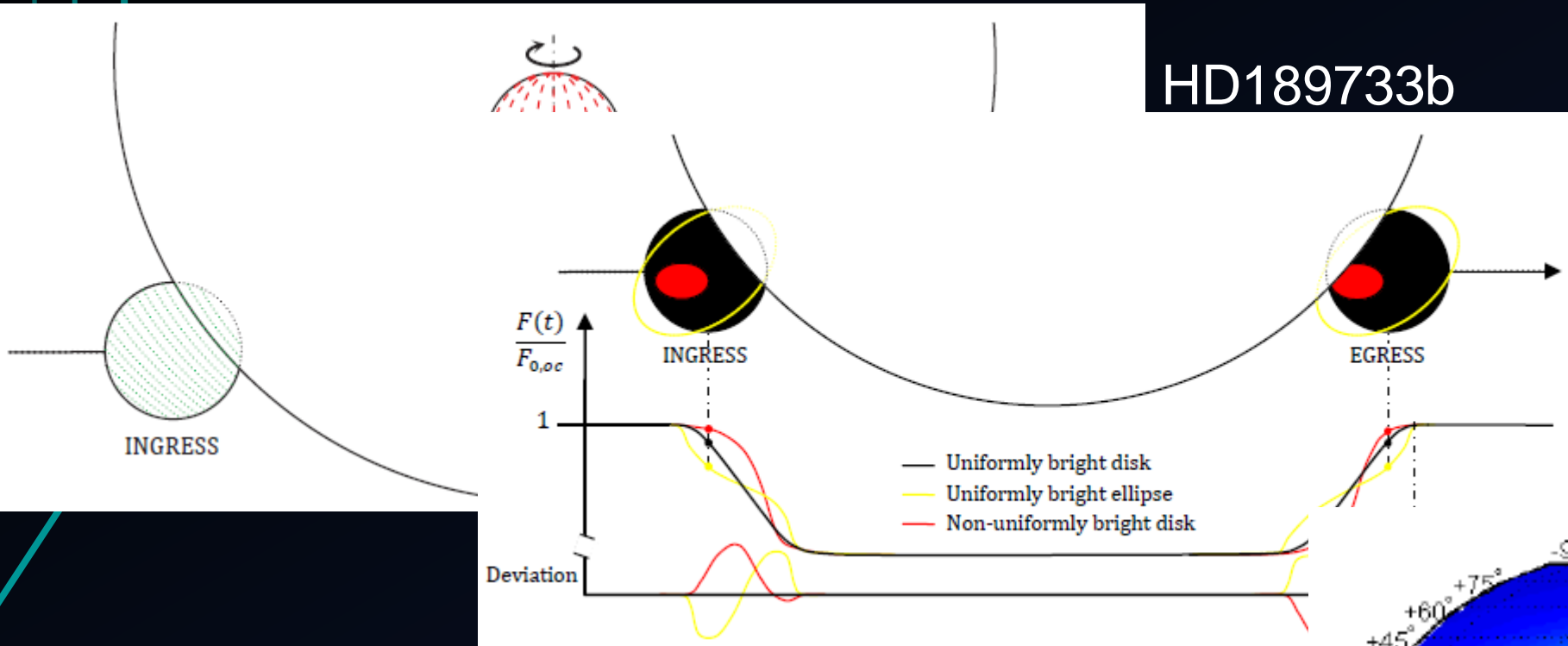
Изучение планет во время транзитов



- Интегральные свойства поверхности (альbedo)
- «Спектр на просвет» за счет разной глубины транзита
- Спектр собственного излучения планеты
- Картирование

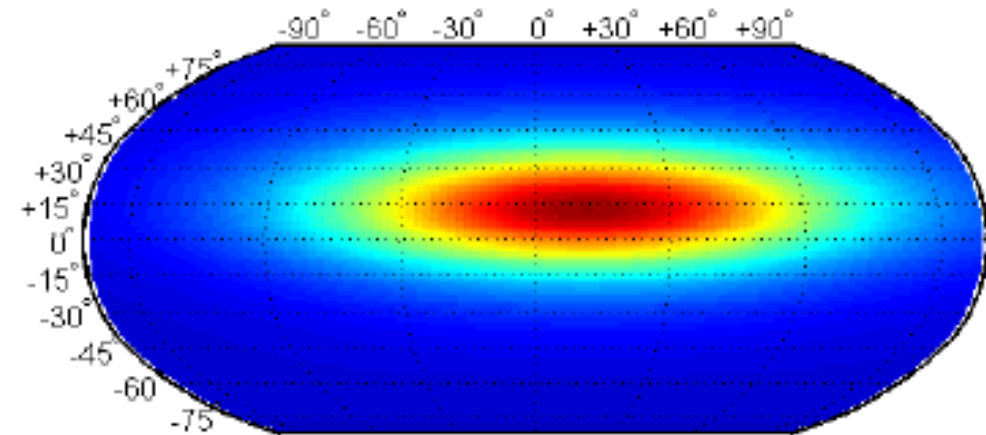
Сканирование планетных дисков

HD189733b

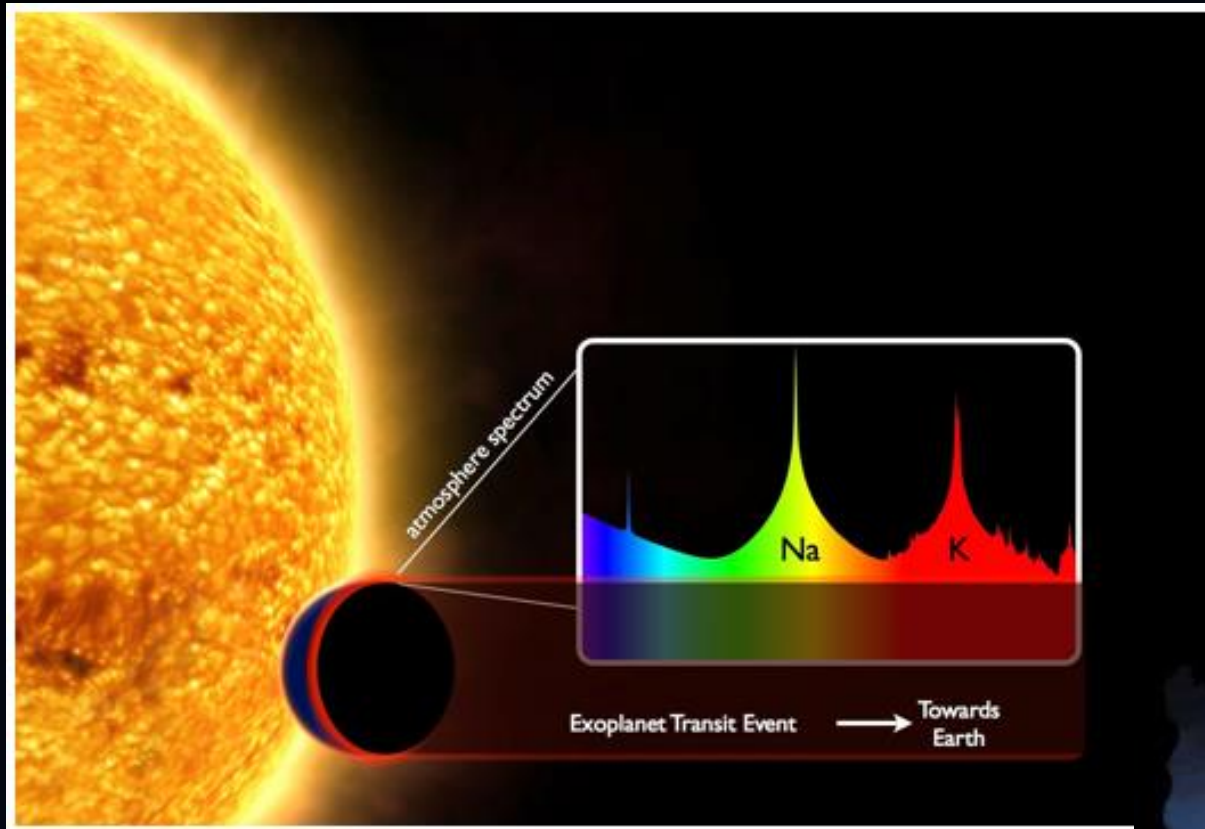


Spitzer space telescope

1202.3829

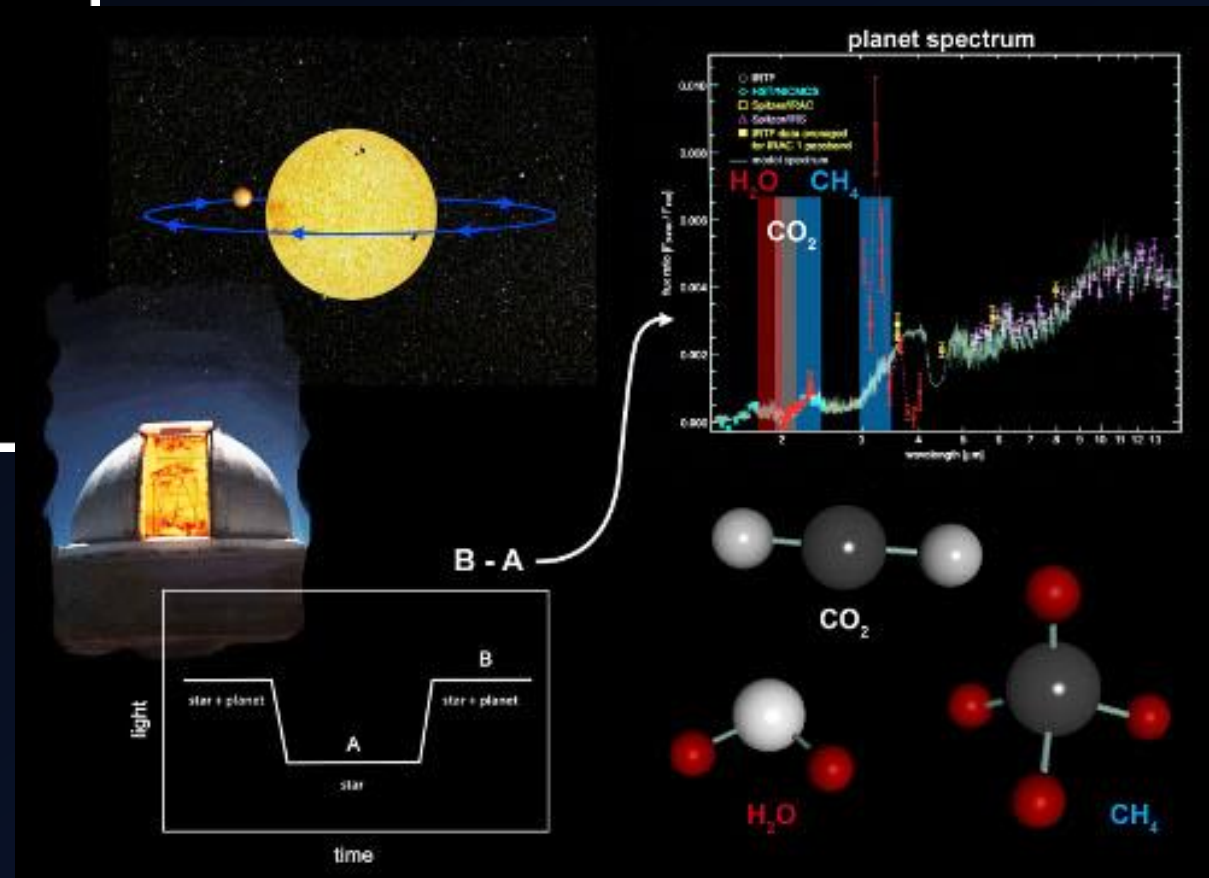


Спектры «напросвет» и прямые

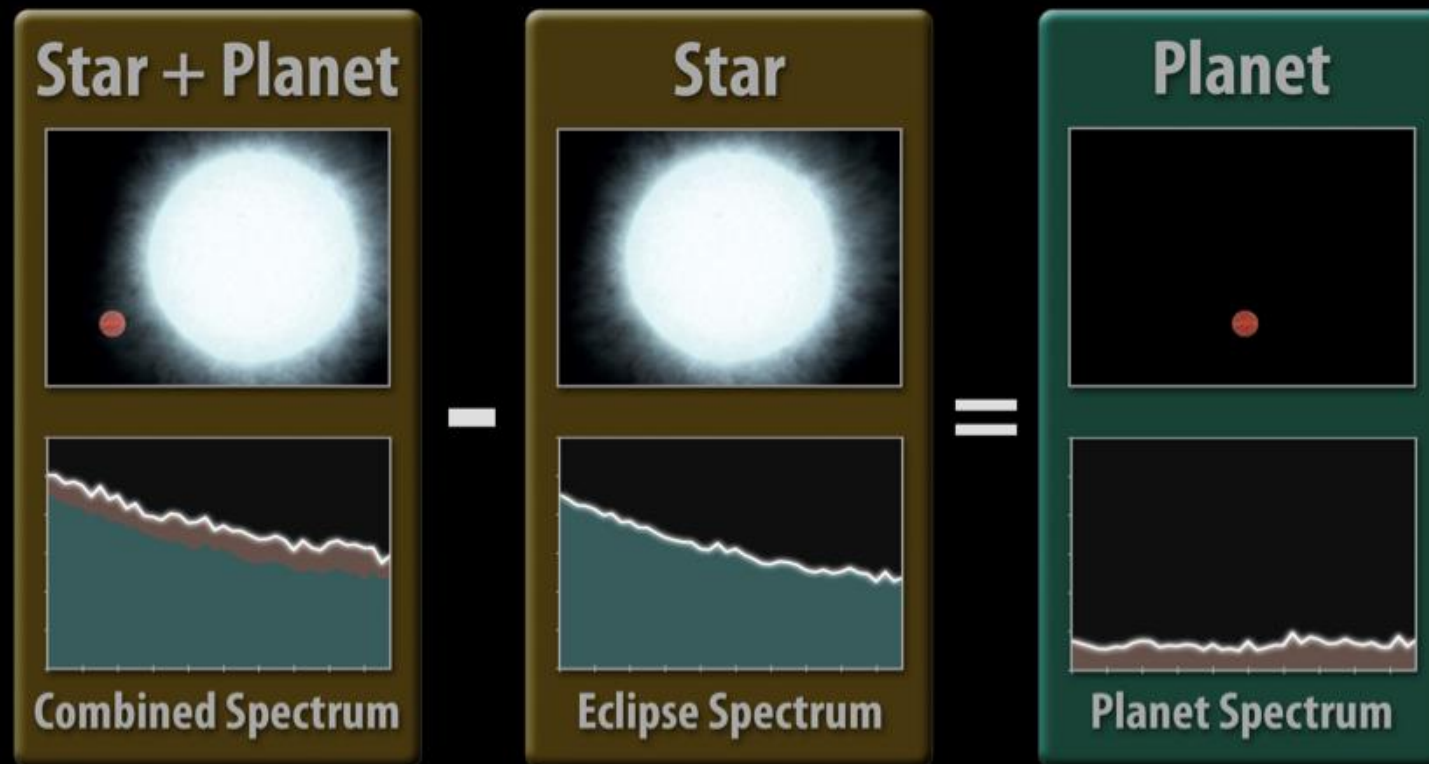


Иногда получают спектр дневной стороны планеты, а иногда изучают атмосферу «напросвет», когда планета проходит между звездой и нами.

При транзитах можно получать кривые блеска на разных длинах волн. Это также позволяет получить спектр, т.к. атмосфера имеет разную прозрачность на разных волнах.

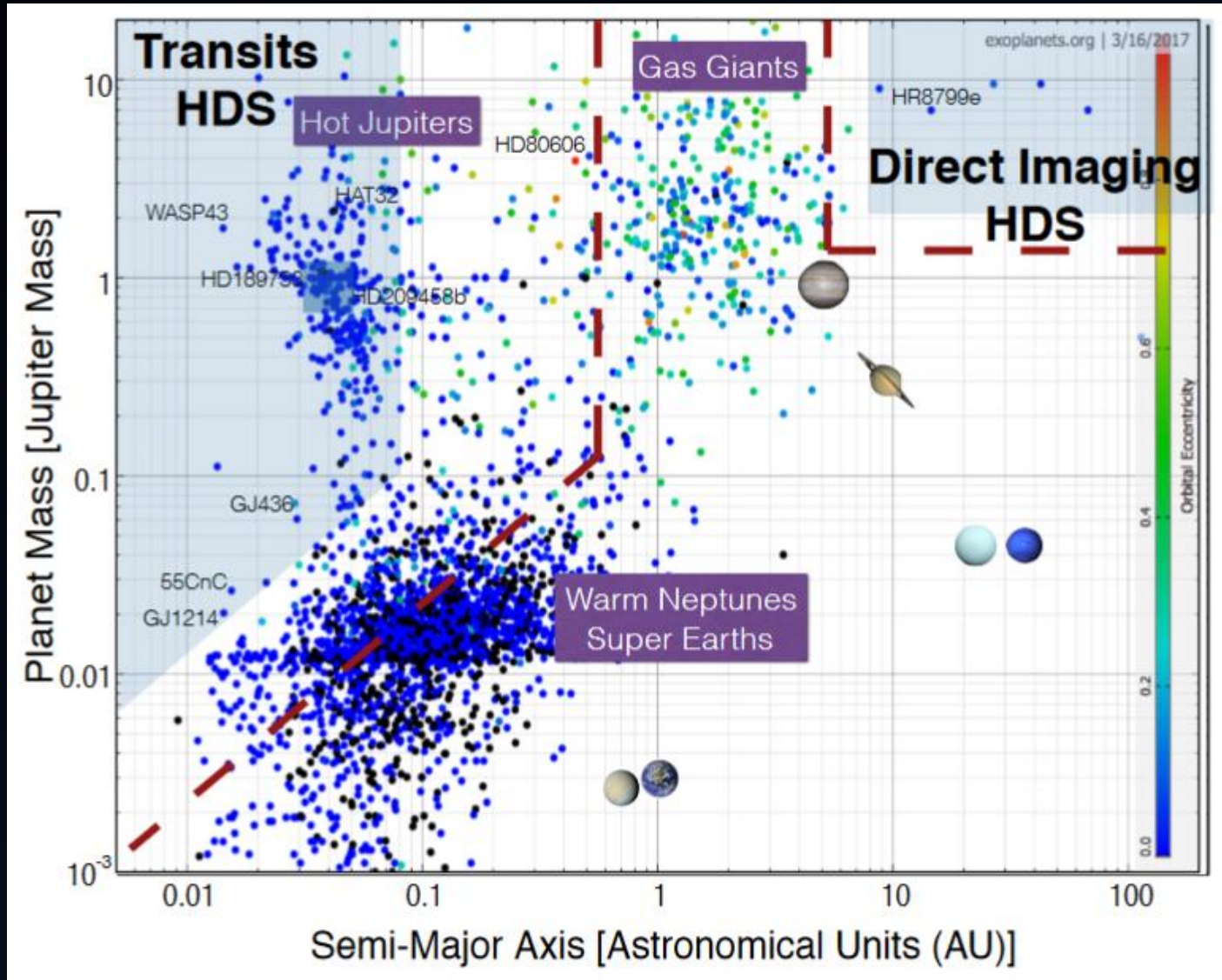


Спектр планеты



Isolating a Planet's Spectrum

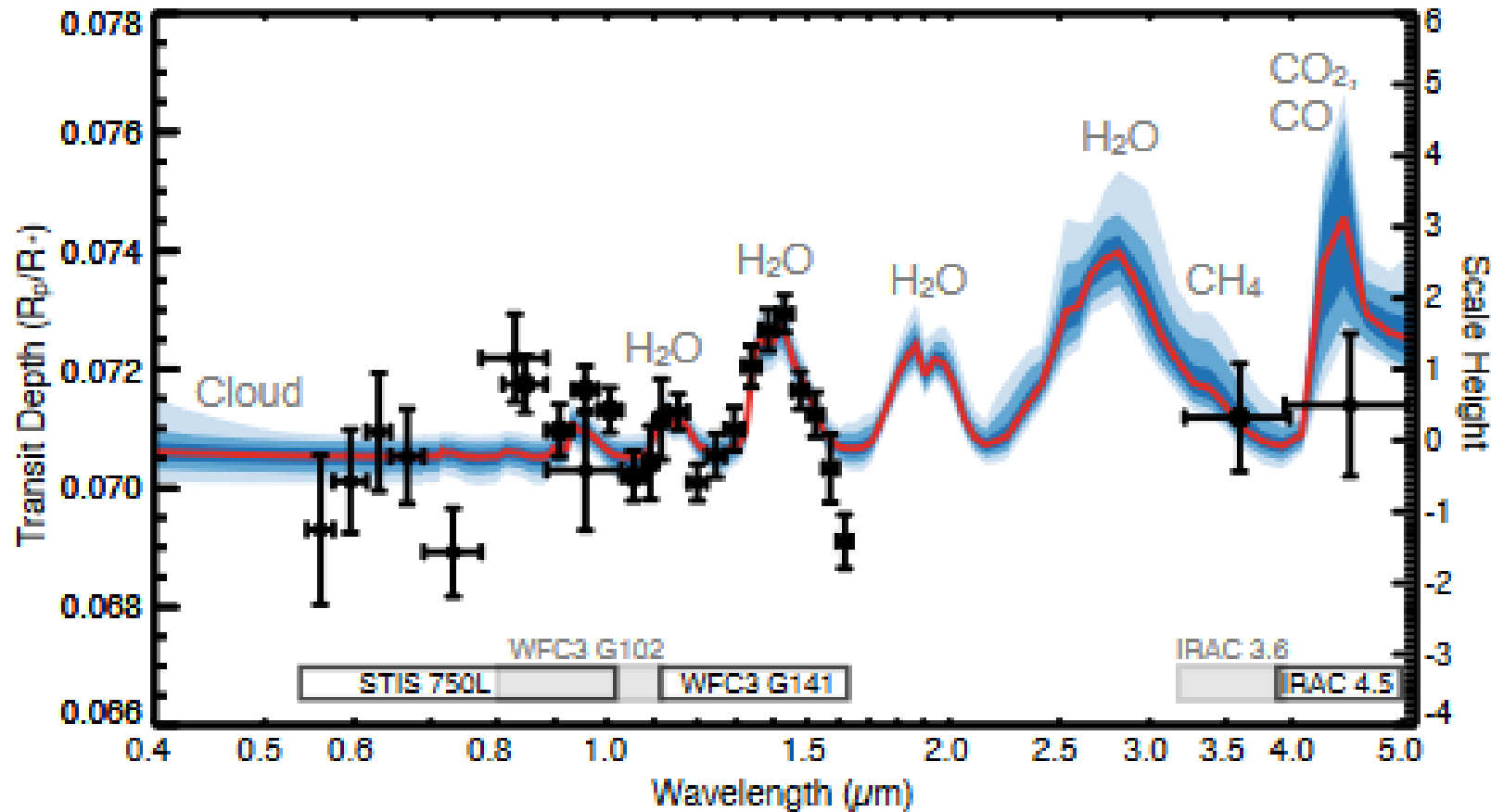
Чувствительность метода



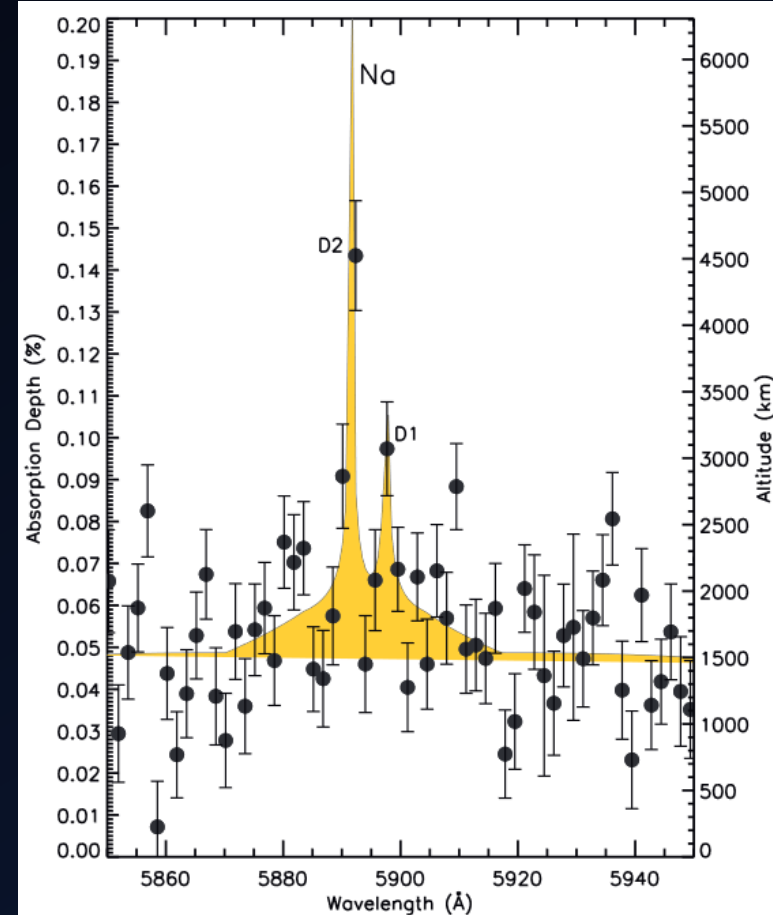
Заметно проще зарегистрировать сигнал от планет вокруг красных карликов, т.к. в этом случае меньше радиус звезды.

1804.07357

Трансмиссионные спектры

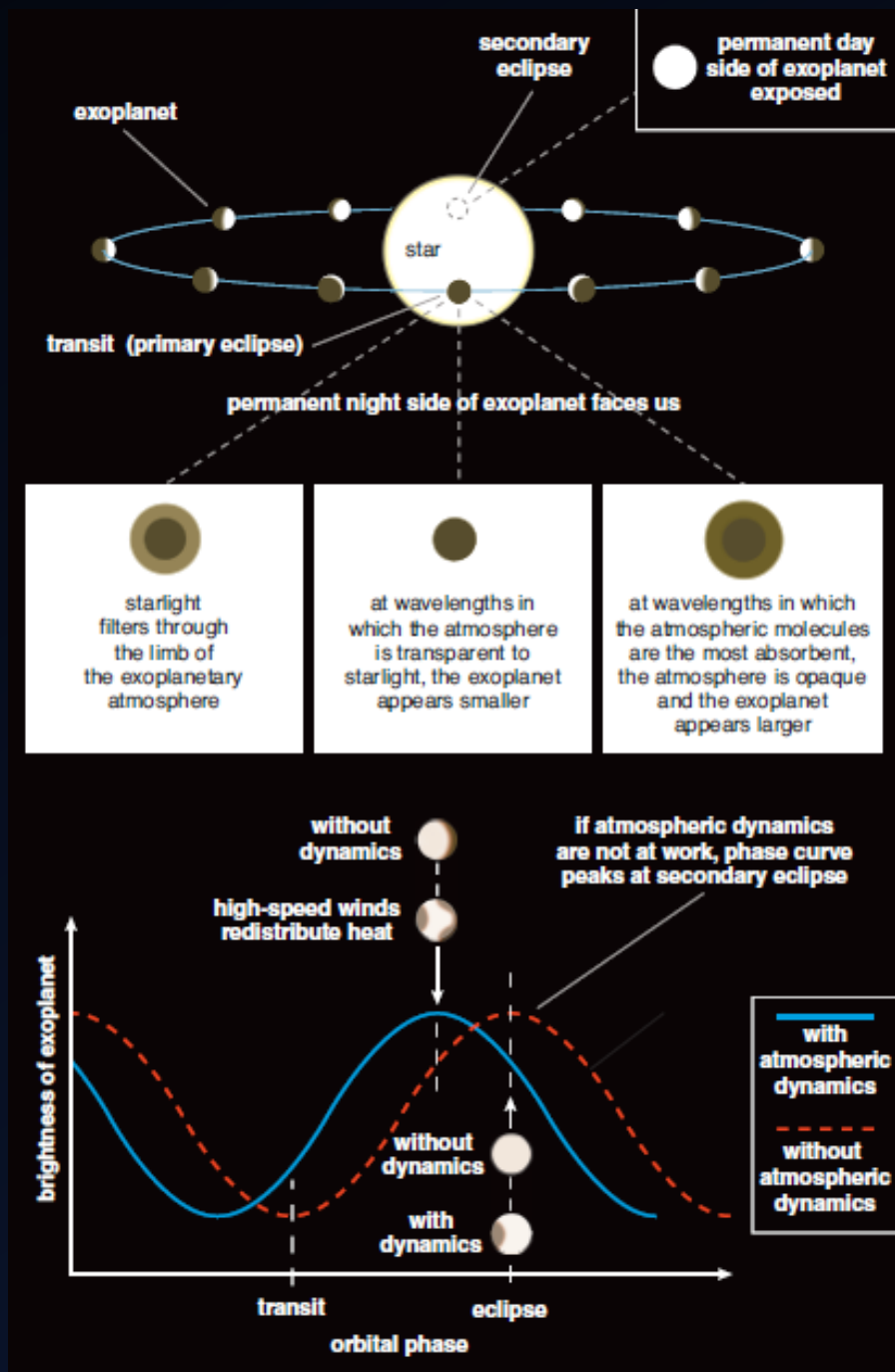
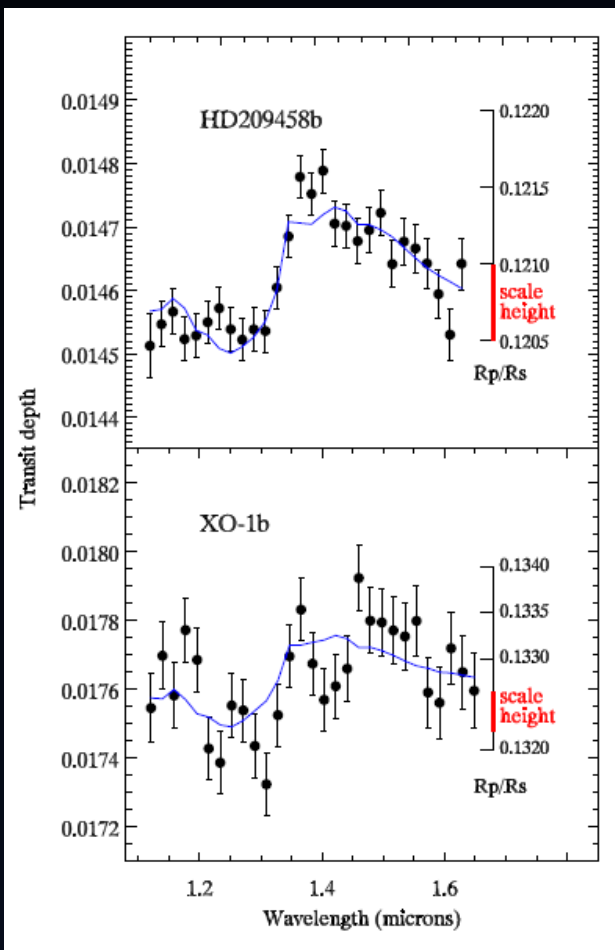


1810.04175

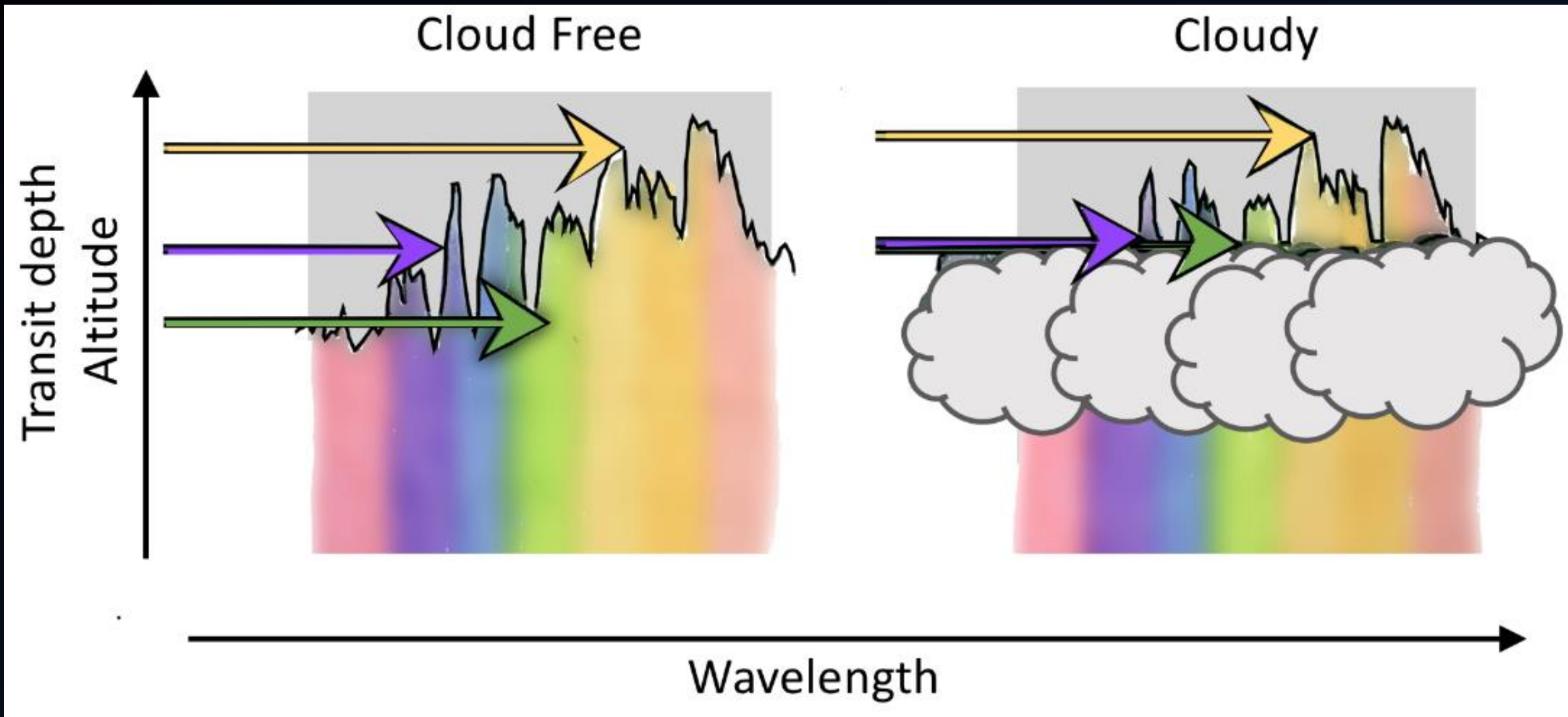


1804.07357

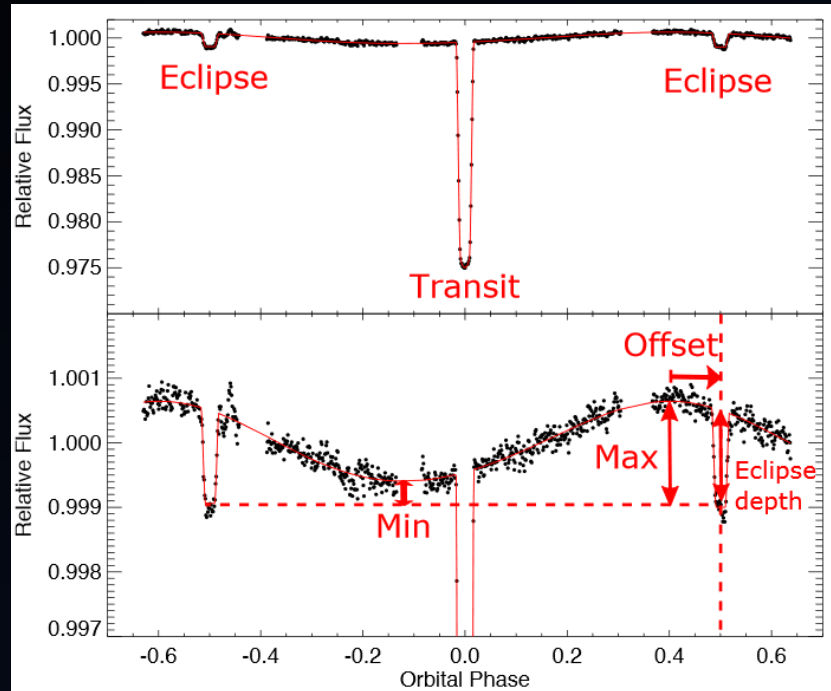
Наблюдения транзита на разных длинах волн позволяет определить свойства атмосферы, т.к. какие-то волны атмосфера пропускает хорошо – там размер планеты меньше, какие-то плохо – там размер больше.



Облака в атмосферах экзопланет

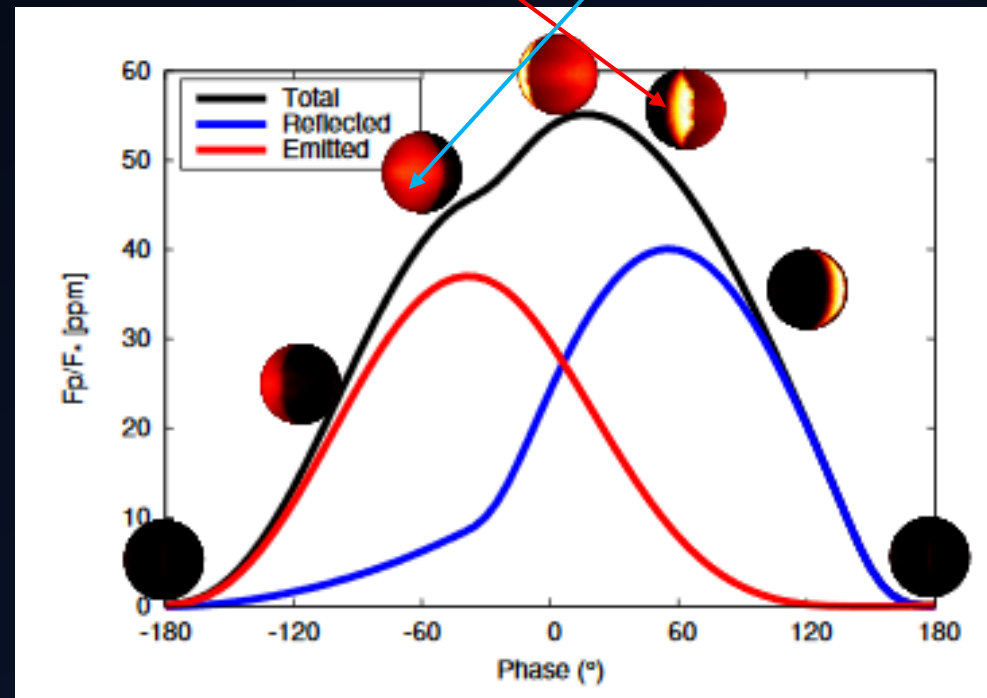


Кривые блеска



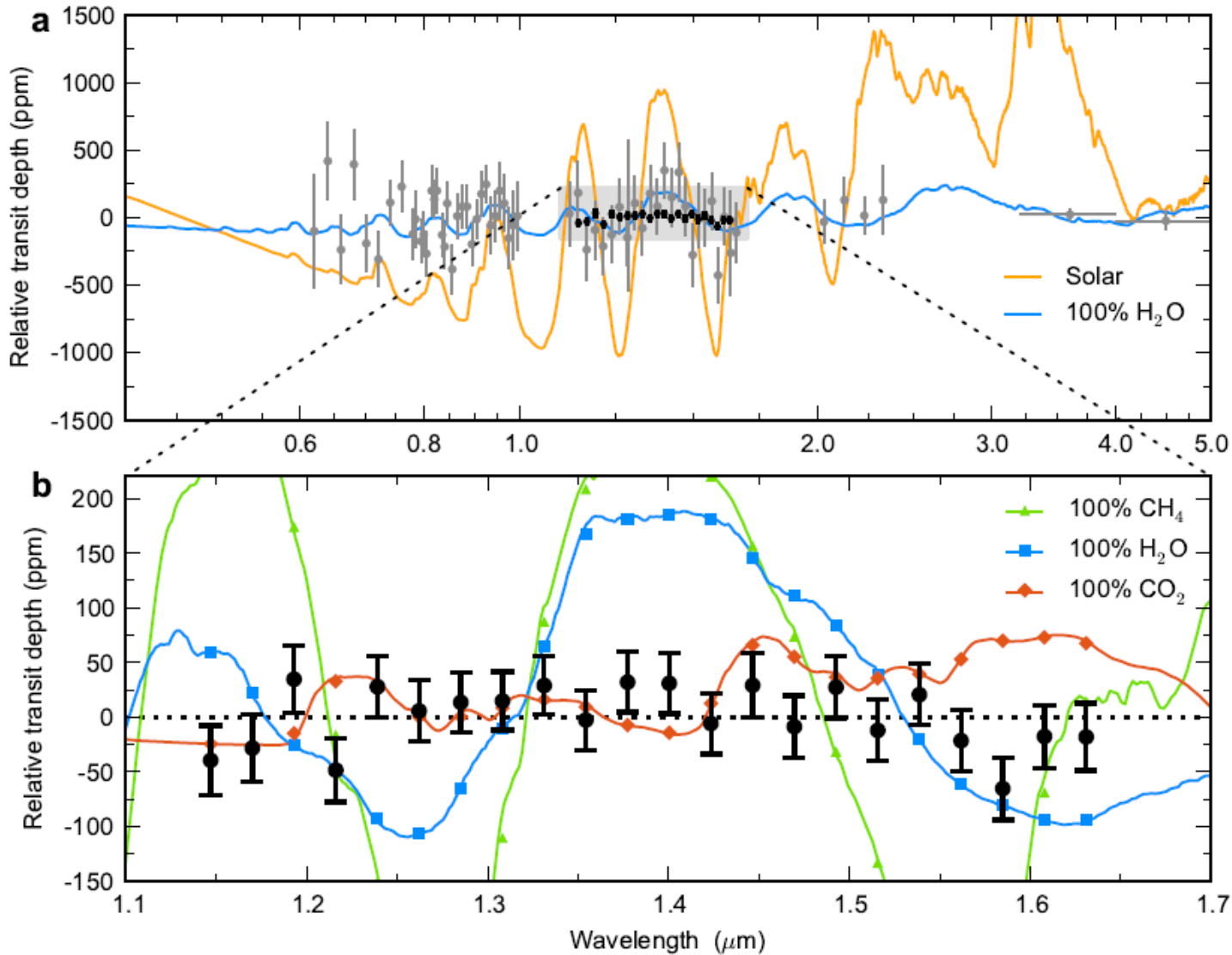
Яркие облака
отражают свет

Глобальные ветра
создают
несимметричное
распределение
температуры
по поверхности



1711.07696

Сверхземля GJ 1214b

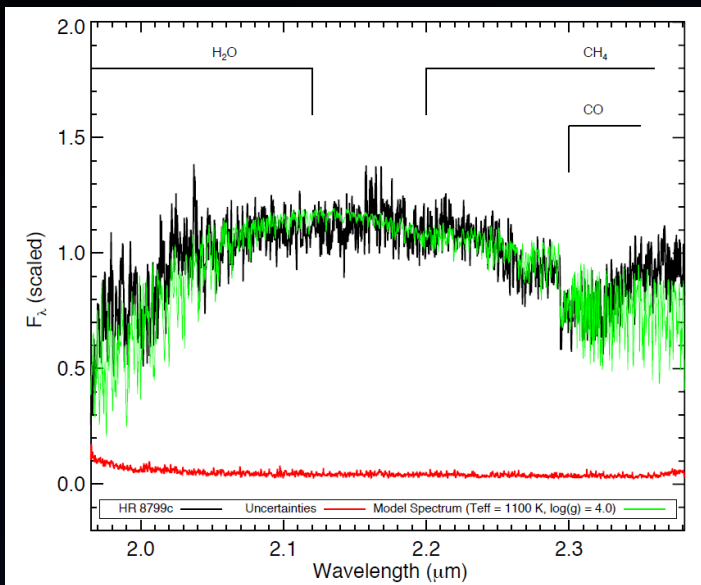


С помощью Космического телескопа им. Хаббла получен хороший спектр.

В нем не видно деталей.

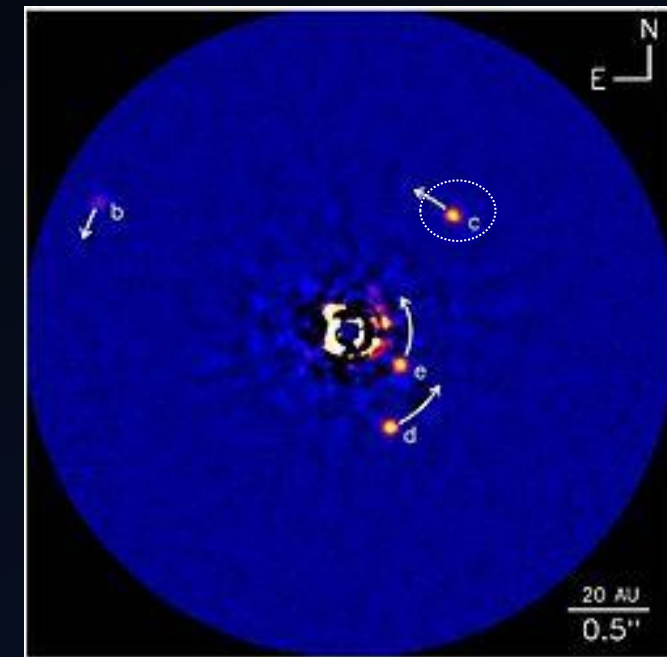
Это можно объяснить высокими облаками.

Вода и СО в спектре планеты



ИК-спектр HR 8799

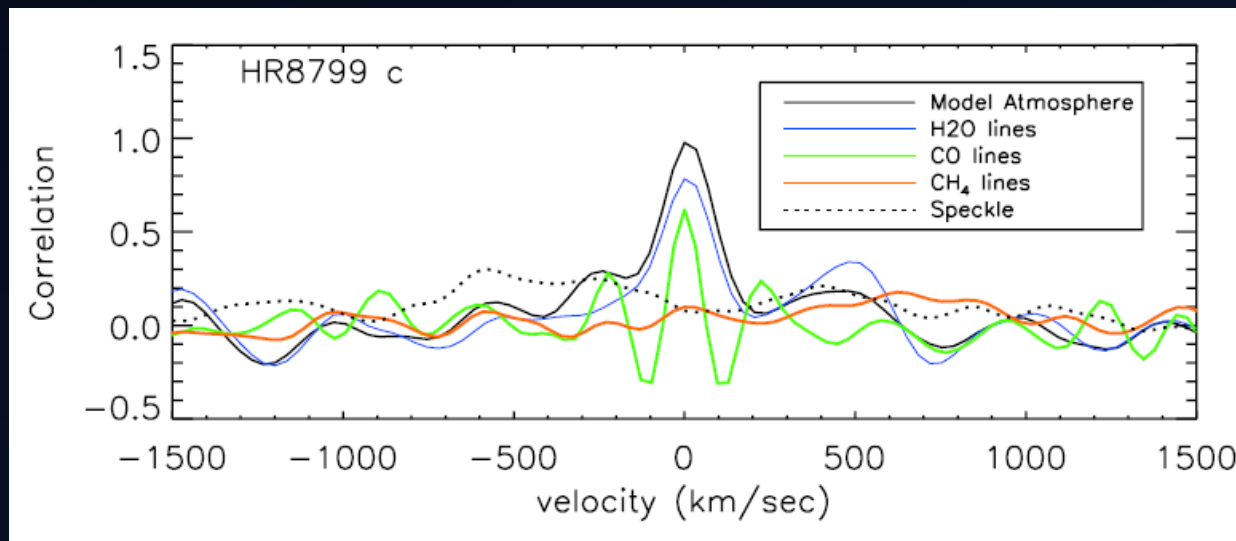
Детальная обработка показала наличие спектральных деталей, связанных с присутствием воды и монооксида углерода в атмосфере планеты HR 8799c.



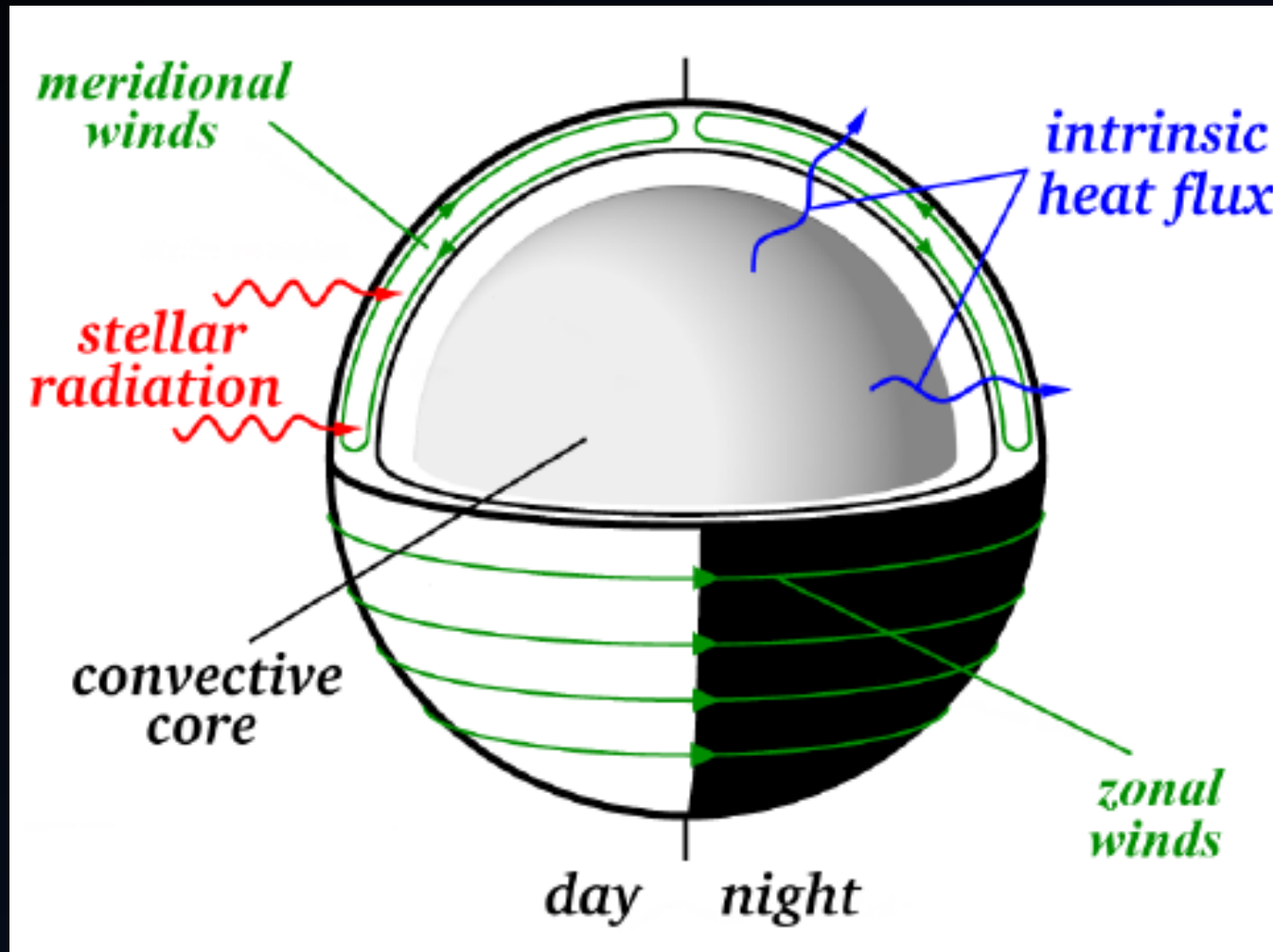
HR 8799



Наблюдения на Keck II



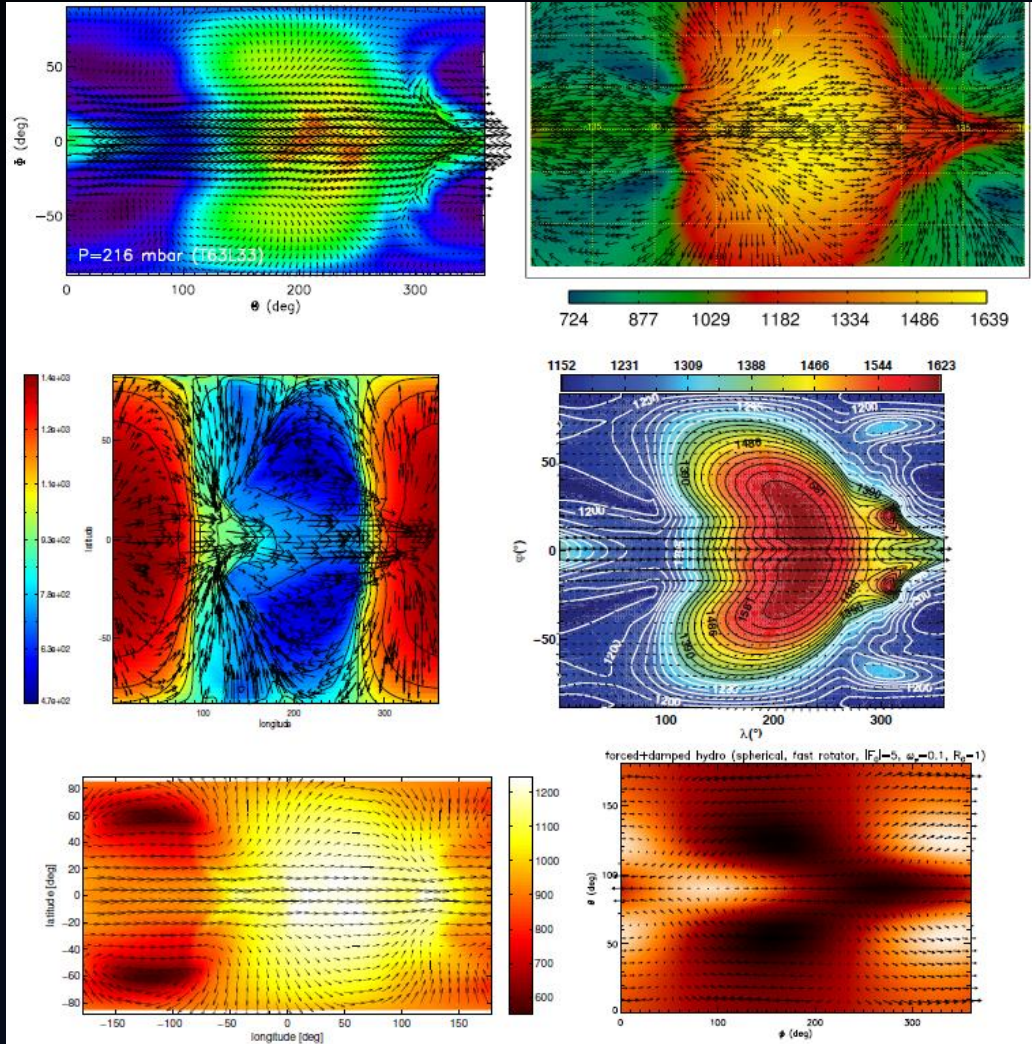
Динамика внешних слоев на горячих юпитерах



1405.3752

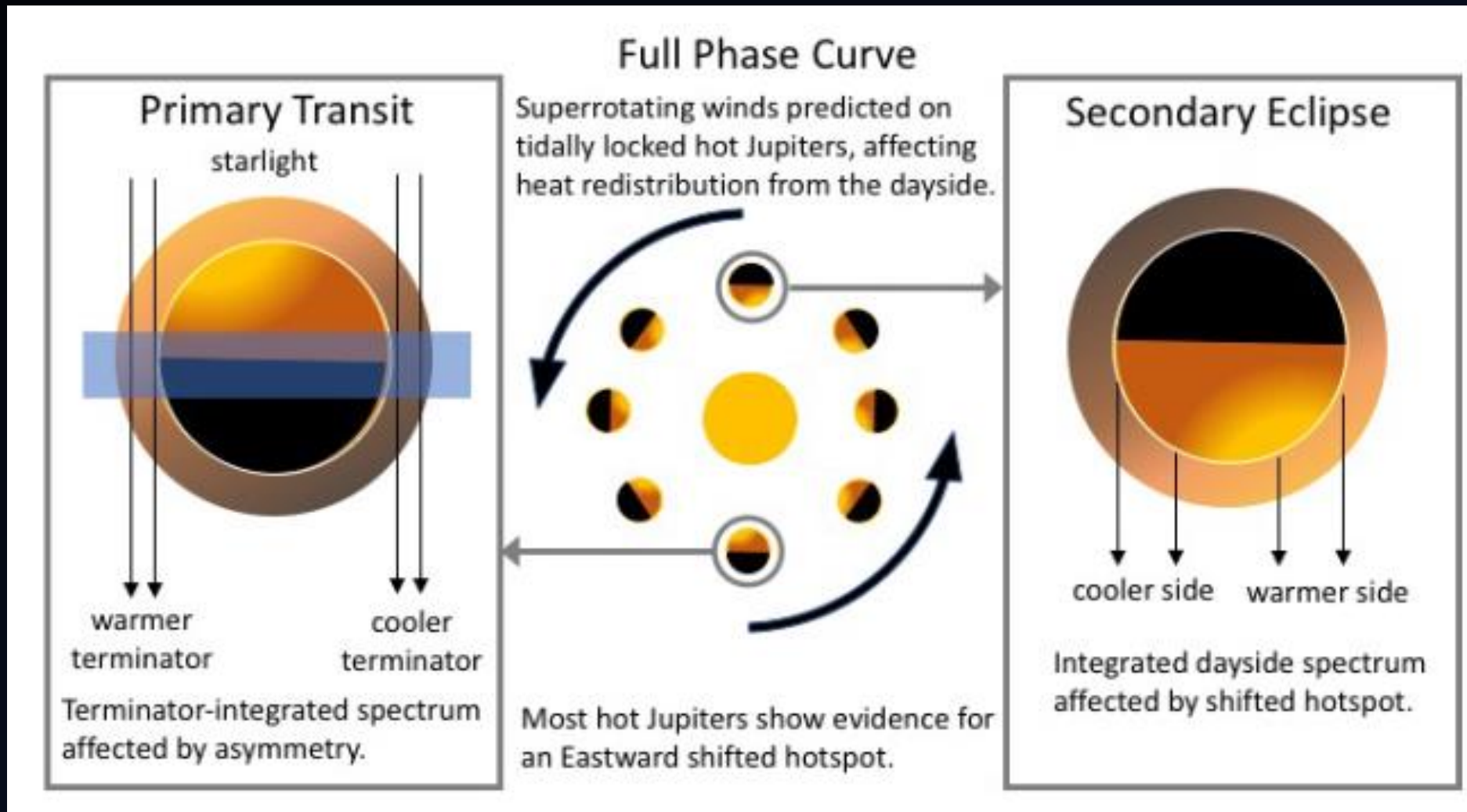
Планета прогревается и изнутри, и снаружи.
Это приводит к бурным движениям в верхней части оболочки планеты.

Моделирование ветров горячих юпитеров

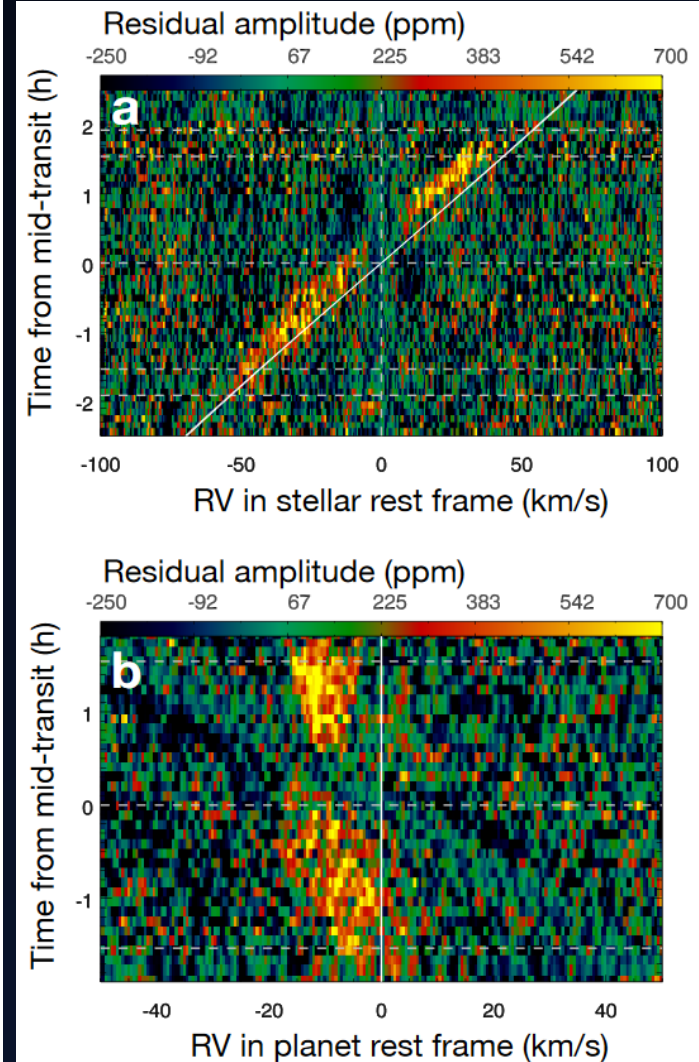
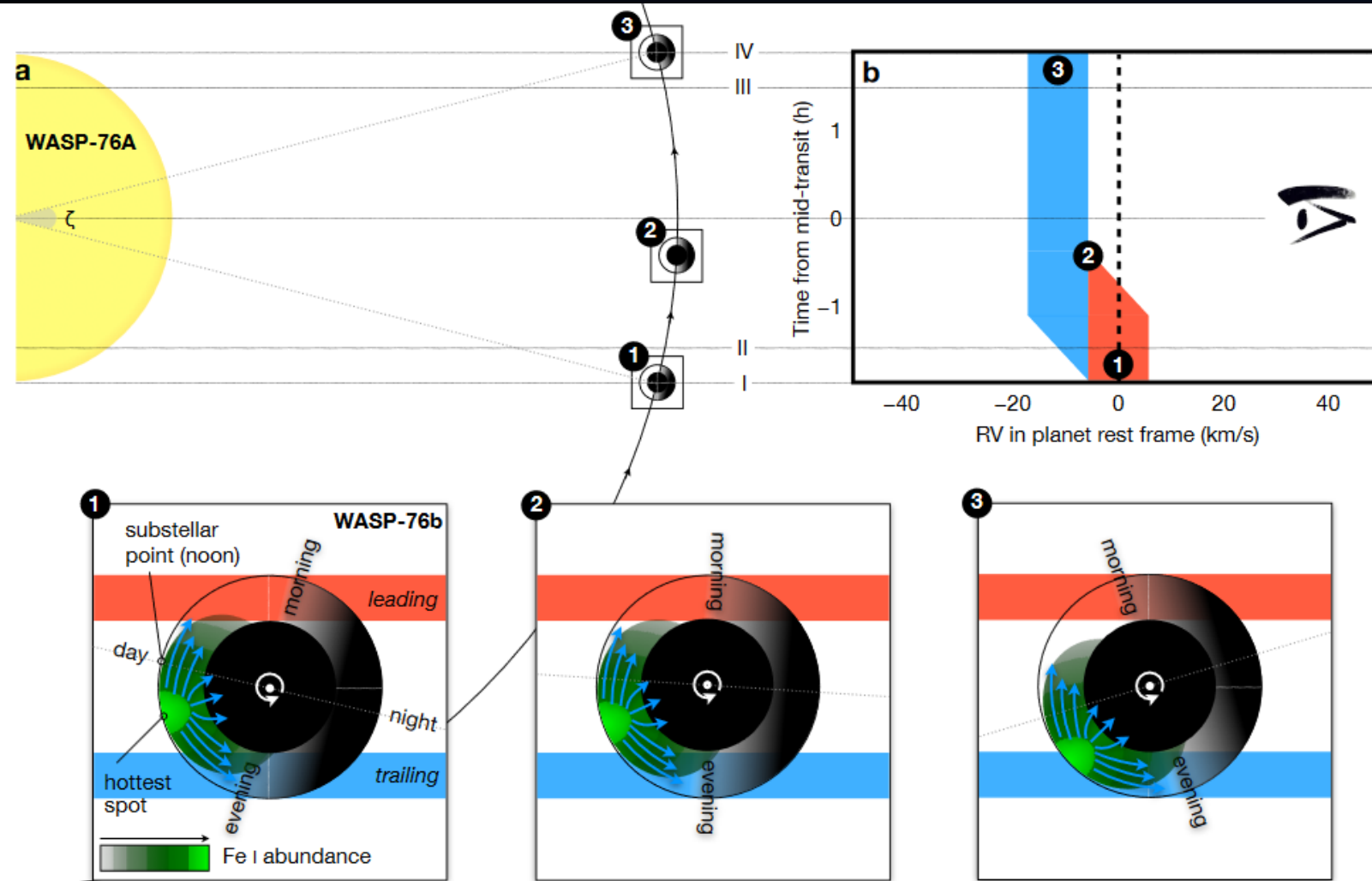


Сильный экваториальный ветер с Запада на Восток

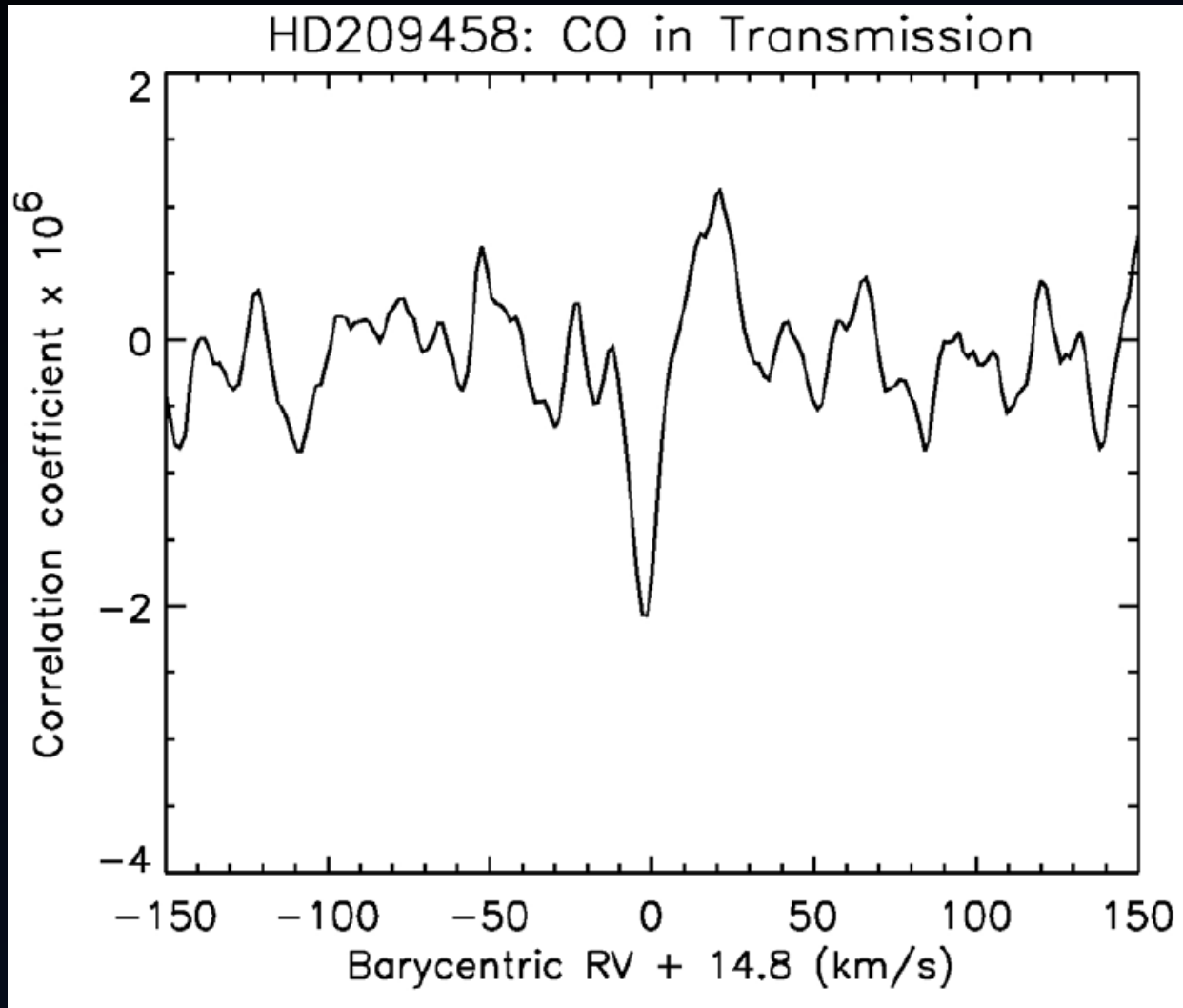
Сдвиг самой горячей точки от положения точки полдня



Конденсат железа на ночной стороне



Ветер на HD 209458



Transmission spectral data.

Wind velocity can be directly measured.

The planet is a VERY hot Jupiter.

Wind velocity is ~ 2 km/s
(line is blueshifted by 2 km/s)

Ariel



Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey

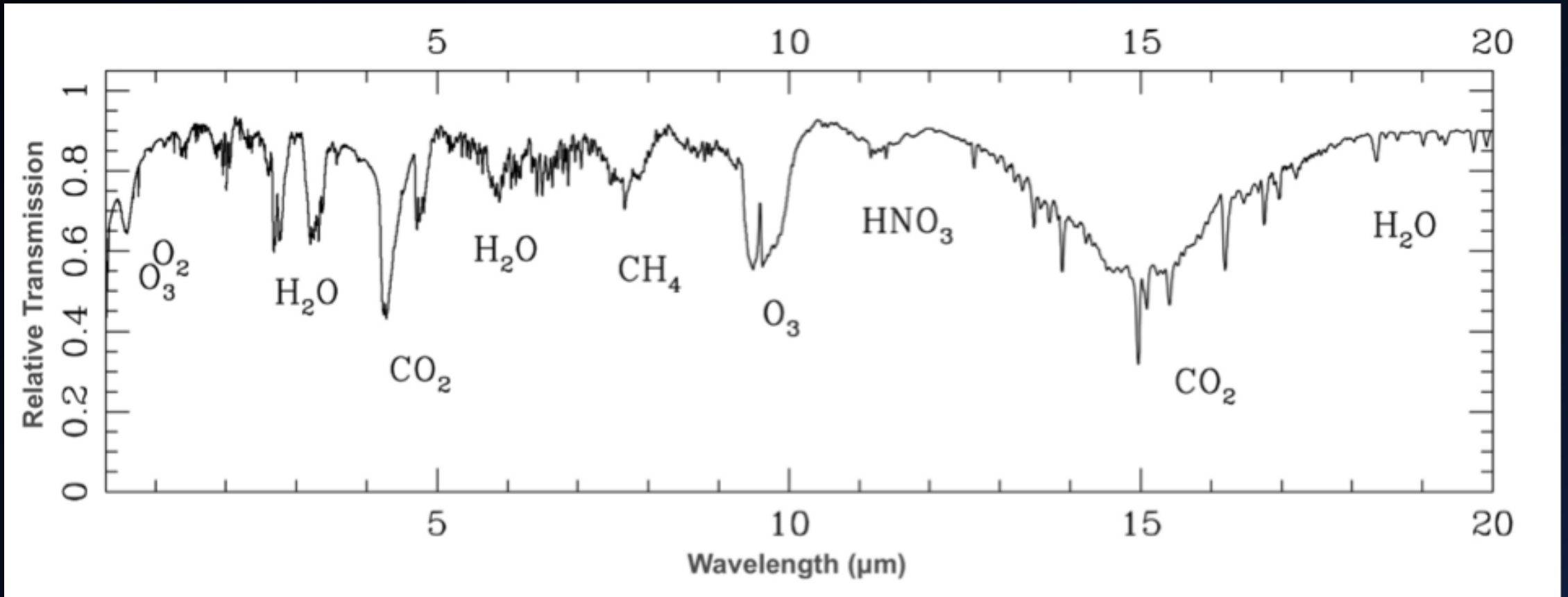
~1-meter telescope. ~2030 launch. ~1000 exoplanets to study.

See a review of scientific goals related to atmospheric properties and interior composition in 2103.08481

Биомаркеры

Спектр Земли с указанными биомаркерами:

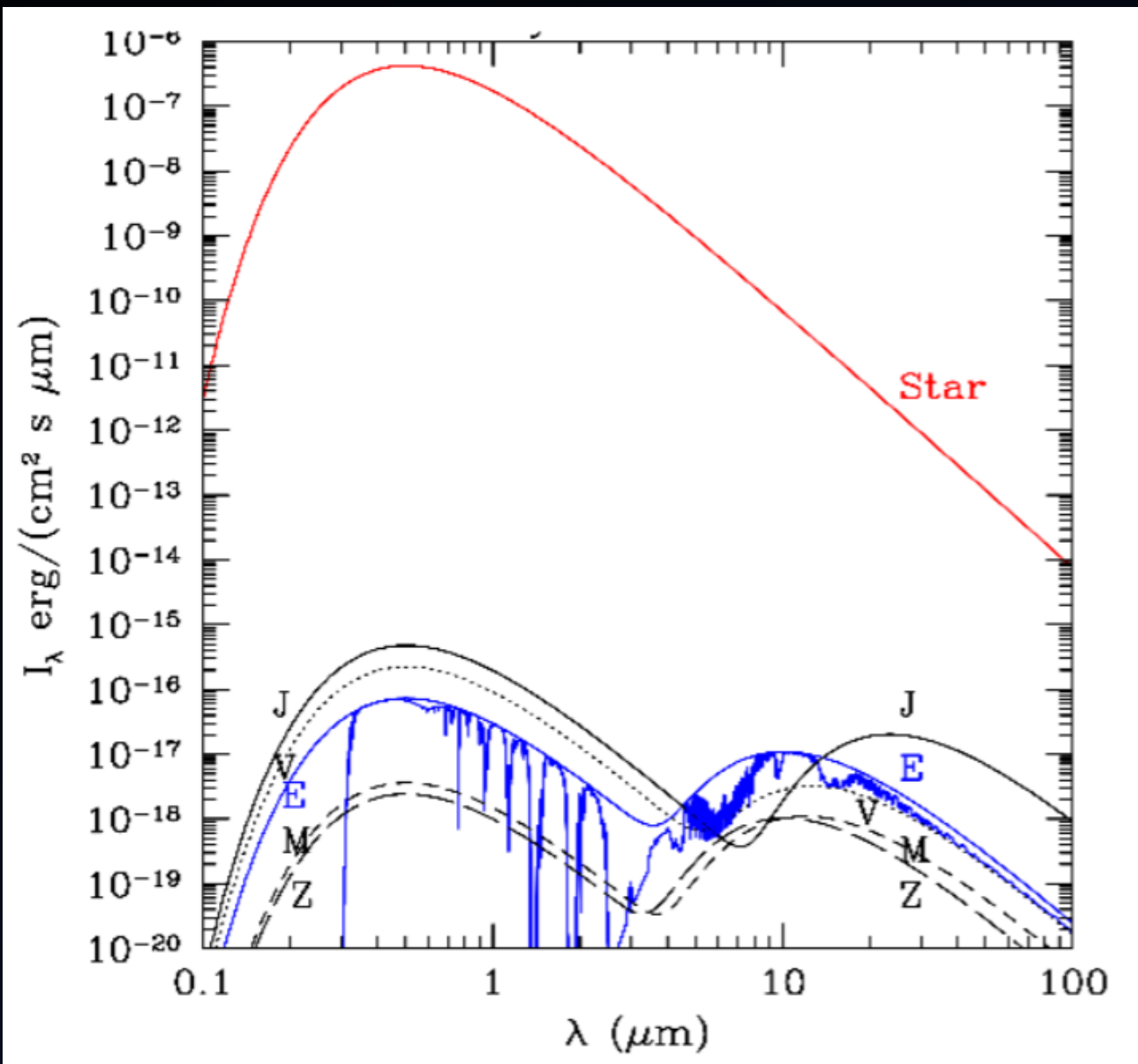
- кислород,
- озон,
- углекислый газ,
- метан,
- вода



Кислород на Земле

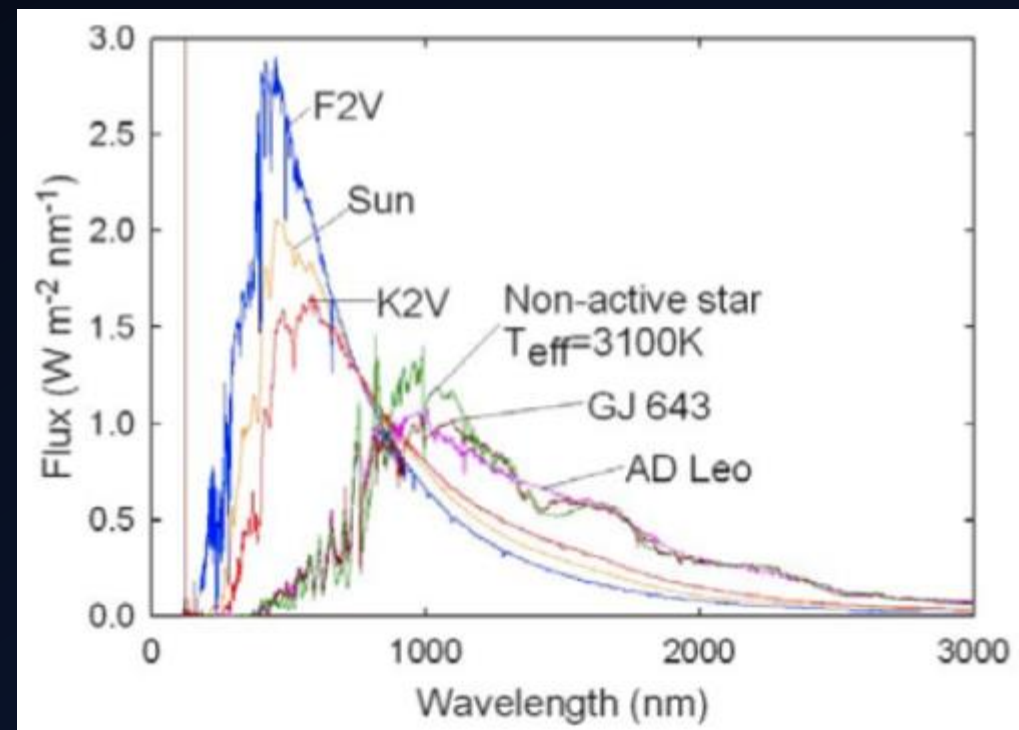


Солнце и планеты

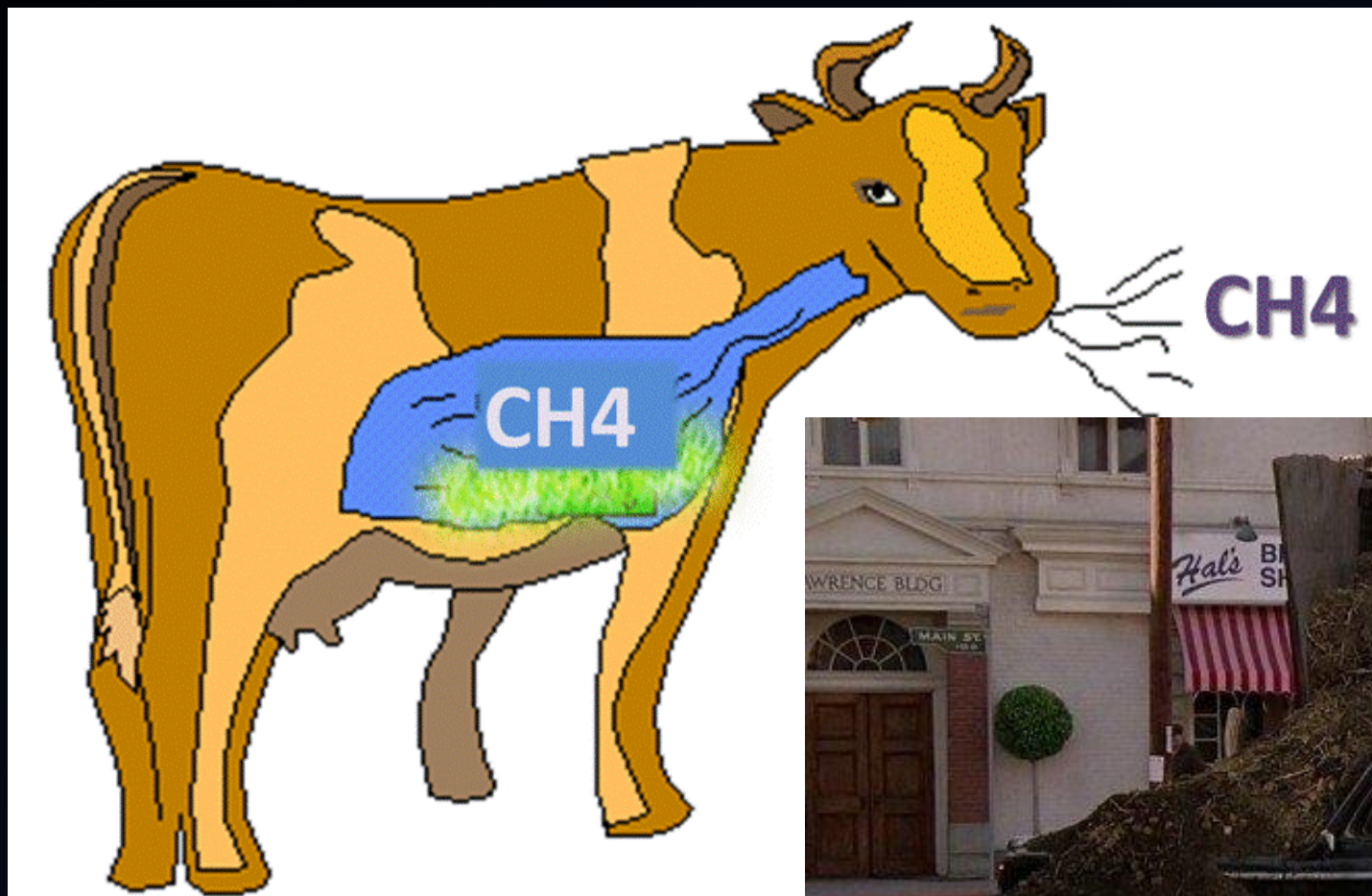


Выделение спектра планеты на фоне излучения звезды является трудной задачей.

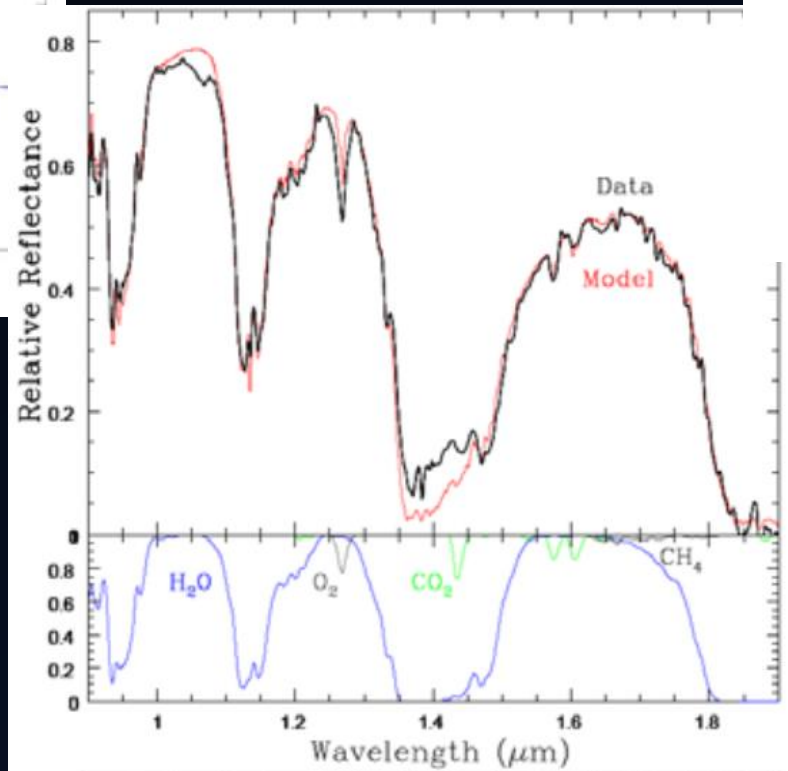
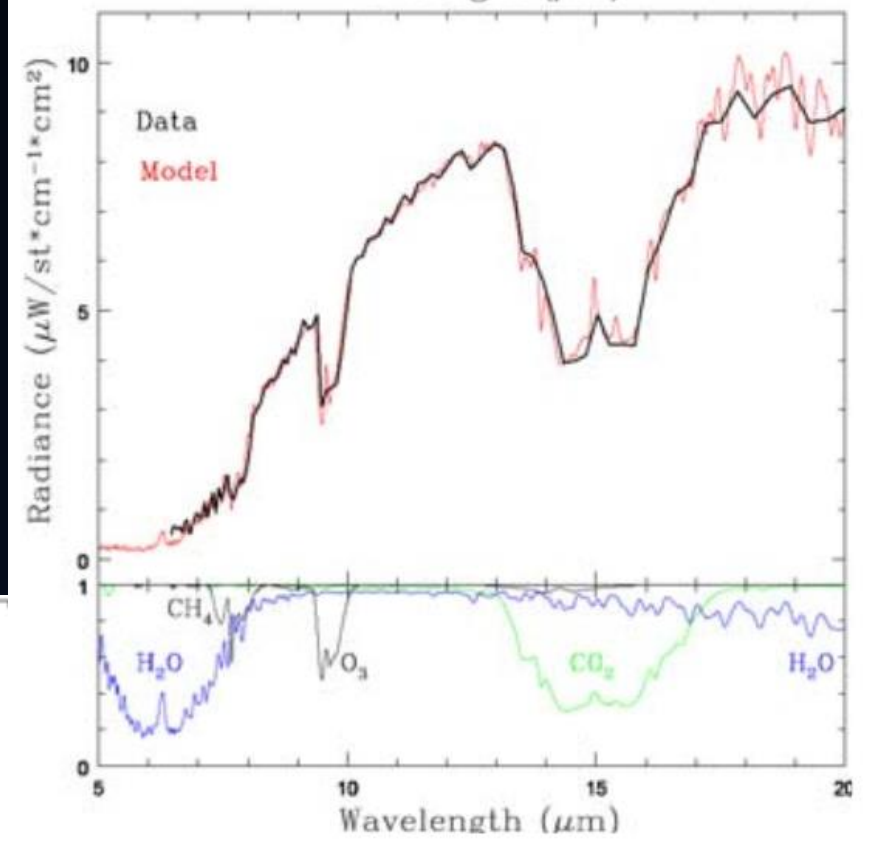
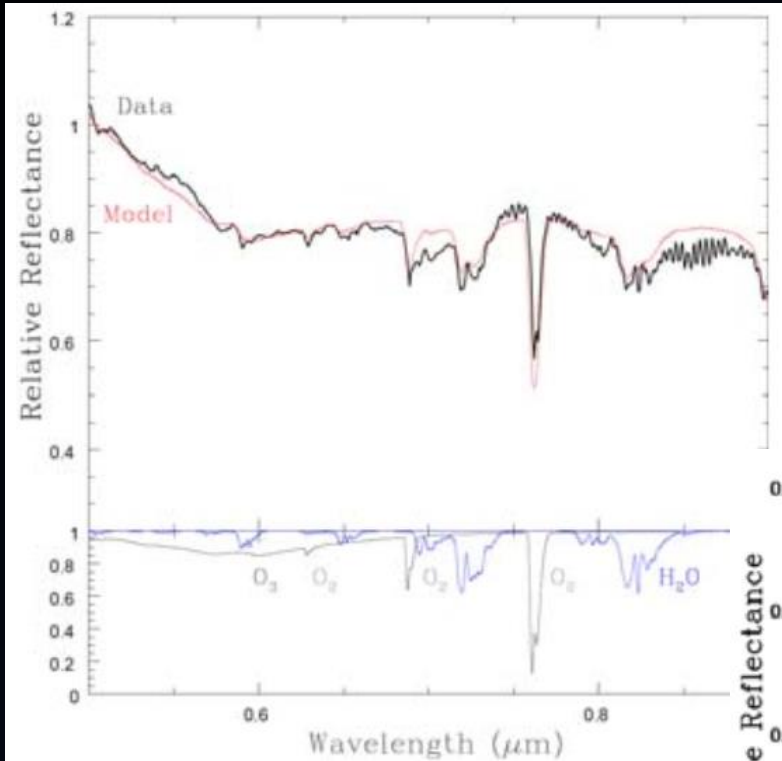
Спектры звезд различаются.



Происхождение метана на Земле



Спектр Земли

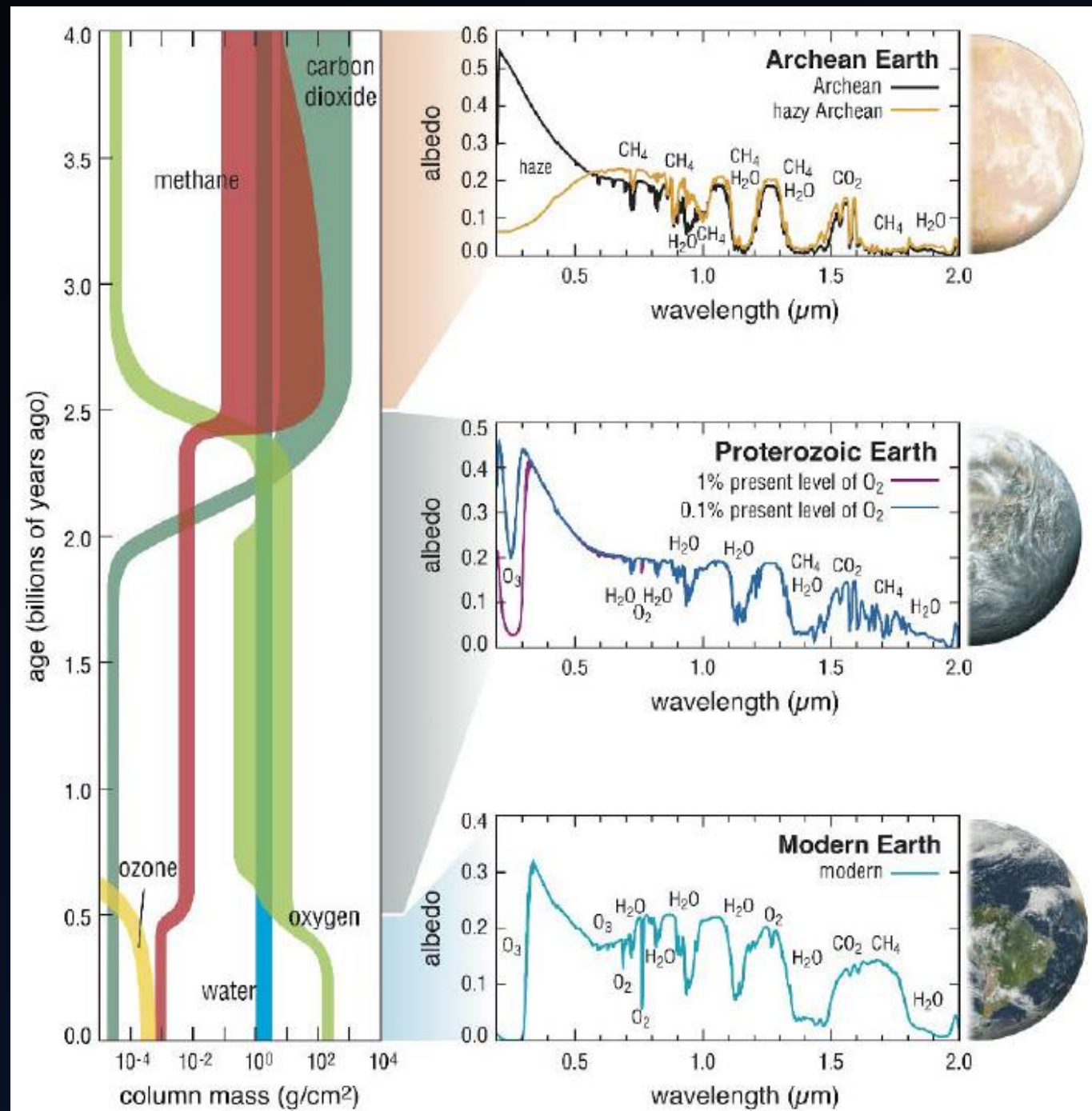


0906.2263

Спектр Земли в разные эпохи

В течение эволюции Земли состав атмосферы существенно изменялся.

Соответственно, спектры потенциально обитаемых планет могут быть похожи не на современный земной, а на спектры в прошлые эпохи.

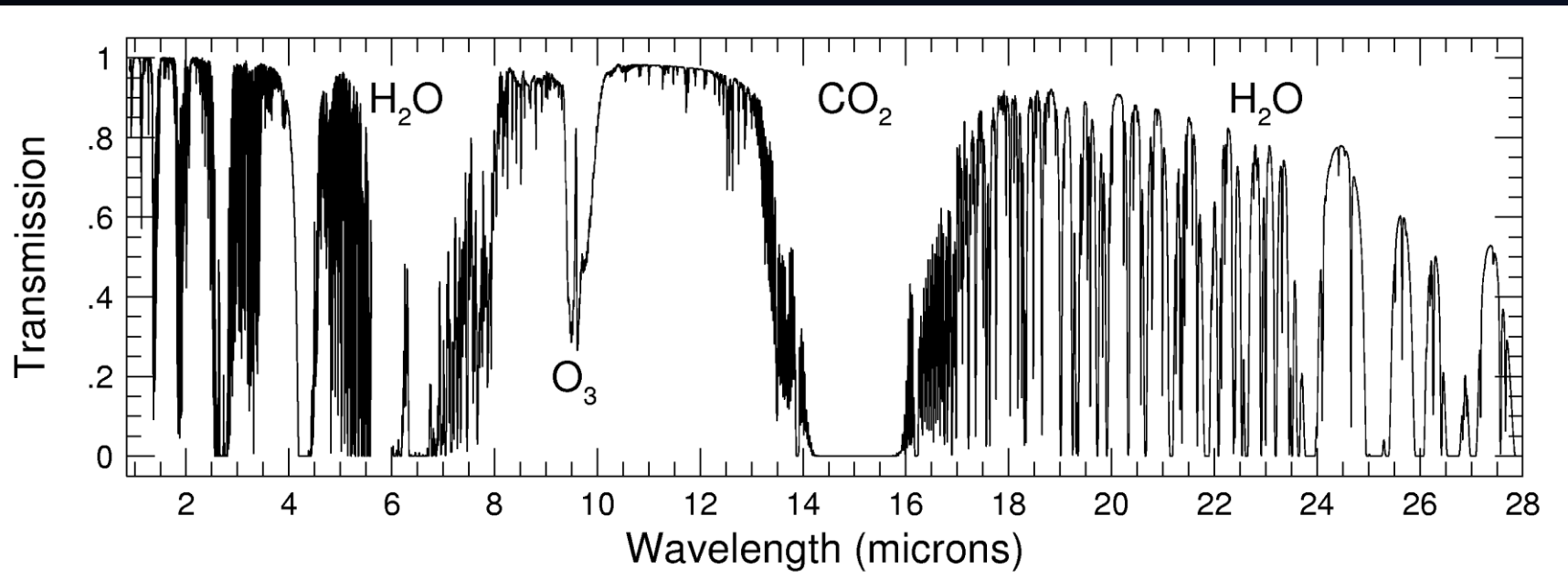
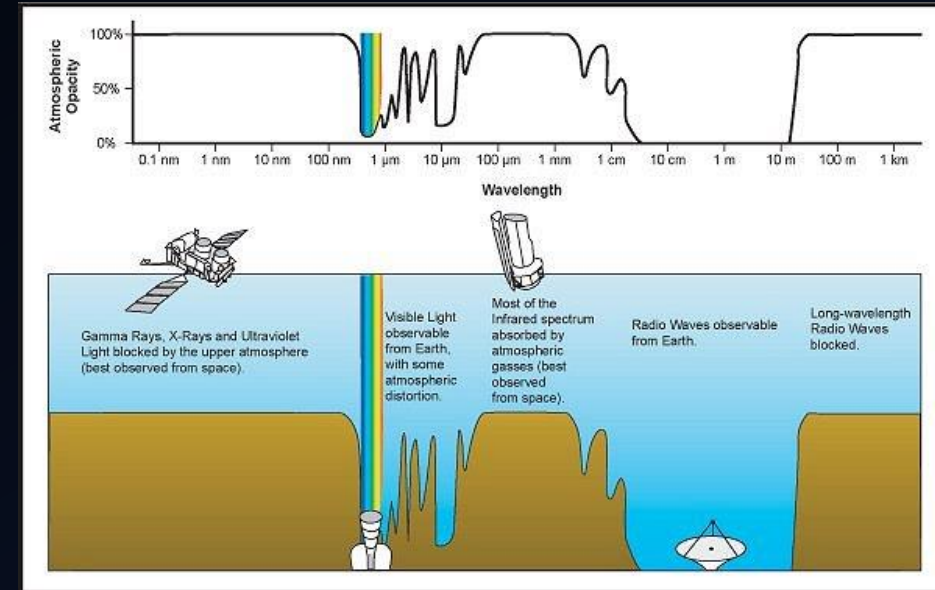


Прозрачность и яркость атмосферы Земли

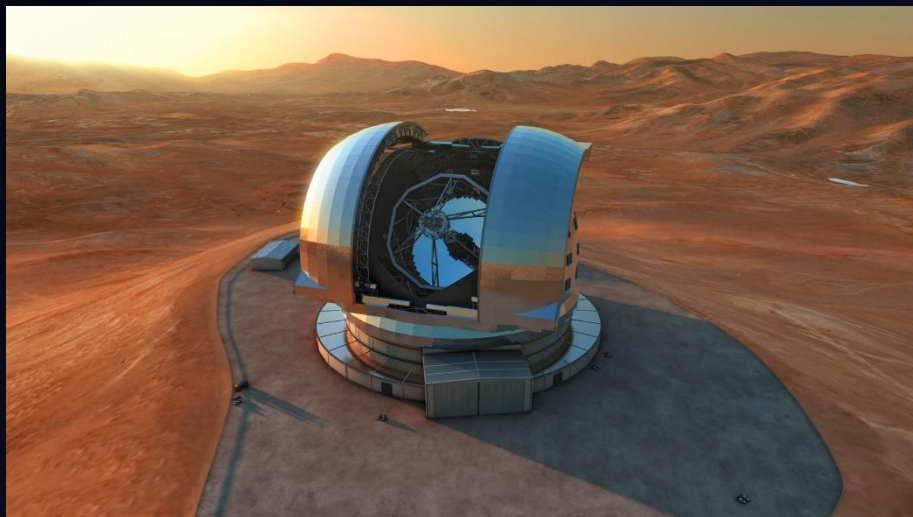
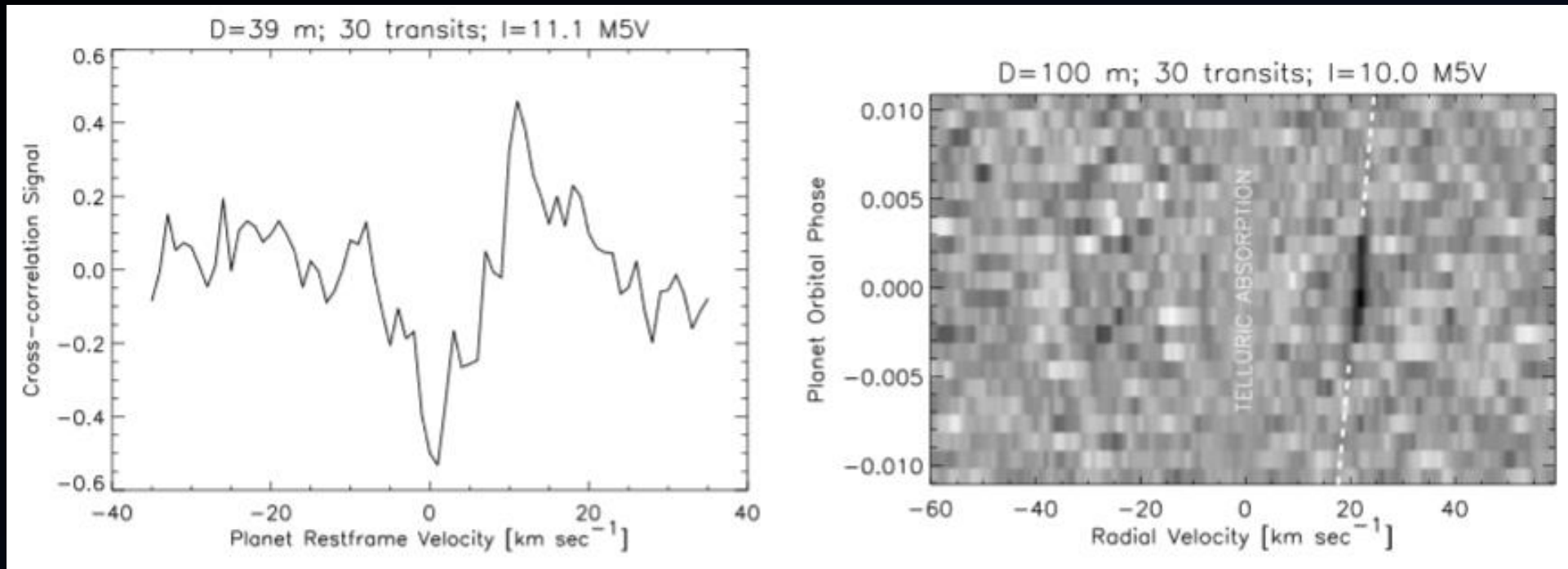
На длинах волн более 5 микрон атмосфера Земли мешает наблюдать.

Поэтому воду, метан, озон и углекислый газ придется искать из космоса.

А вот кислород O_2 можно наблюдать и с Земли, если есть большие телескопы.



Будущие наблюдения на E-ELT



Несколько лет наблюдений на E-ELT позволят обнаружить кислород на планете типа Земли, вращающейся вокруг красного карлика.

А можно строить специальные телескопы для таких исследований.