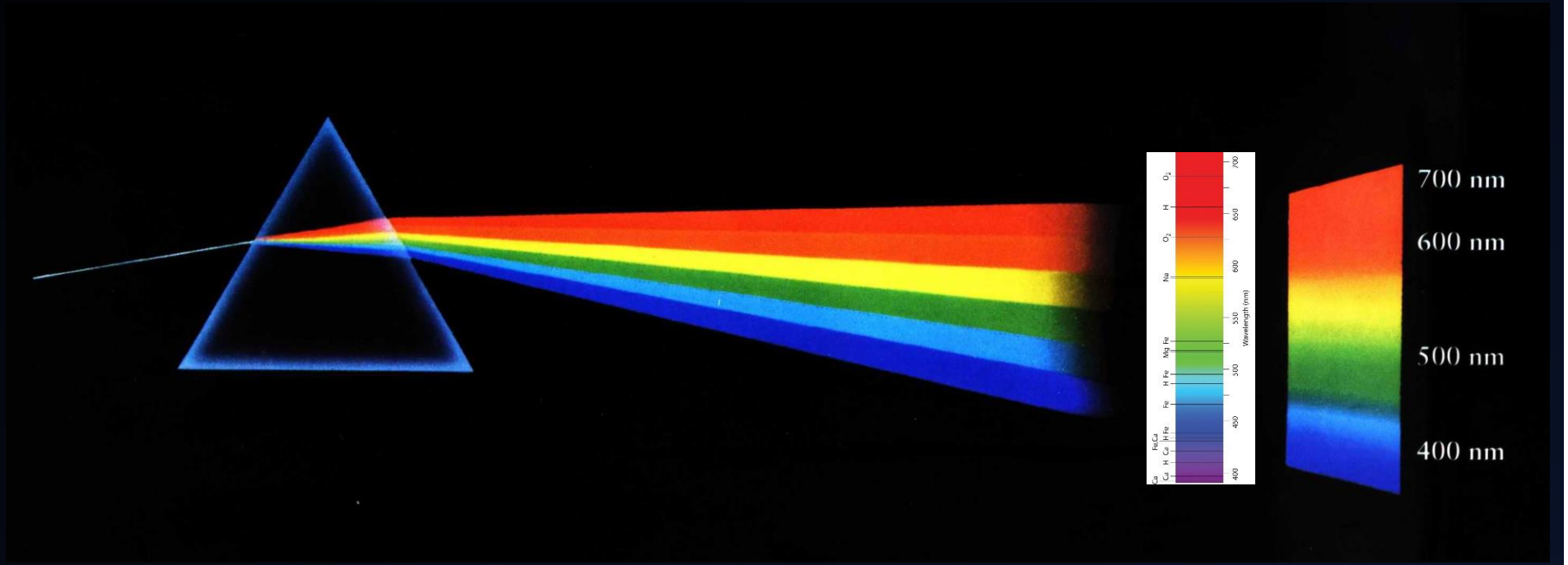
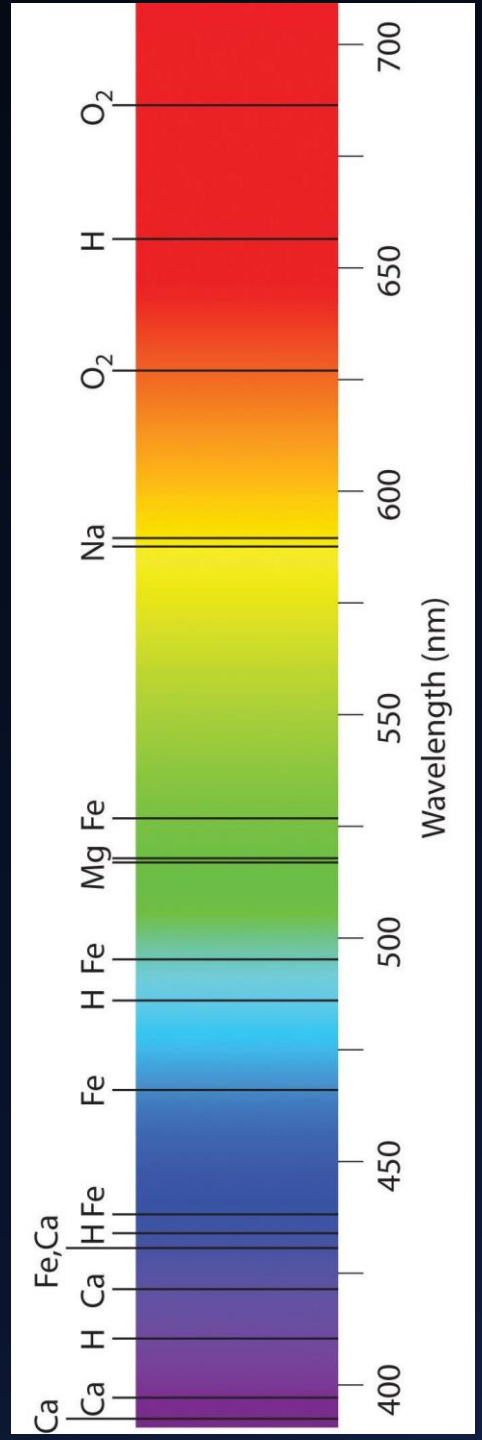
Экзопланеты:
спектры и атмосферы

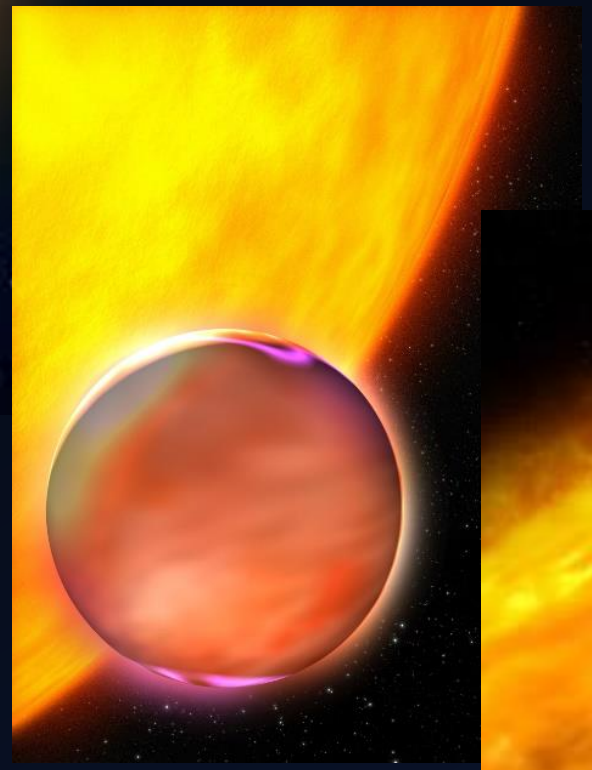
Спектр

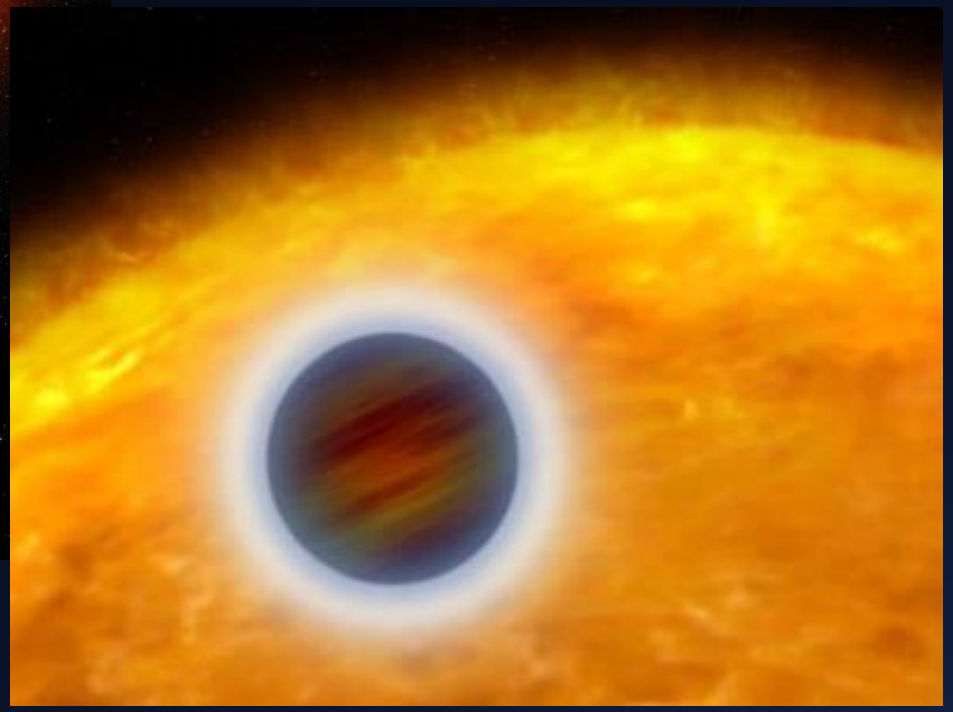




Анализ спектра позволяет установить химический состав атмосфер экзопланет.

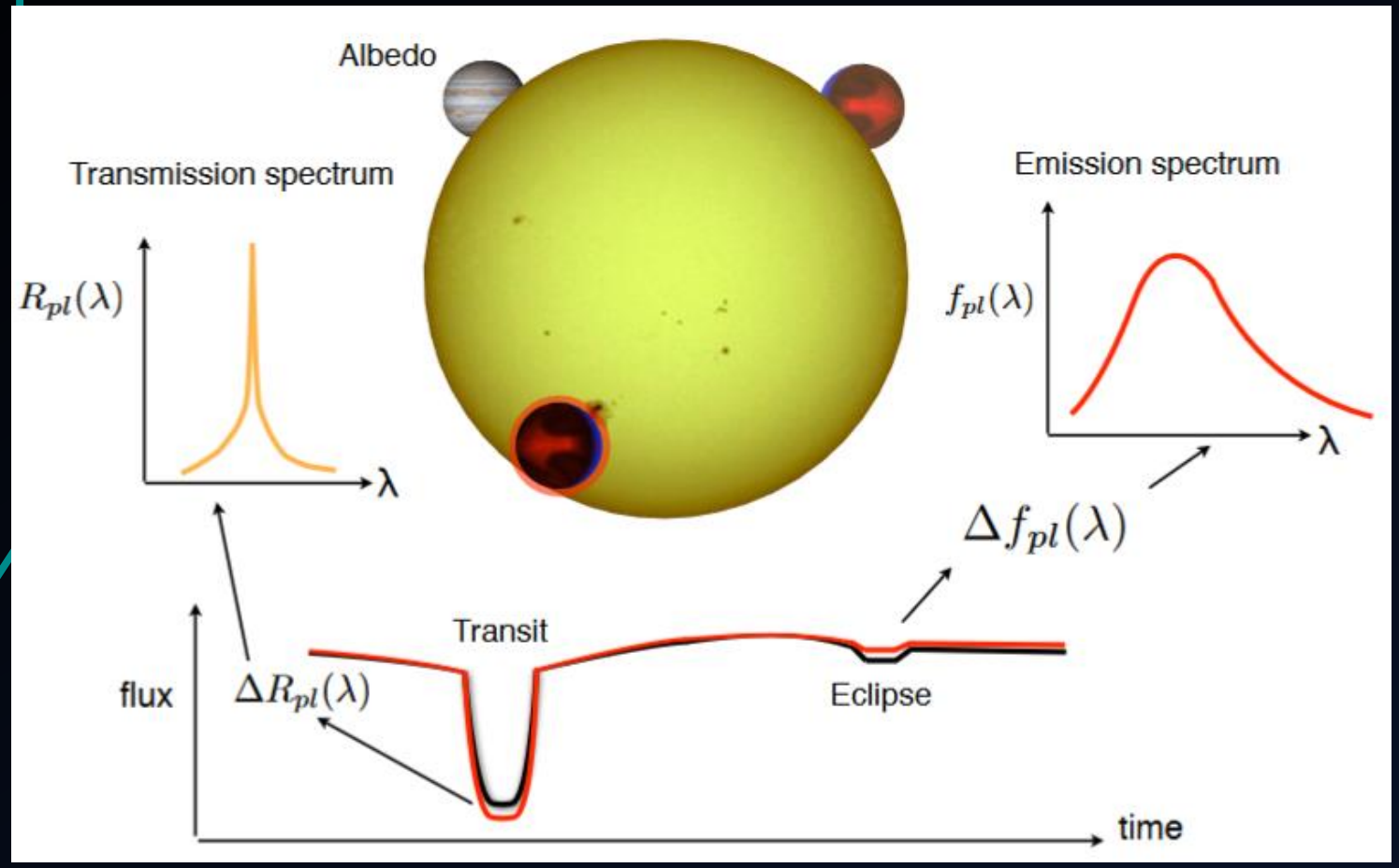
Атмосферы экзопланет





Есть несколько возможностей для получения спектров атмосфер экзопланет.

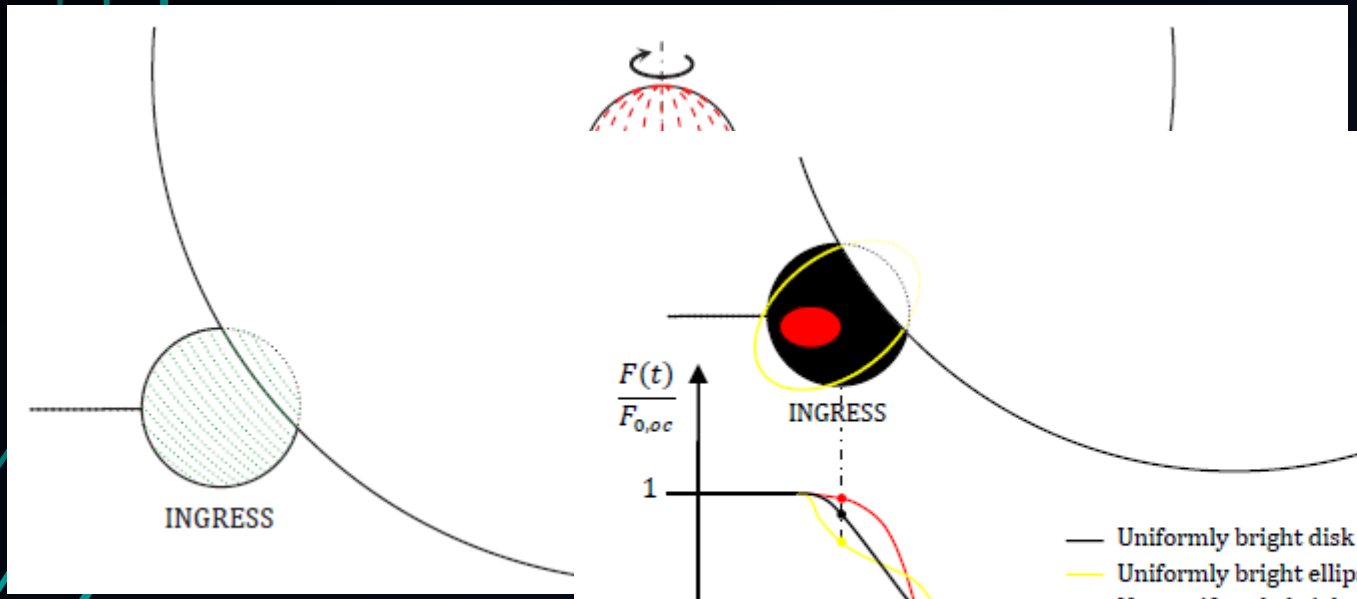
Изучение планет во время транзитов



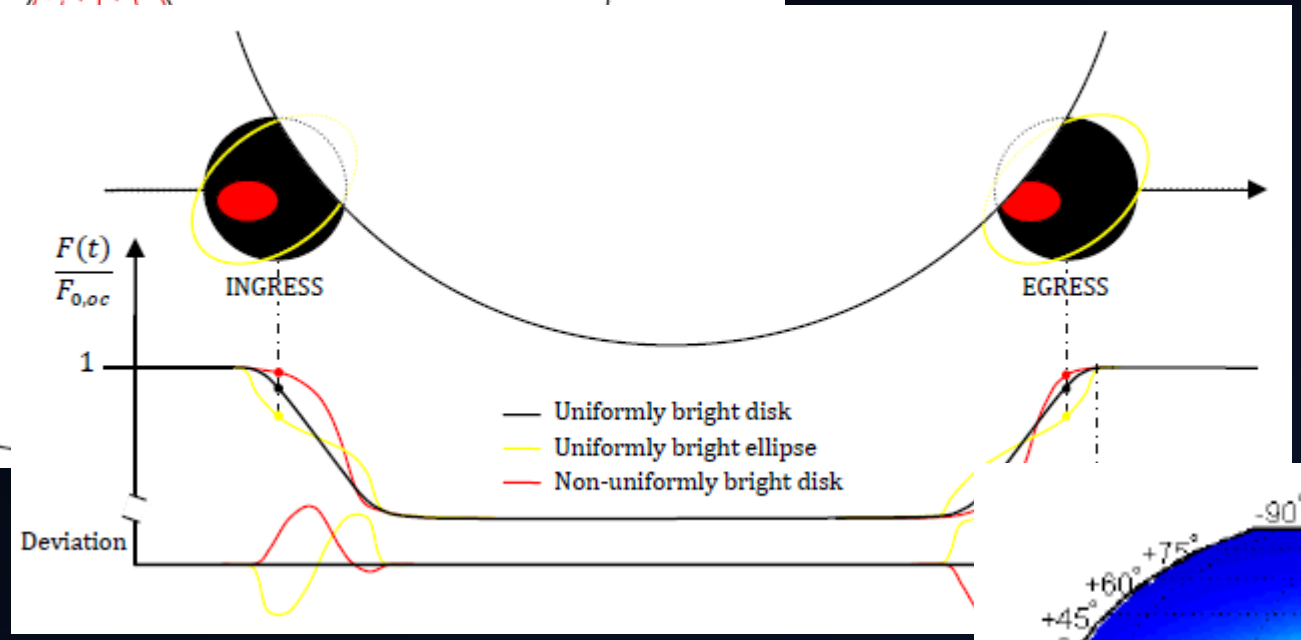
- Интегральные свойства поверхности (альбедо)
- «Спектр на просвет» за счет разной глубины транзита
- Спектр собственного излучения планеты
- Картирование

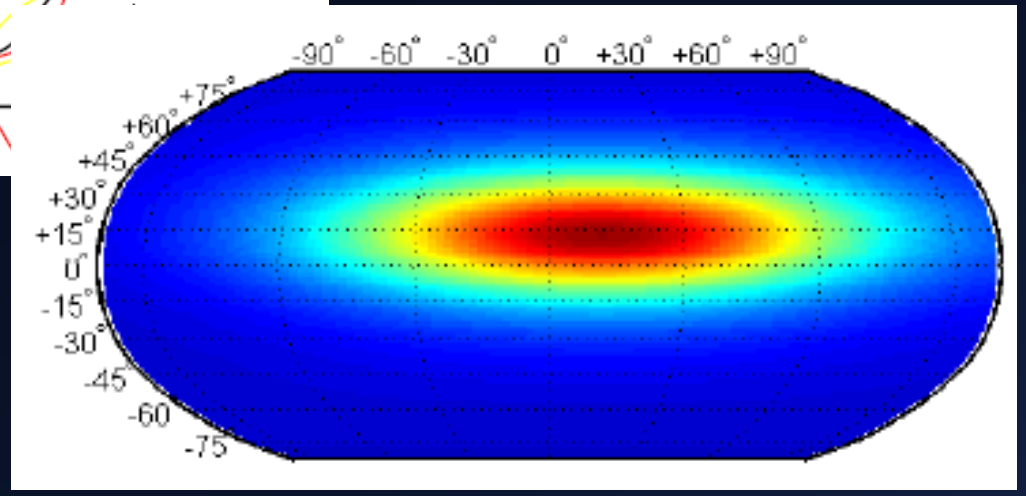
1804.07357, см. обзор в 1810.04175

Сканирование планетных дисков



HD189733b

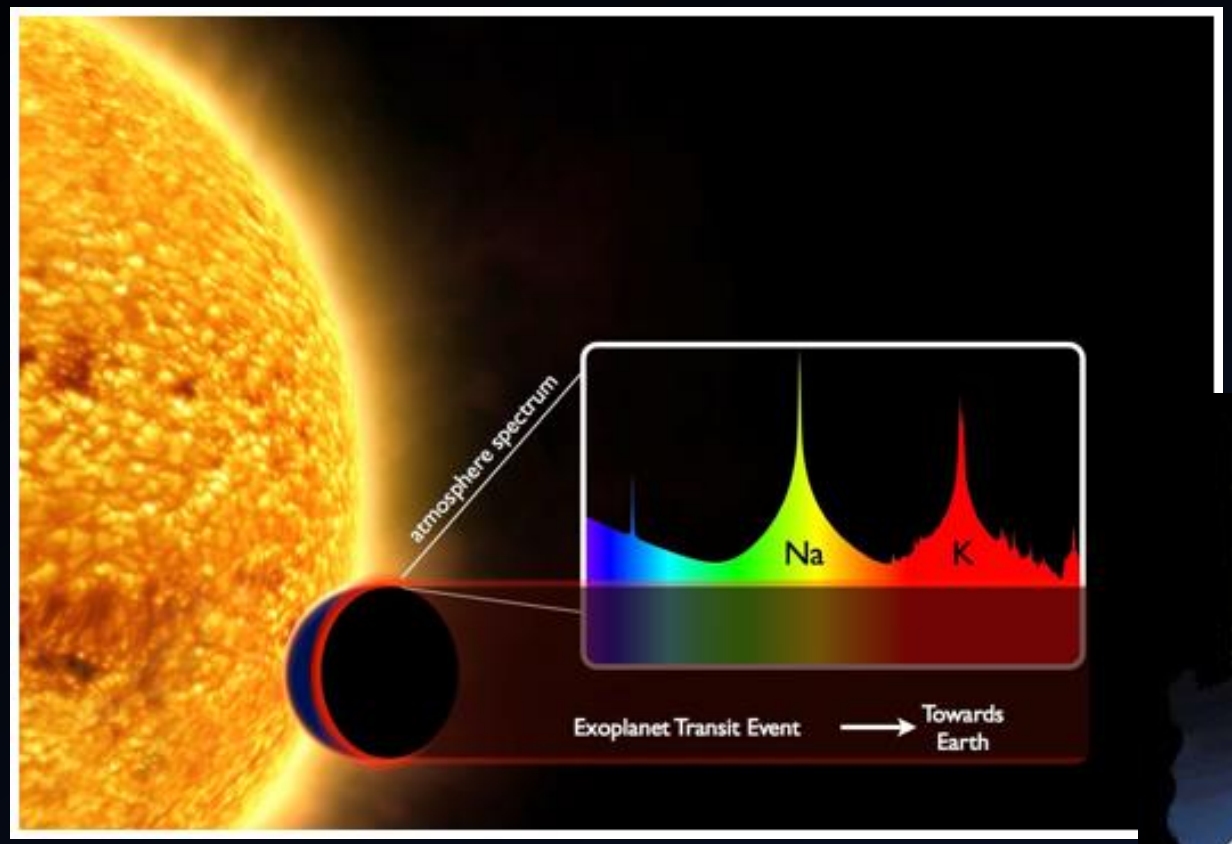




Spitzer space telescope

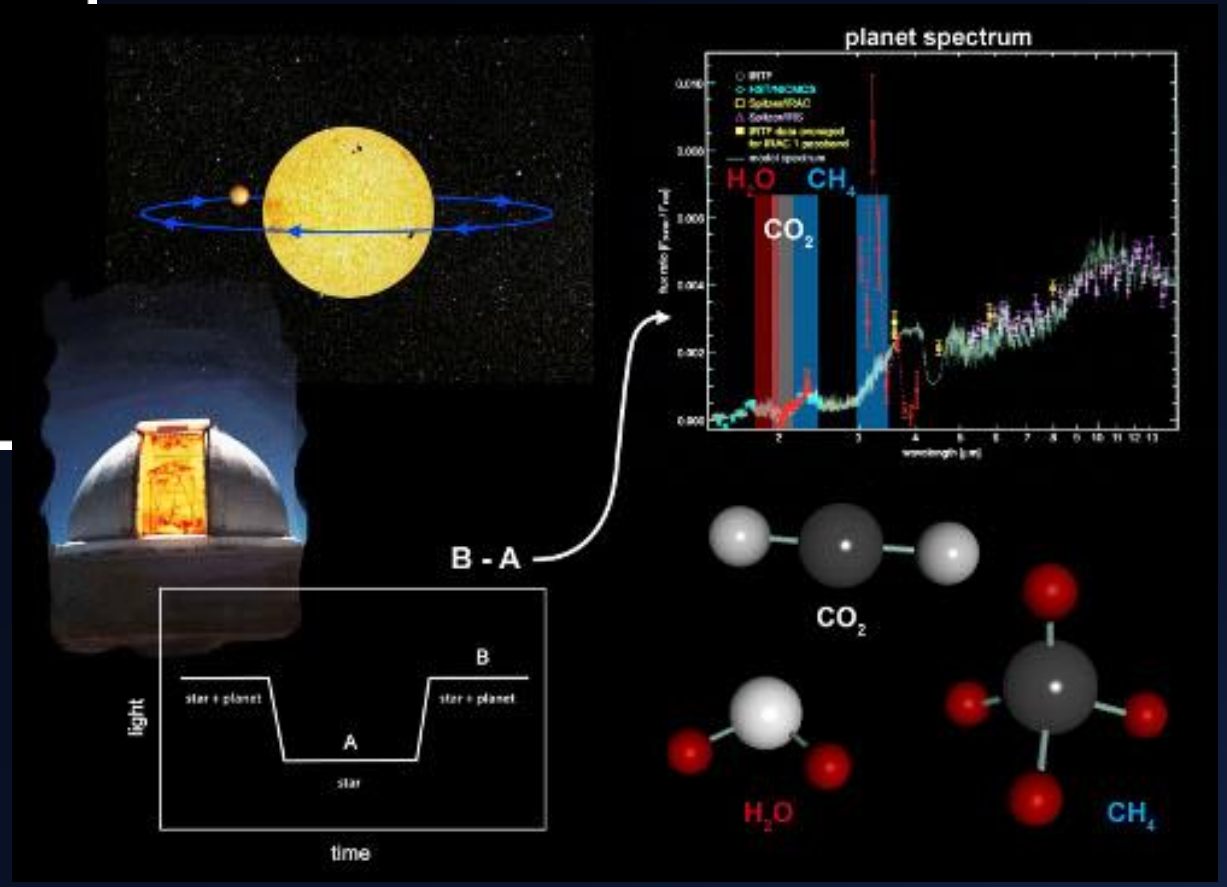
1202.3829

Спектры «напросвет» и прямые

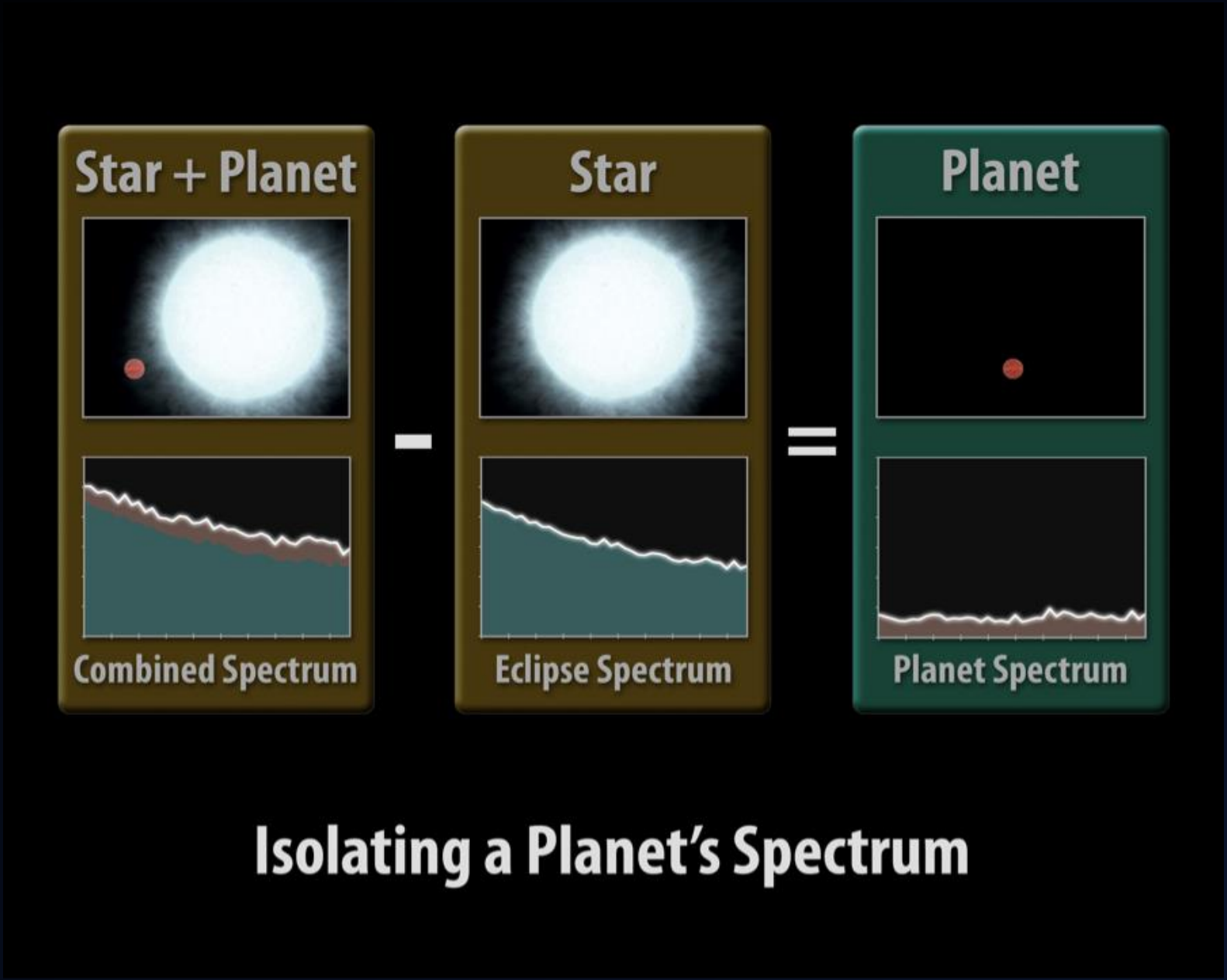


При транзитах можно получать кривые блеска на разных длинах волн. Это также позволяет получить спектр, т.к. атмосфера имеет разную прозрачность на разных волнах.

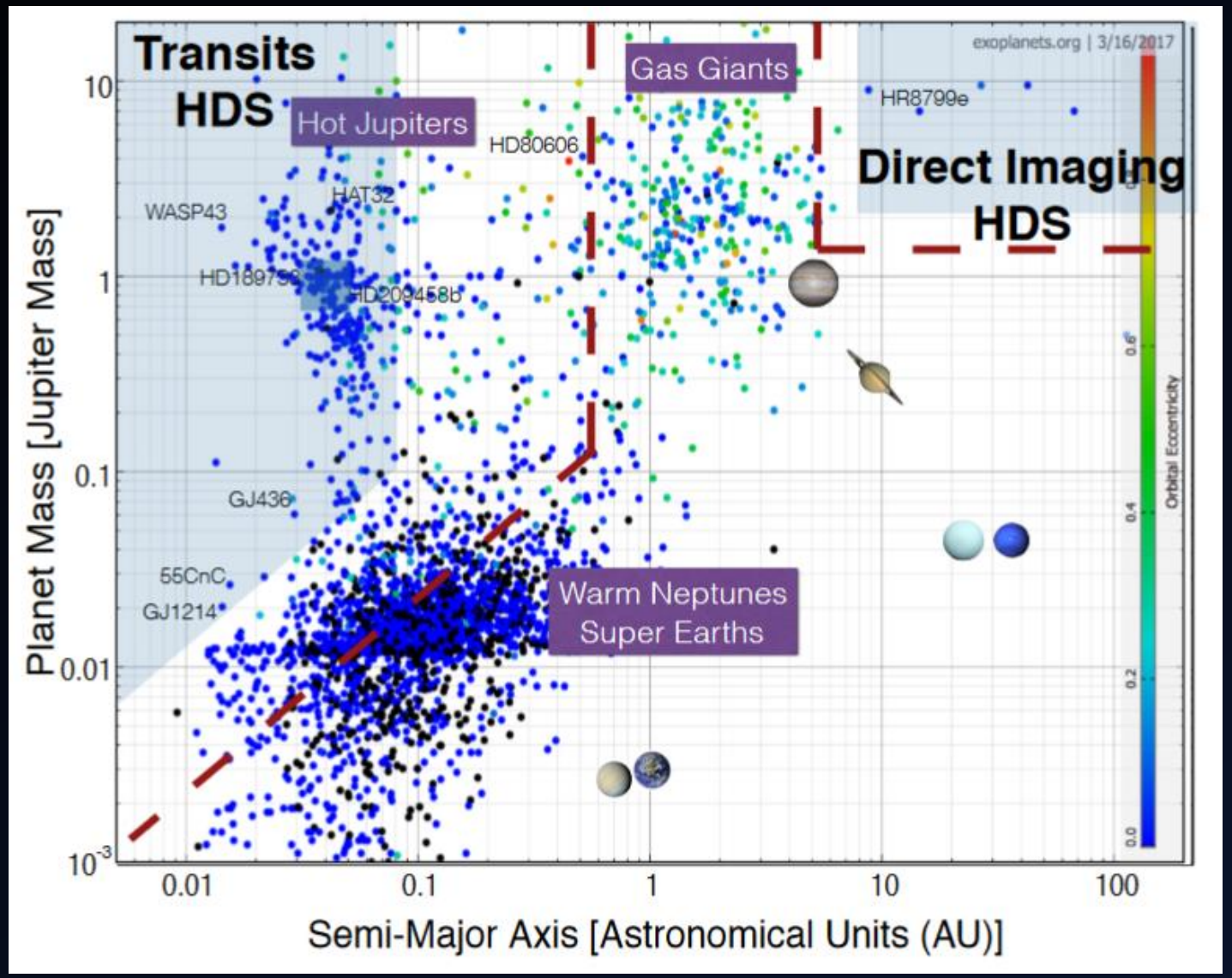
Иногда получают спектр дневной стороны планеты, а иногда изучают атмосферу «напросвет», когда планета проходит между звездой и нами.



Спектр планеты



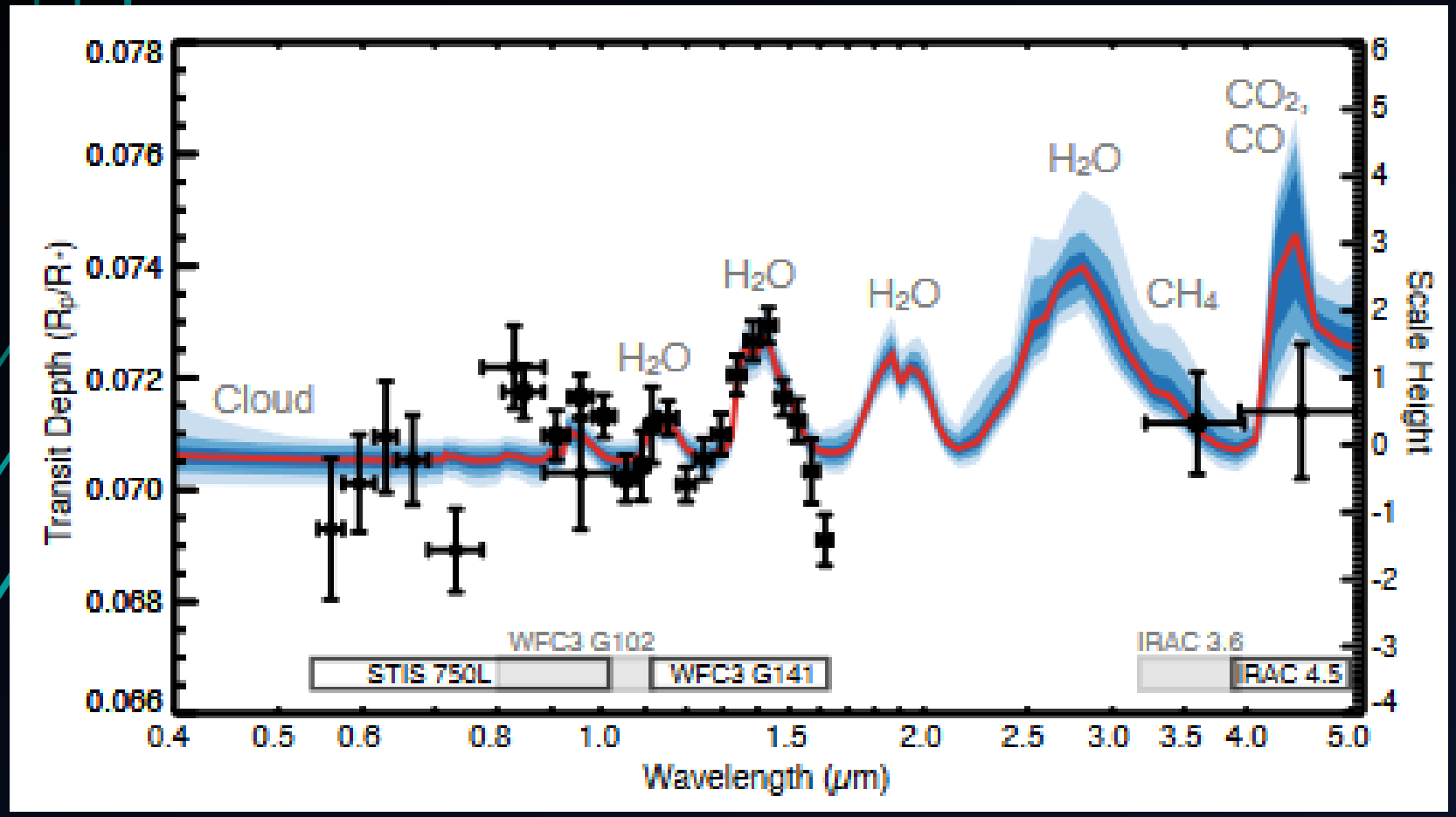
Чувствительность метода

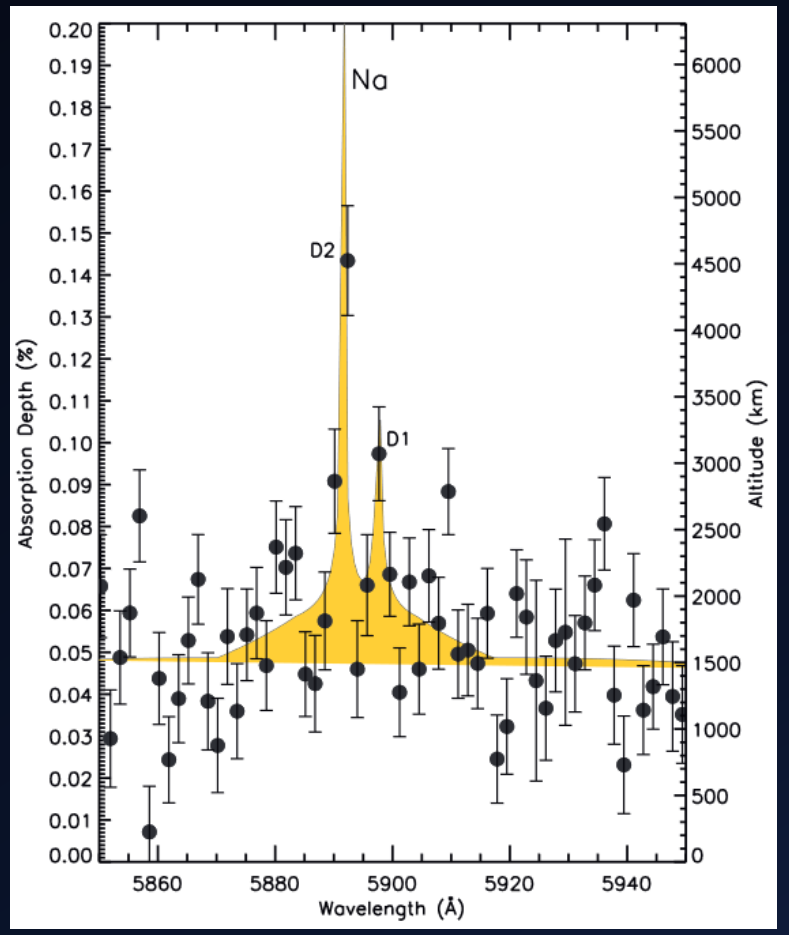


Заметно проще зарегистрировать сигнал от планет вокруг красных карликов, т.к. в этом случае меньше радиус звезды.

1804.07357

Трансмиссионные спектры

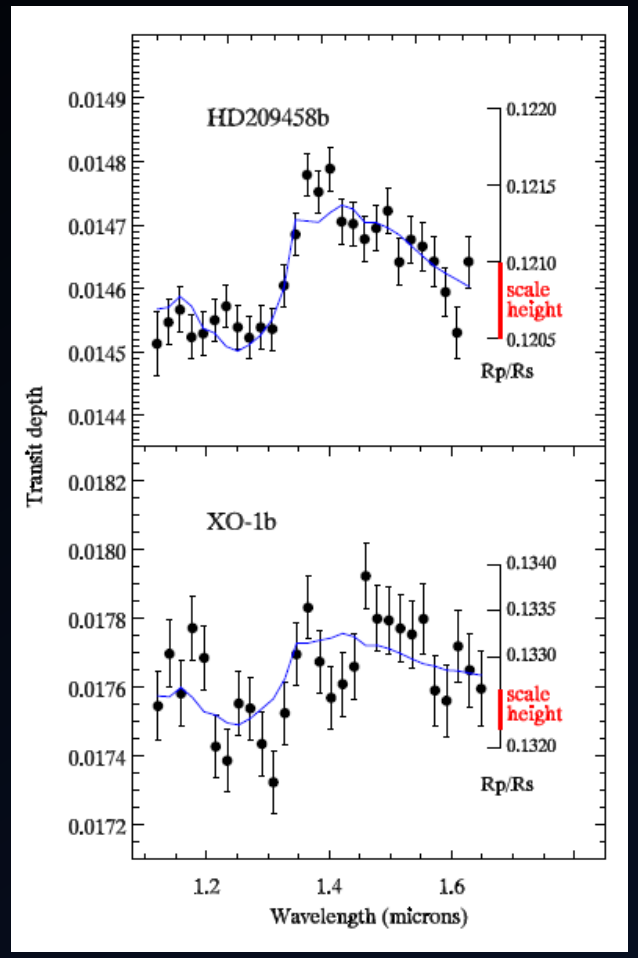




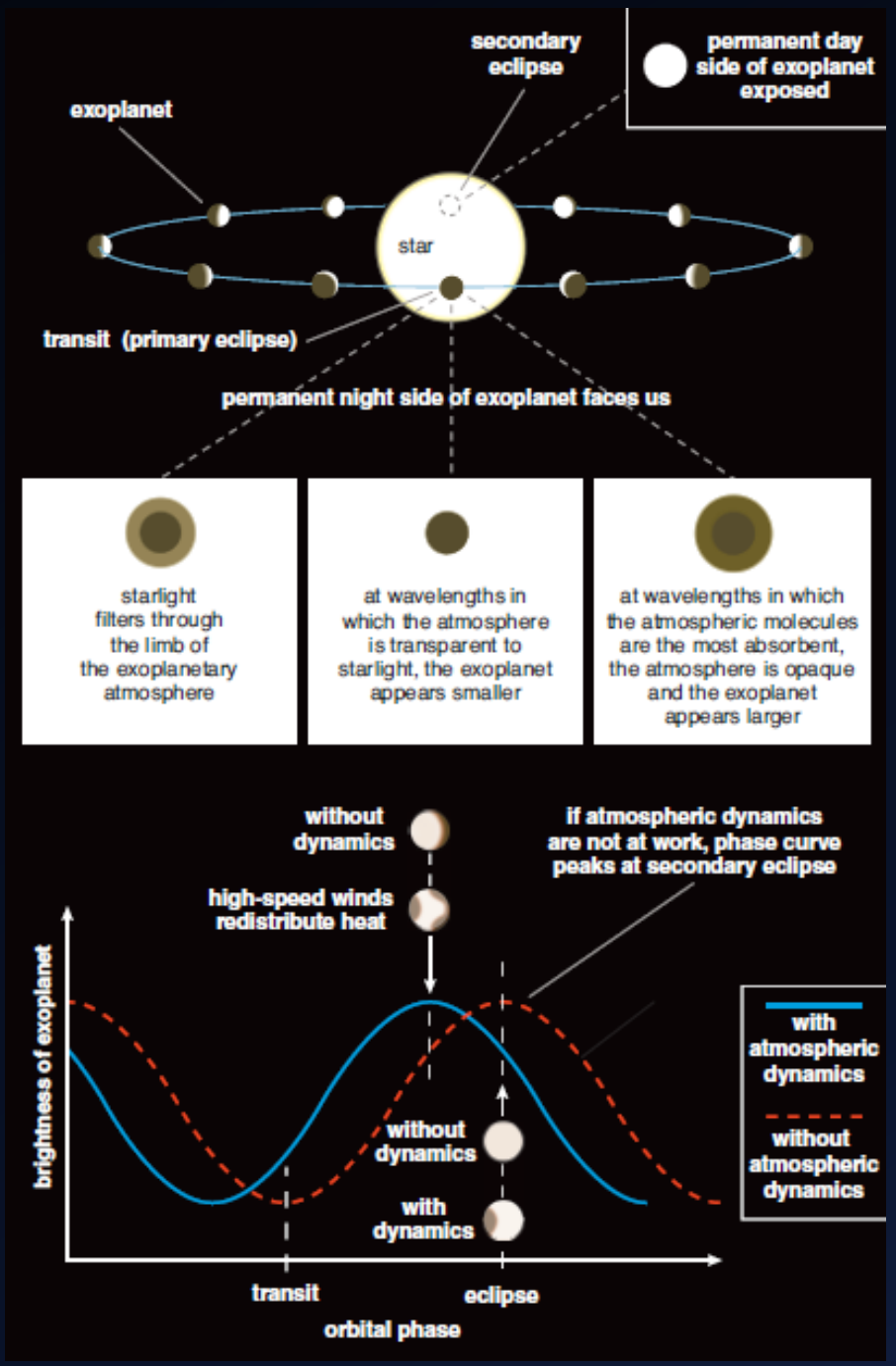
1810.04175

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.

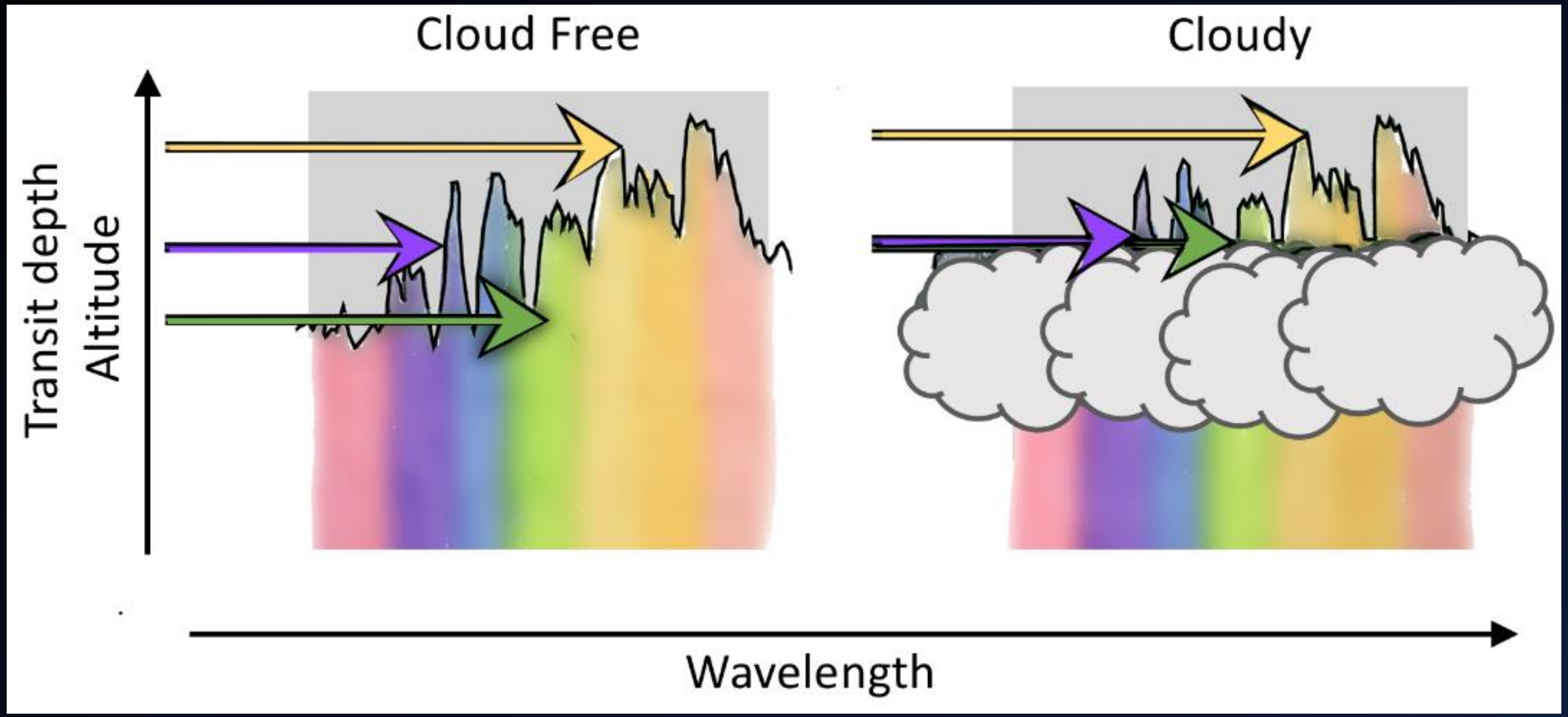


1302.1141



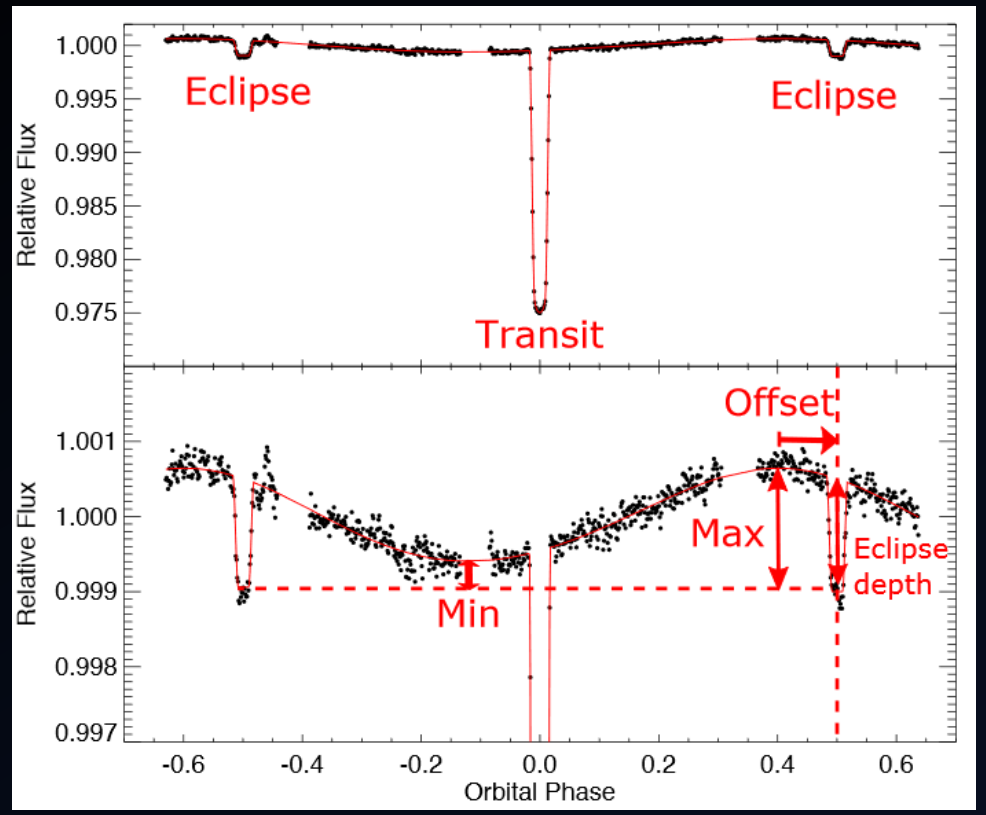
1407.4150

Облака в атмосферах экзопланет



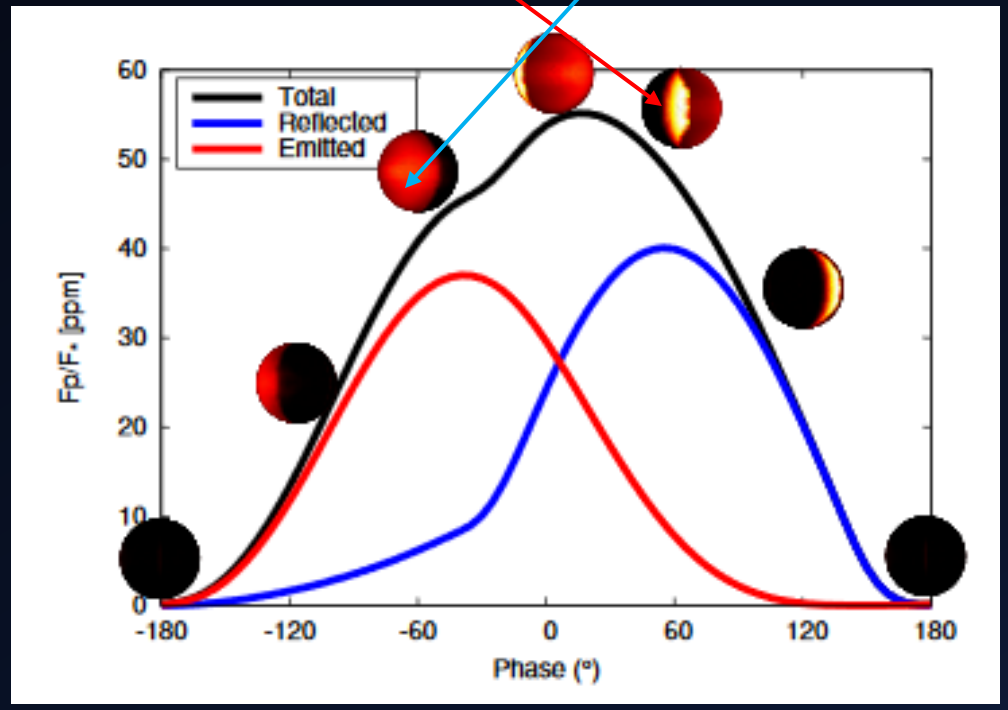
2102.04772

Кривые блеска



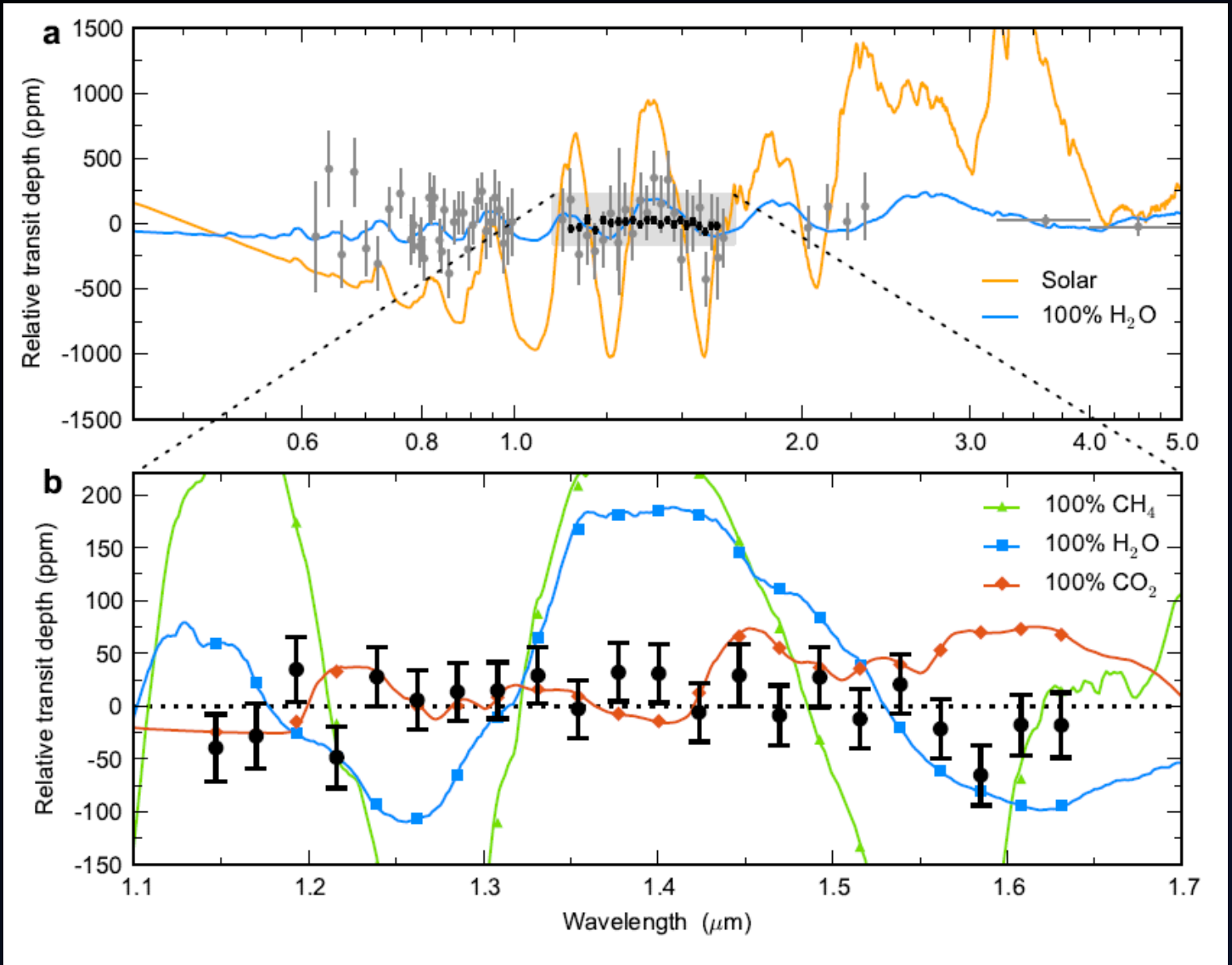
Яркие облака отражают свет

Глобальные ветра создают несимметричное распределение температуры по поверхности



1711.07696

Сверхземля **GJ 1214b**



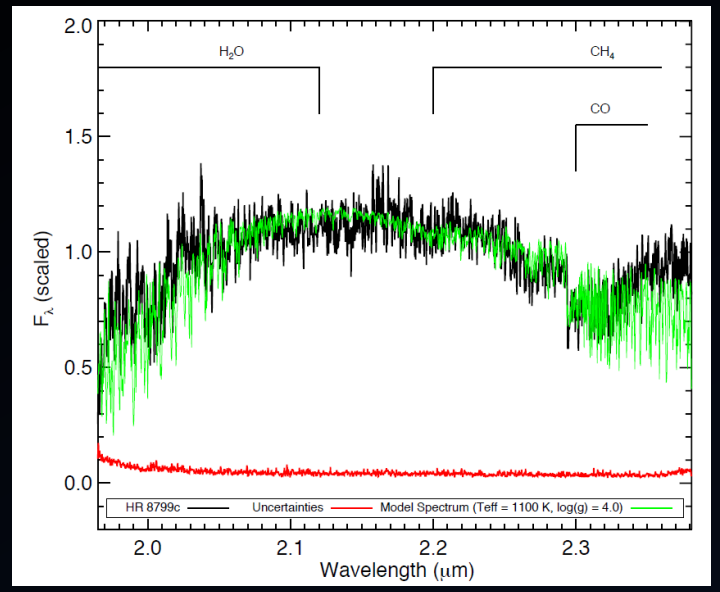
1401.0022

С помощью Космического телескопа им. Хаббла получен хороший спектр.

В нем не видно деталей.

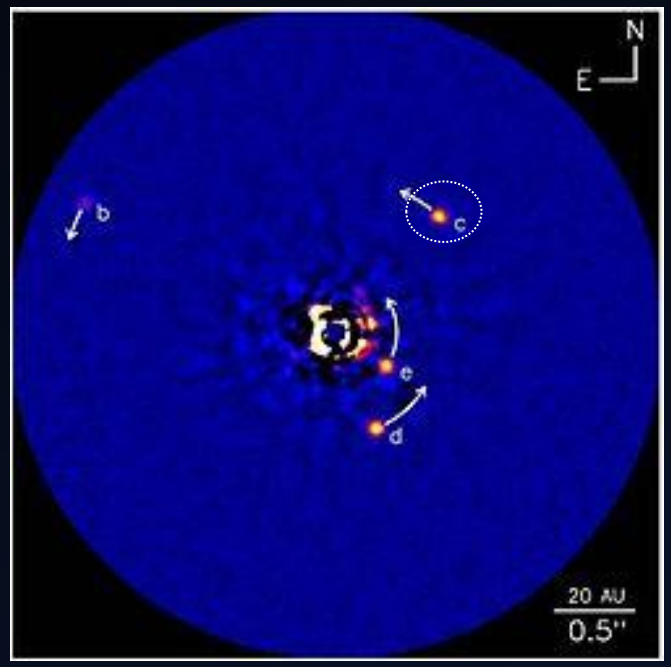
Это можно объяснить высокими облаками.

Вода и CO в спектре планеты



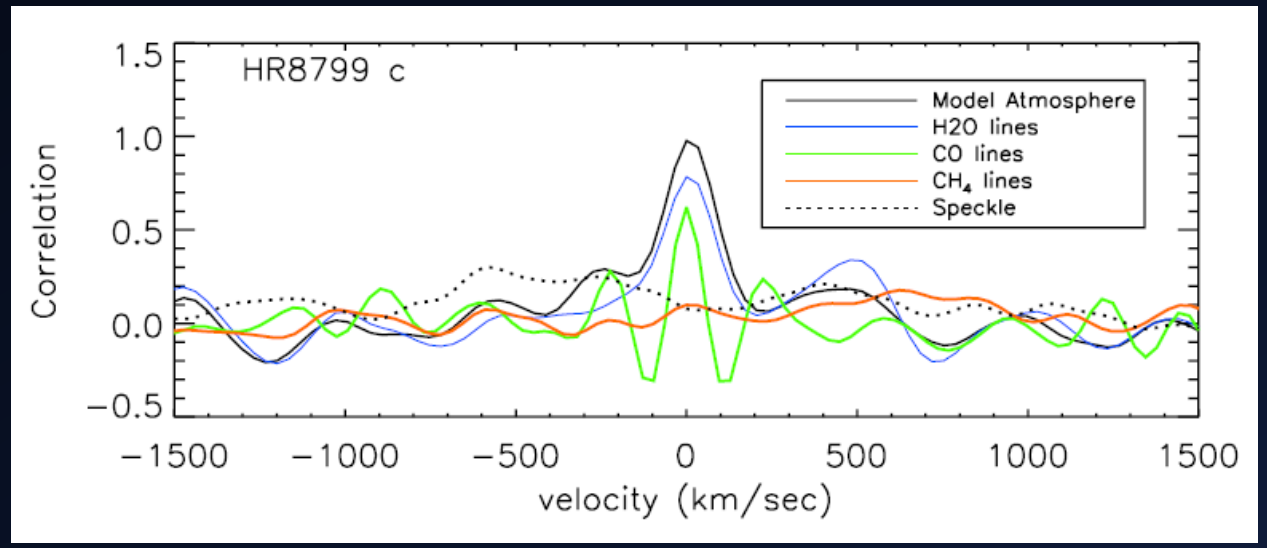
ИК-спектр HR 8799

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

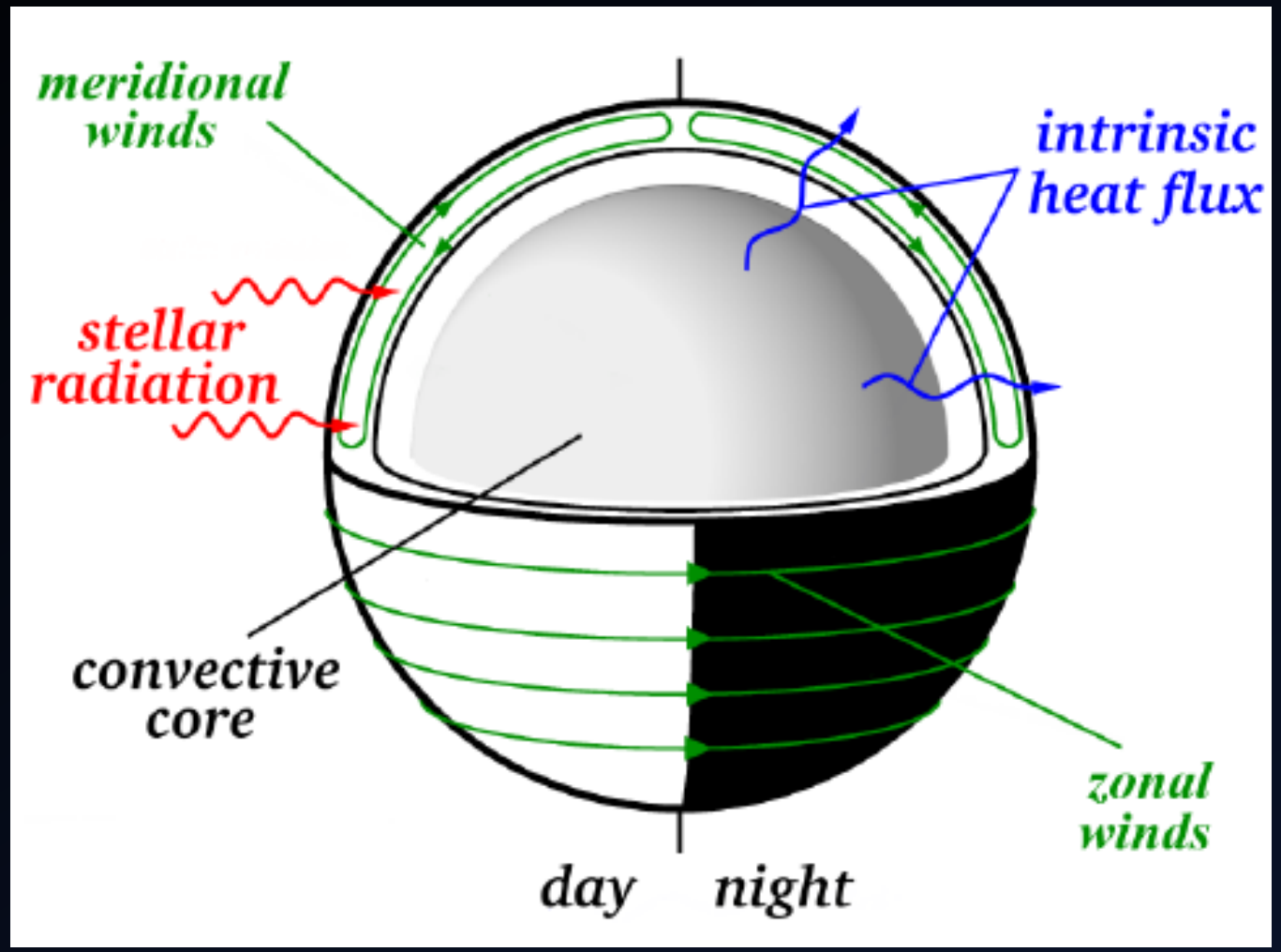


HR 8799

Наблюдения на Keck II



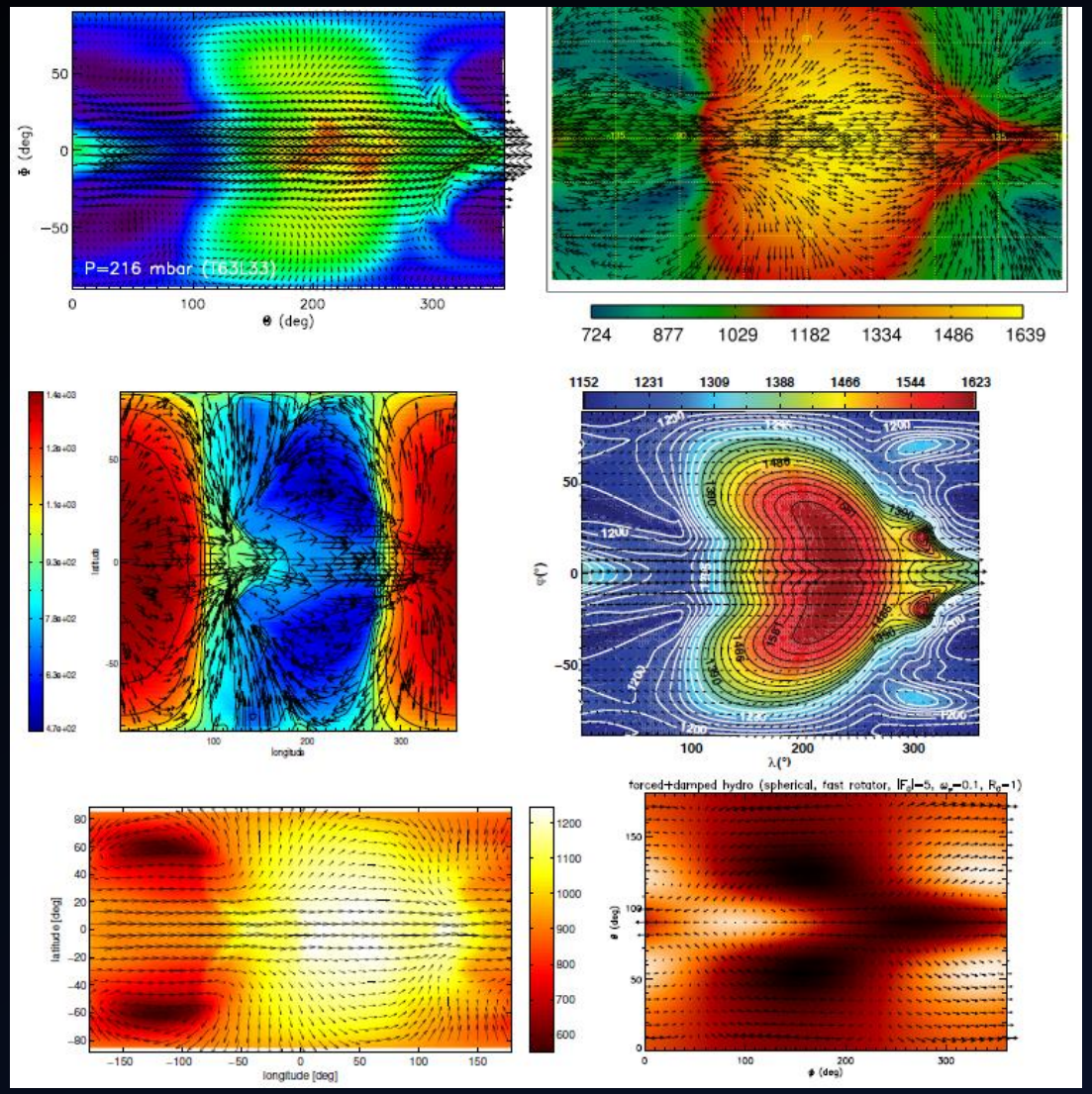
Динамика внешних слоев на горячих юпитерах



1405.3752

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

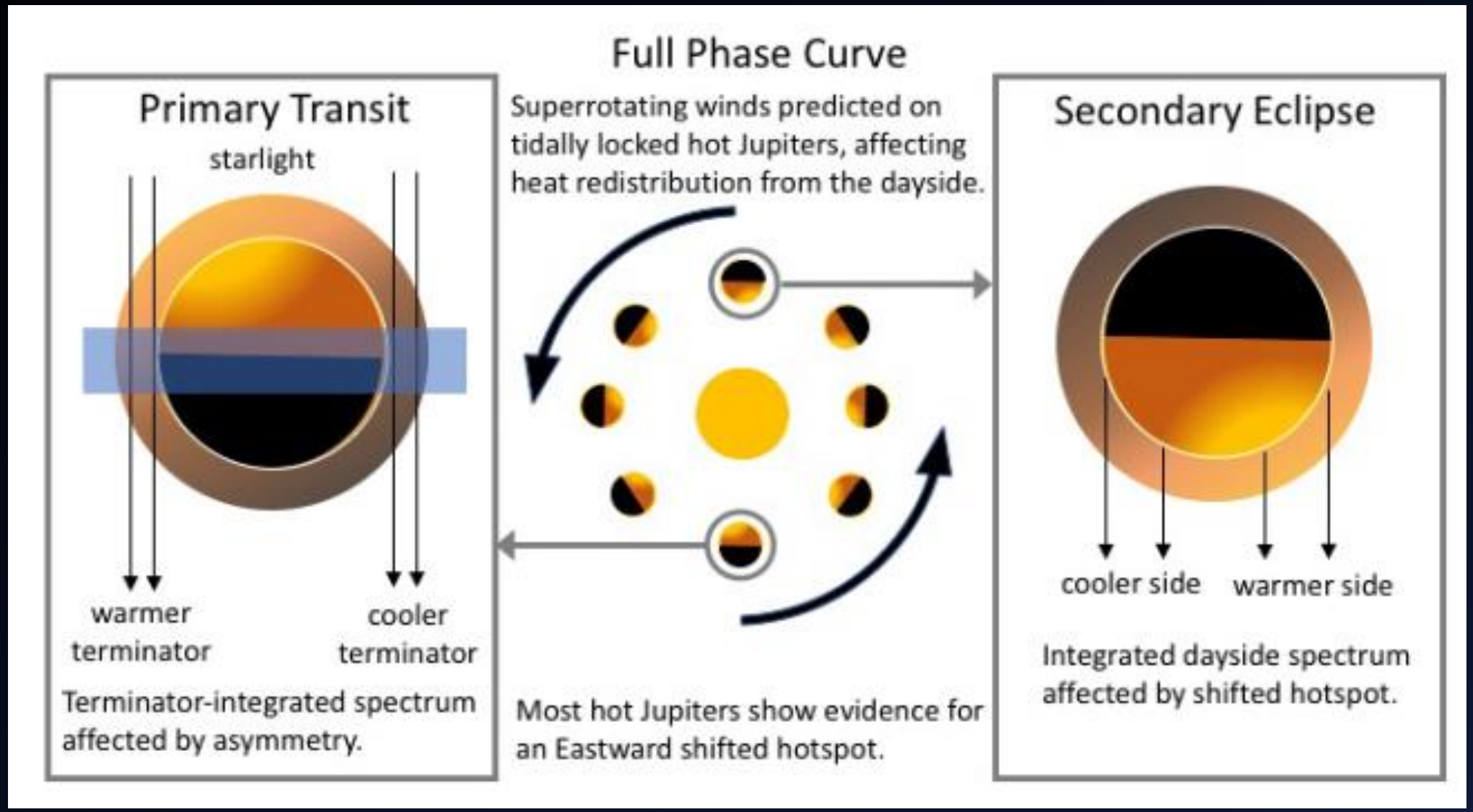
Моделирование ветров горячих юпитеров



Сильный экваториальный ветер с Запада на Восток

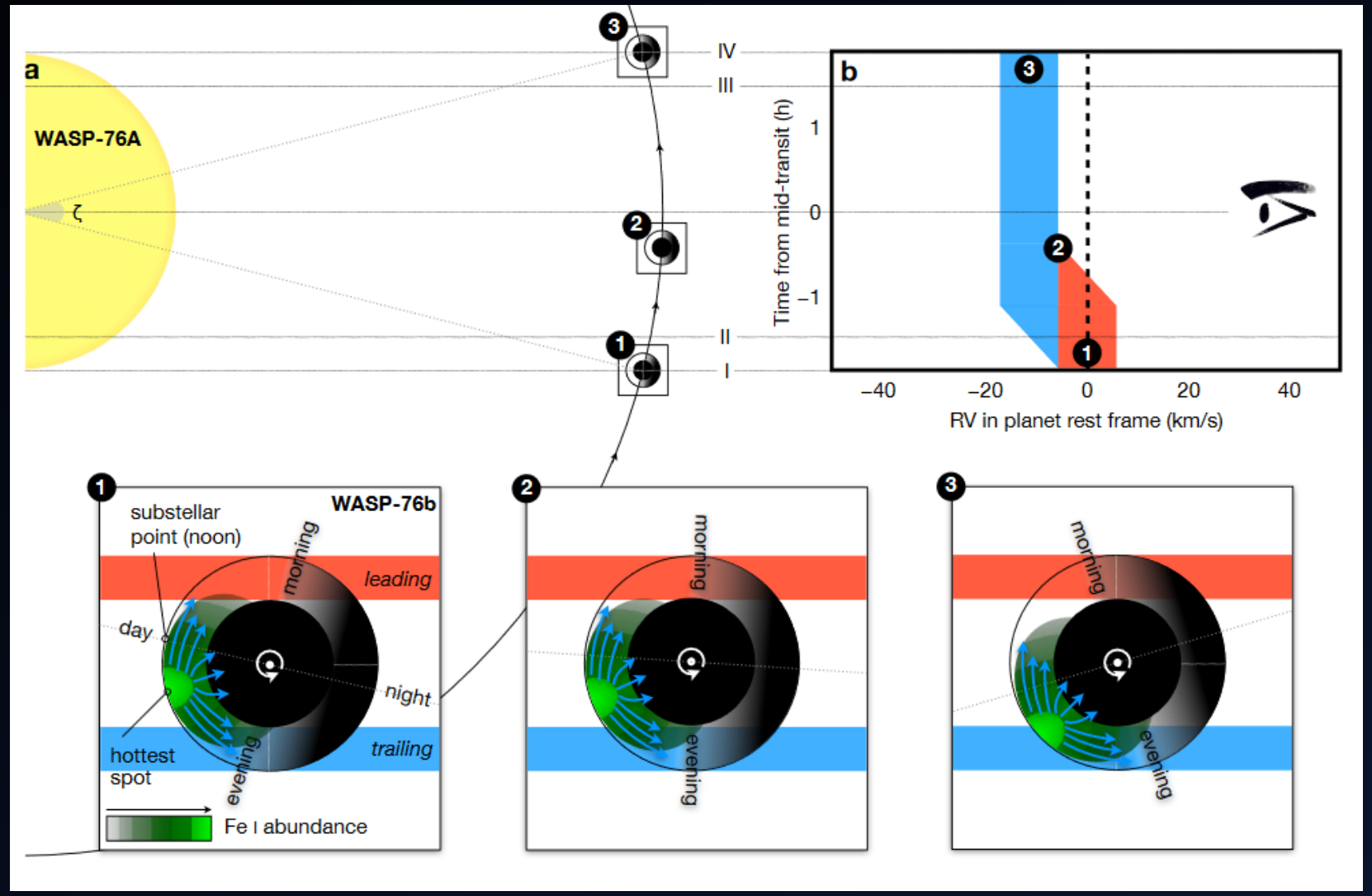
1407.4150

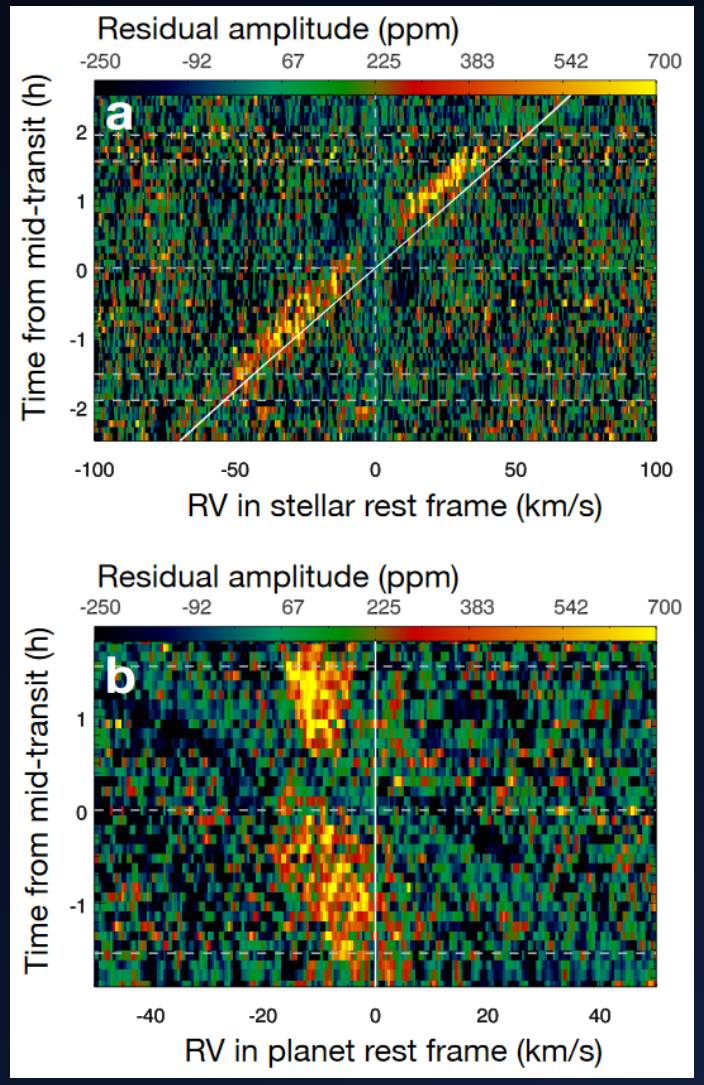
Сдвиг самой горячей точки от положения точки полдня



2003.14311

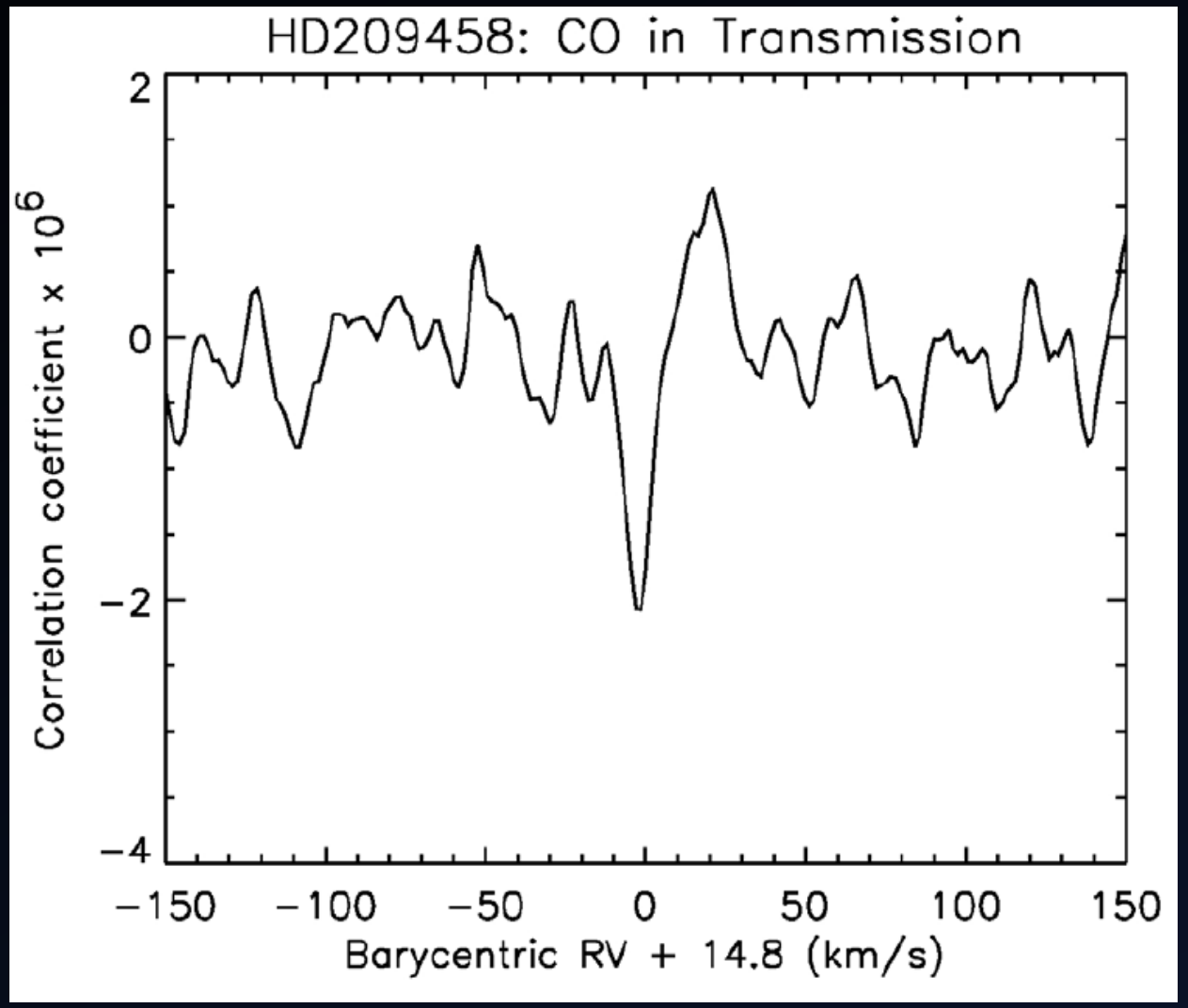
Конденсат железа на ночной стороне





2003.05528

Ветер на HD 209458



Transmission spectral data.

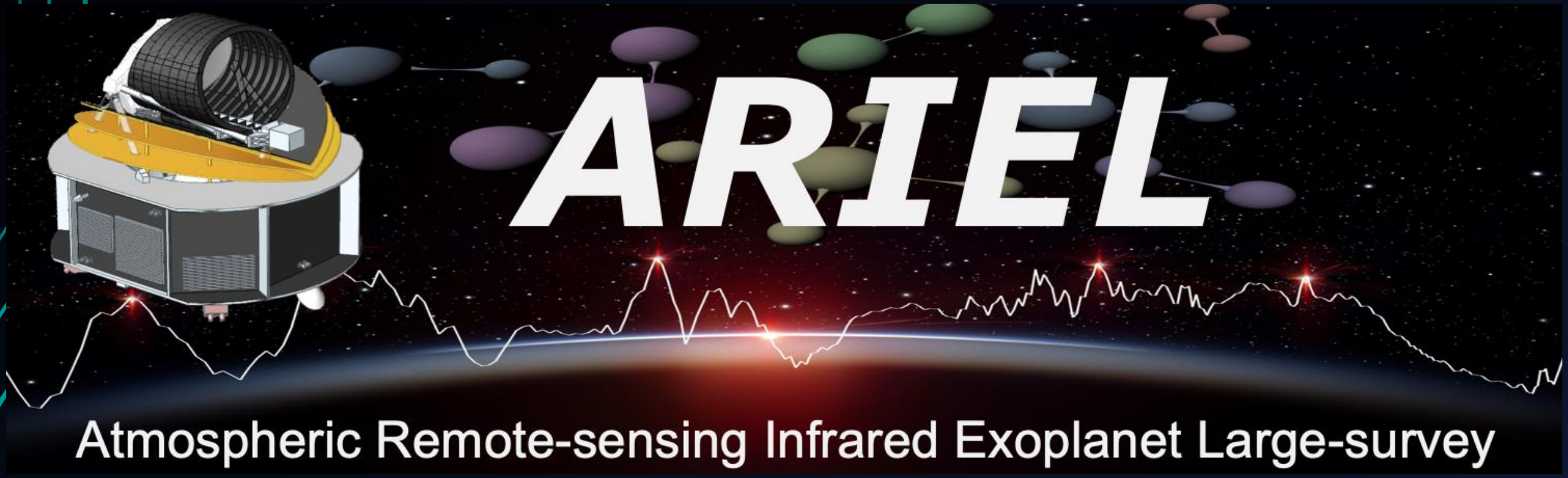
Wind velocity can be directly measured.

The planet is a VERY hot Jupiter.

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

1006.4364

Ariel

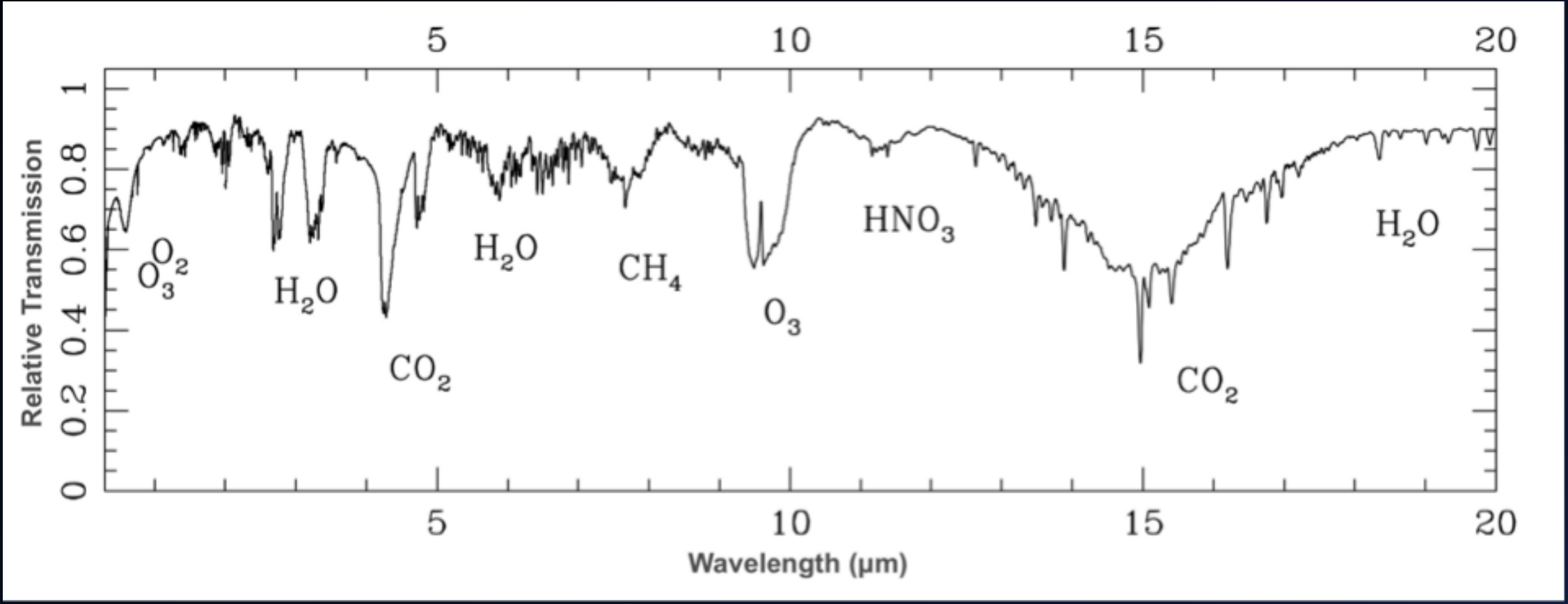


~1-meter telescope. ~2030 launch. ~1000 exoplanets to study.

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

Биомаркеры

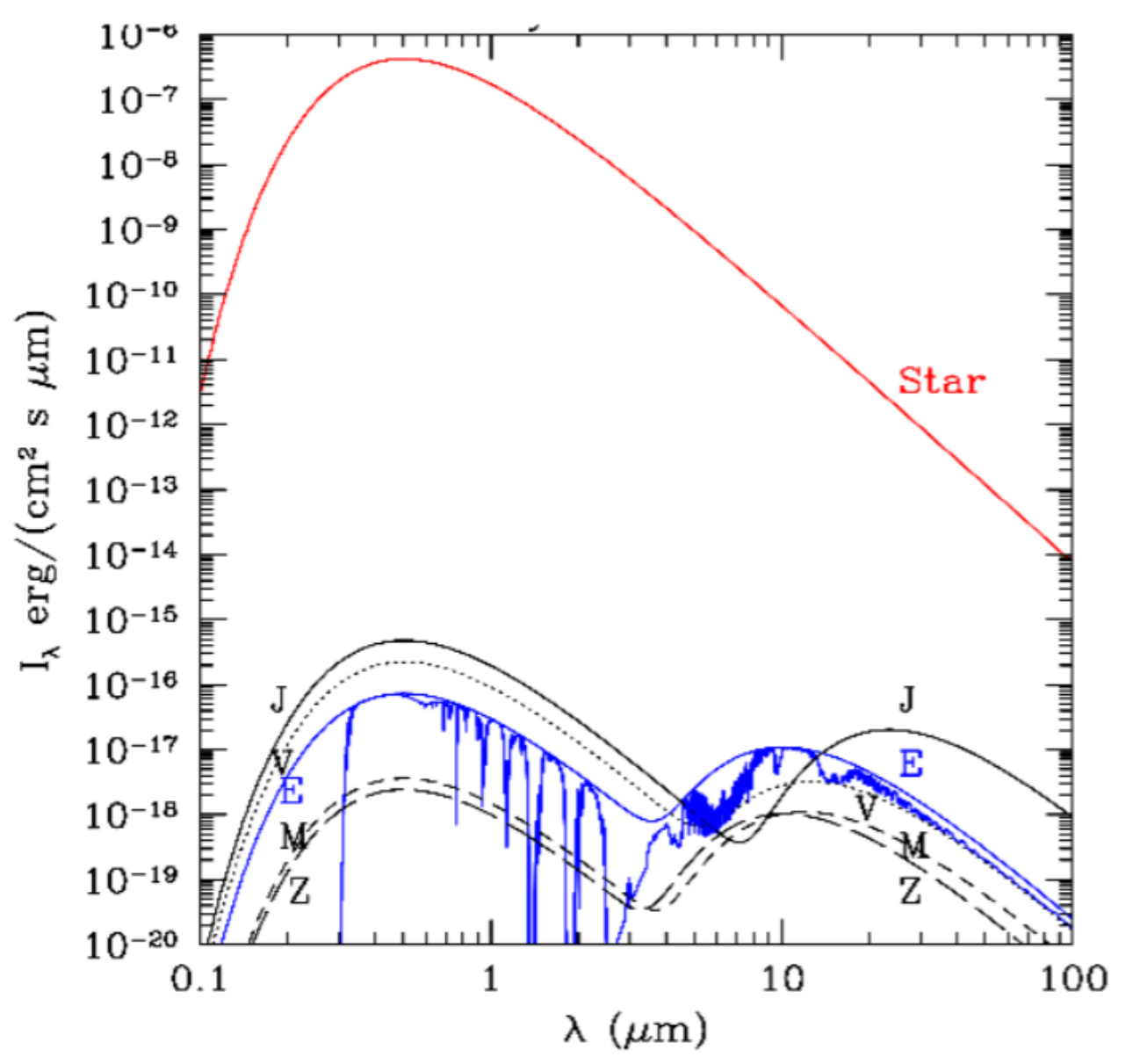
Спектр Земли с указанными биомаркерами:
-кислород,
-озон,
-углекислый газ,
-метан,
-вода



Kaltenegger, Traub (2009)

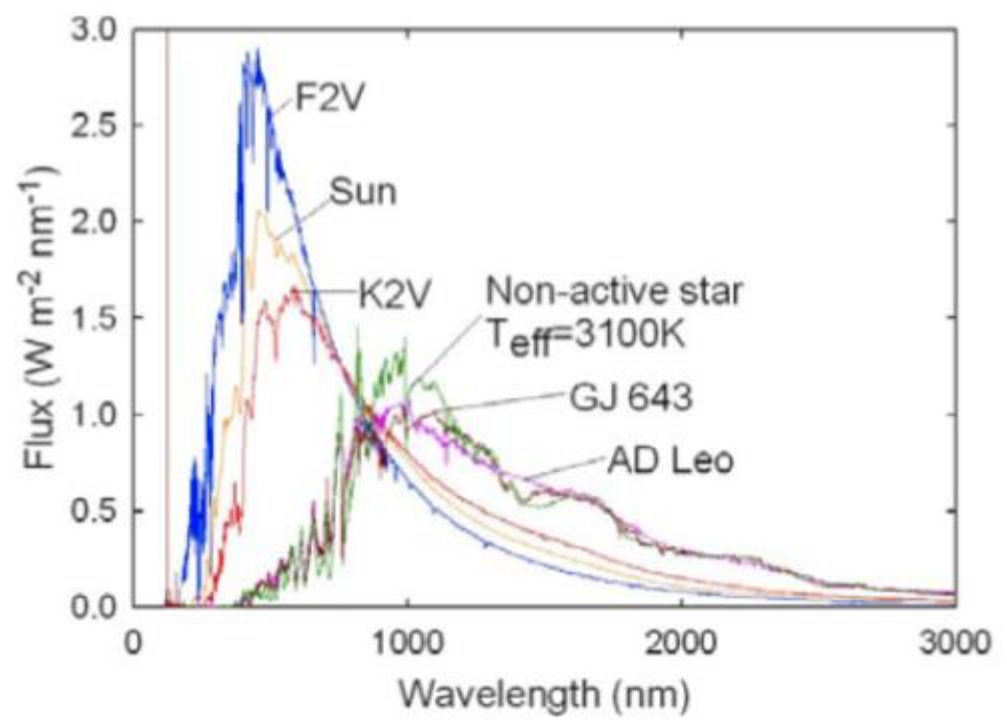
Кислород на Земле

Солнце и планеты



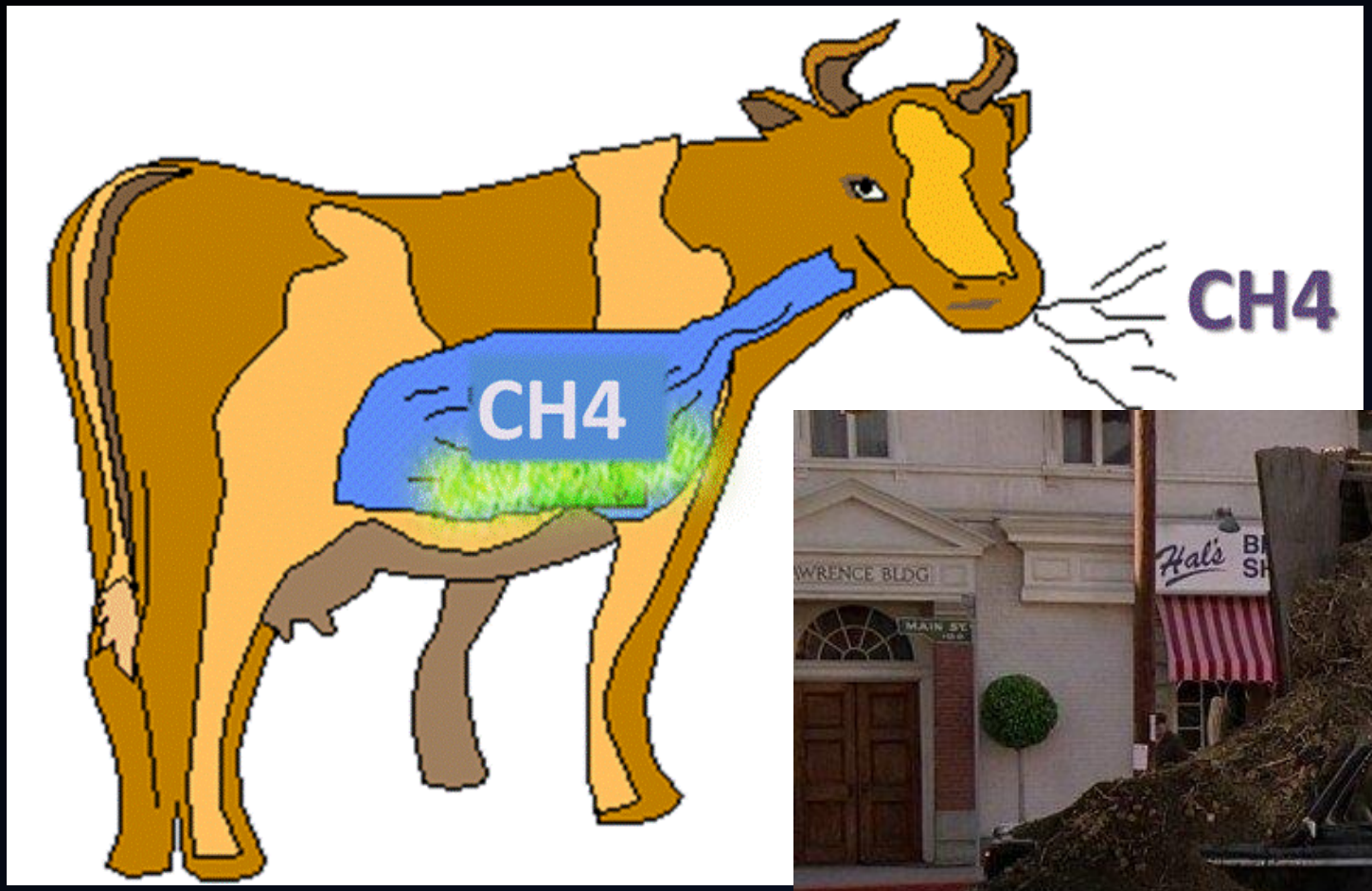
Выделение спектра планеты на фоне излучения звезды является трудной задачей.

Спектры звезд различаются.

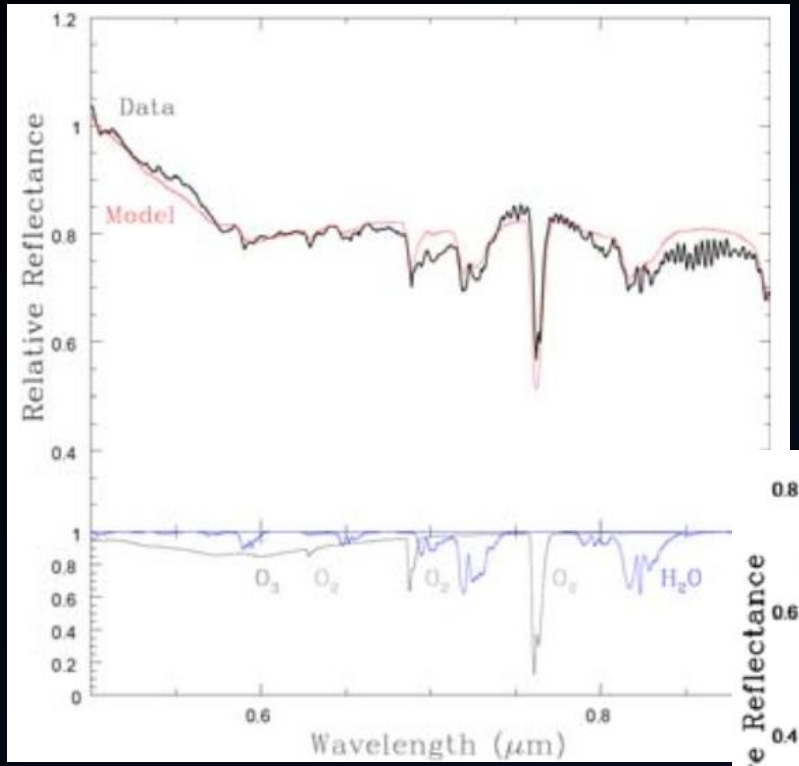


0906.2263

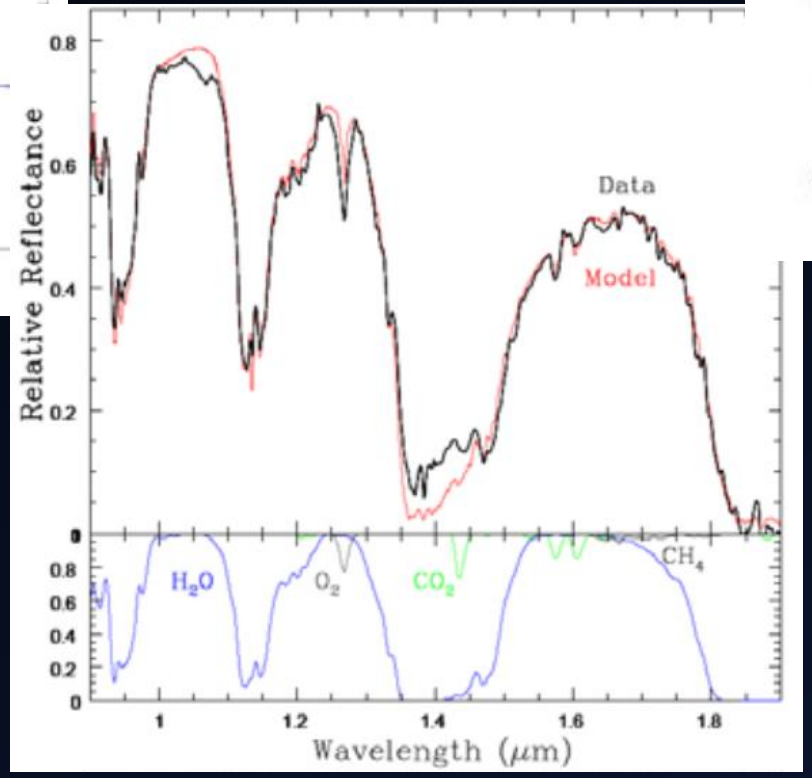
Происхождение метана на Земле

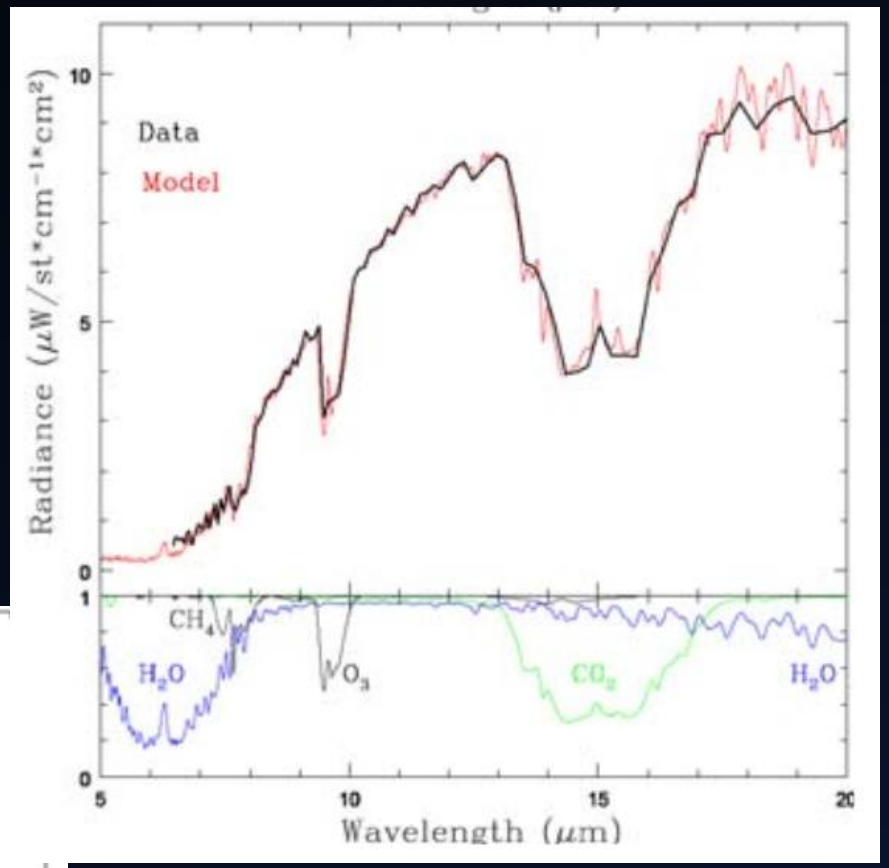


Спектр Земли



0906.2263

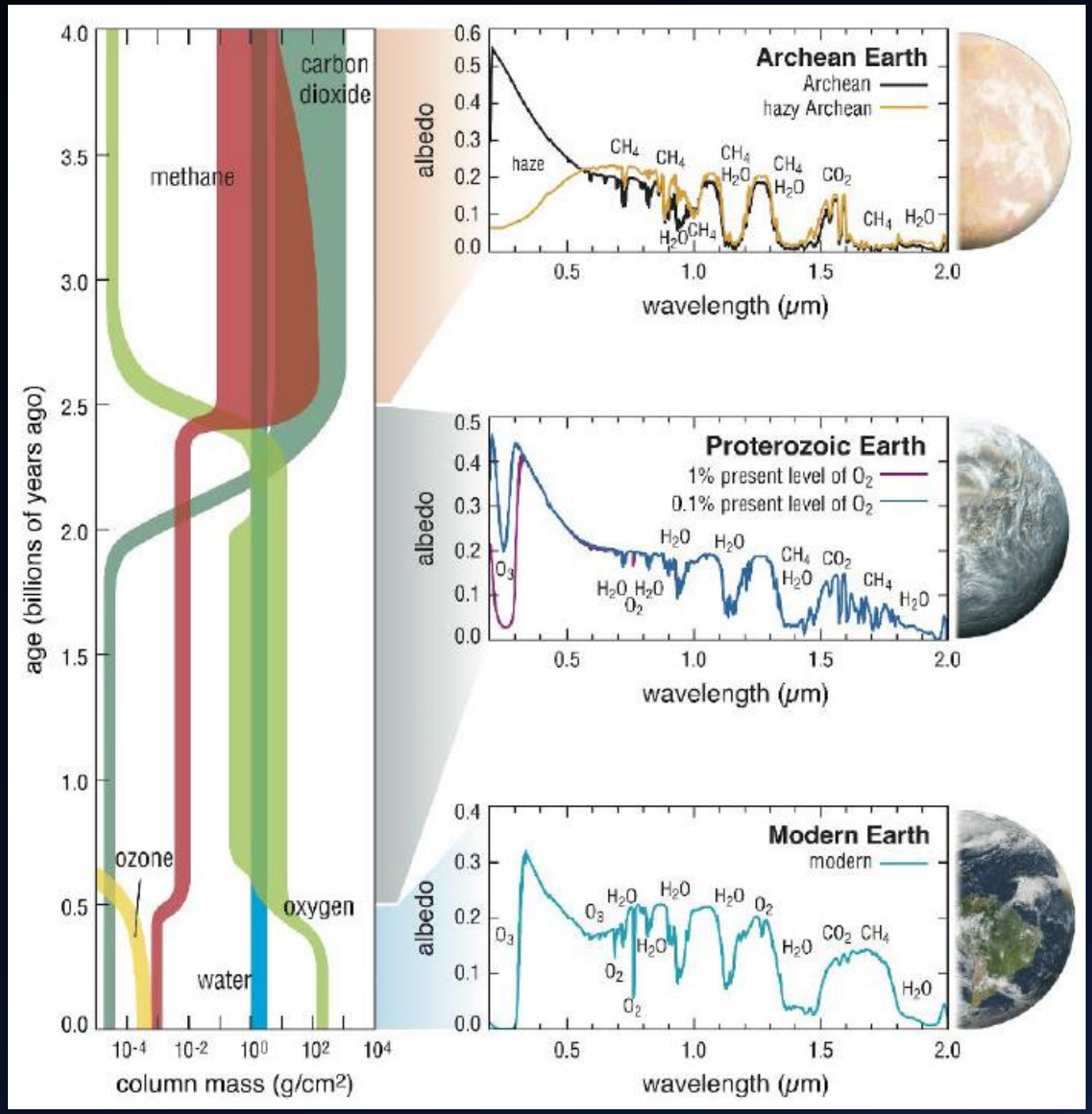




Спектр Земли в разные эпохи

В течение эволюции Земли состав атмосферы существенно изменялся.

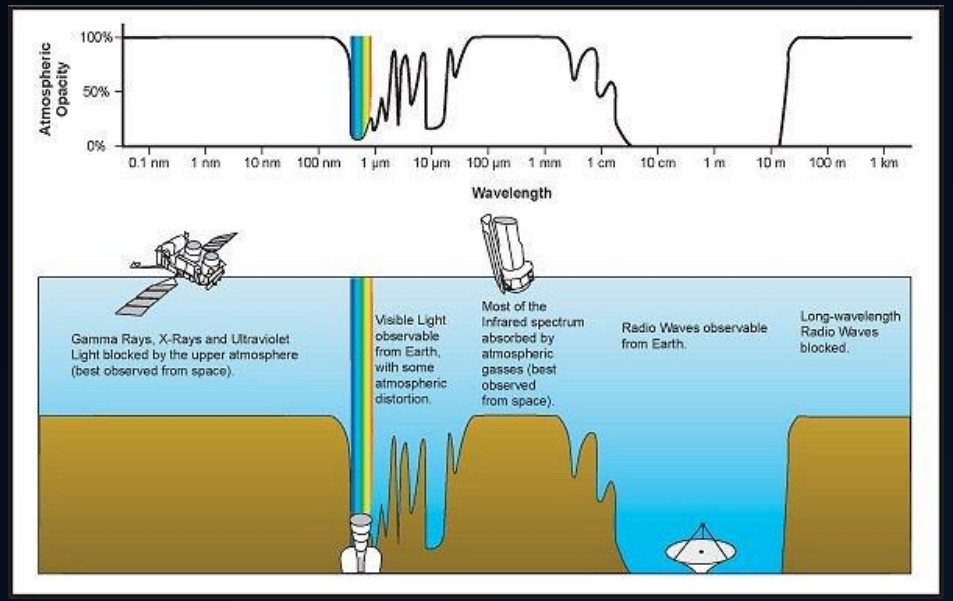
Соответственно, спектры потенциально обитаемых планет могут быть похожи не на современный земной, а на спектры в прошлые эпохи.

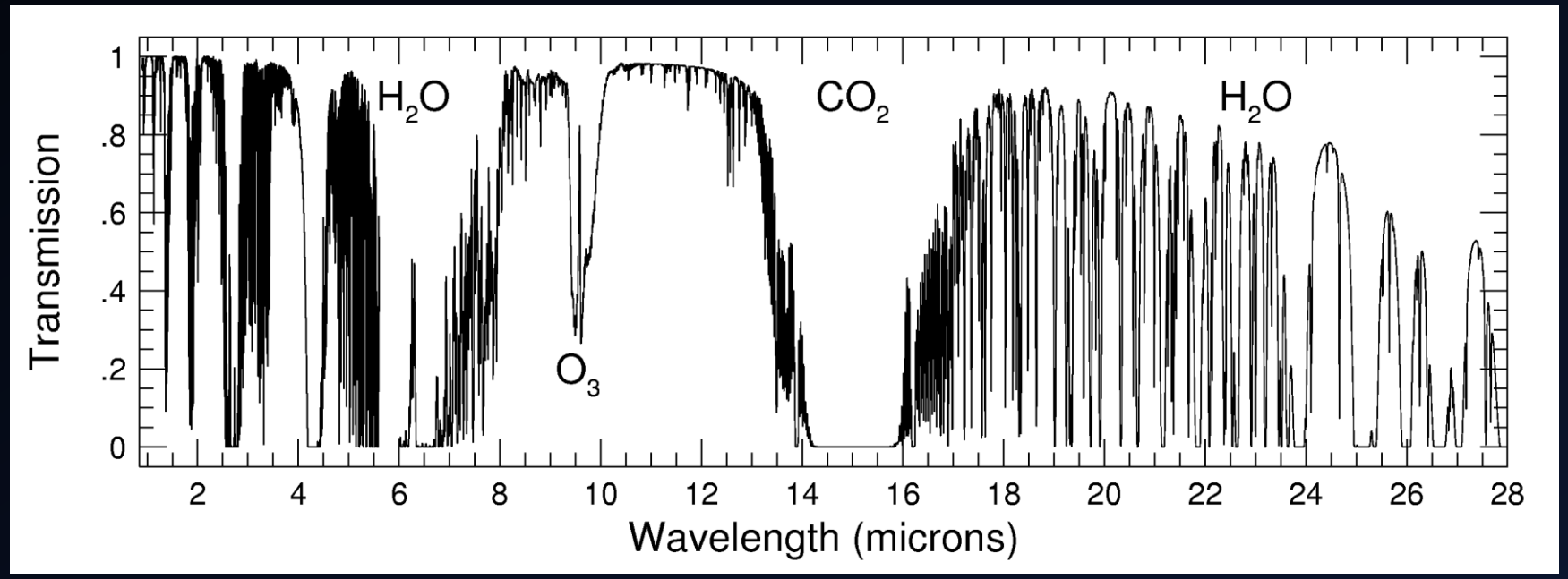


Decadal survey 2021

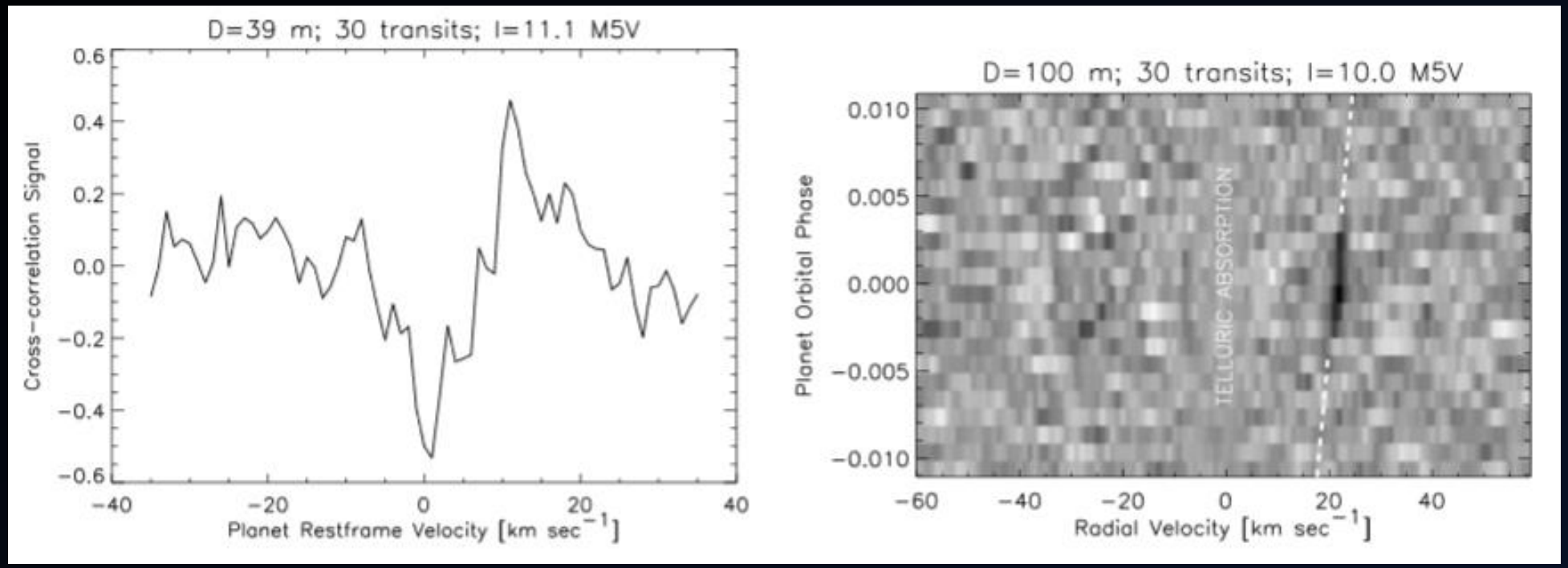
Прозрачность и яркость атмосферы Земли

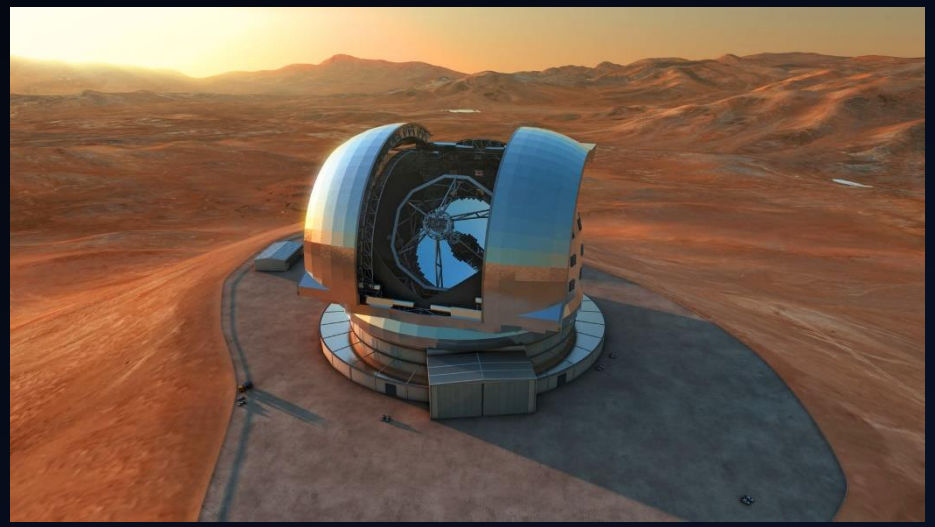
На длинах волн более 5 микрон атмосфера Земли мешает наблюдать. Поэтому воду, метан, озон и углекислый газ придется искать из космоса.
А вот кислород O_2 можно наблюдать и с Земли, если есть большие телескопы.





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.