

Урок 7. Солнечная система и поиск экзопланет

Астрономия · ~35 минут

Мы измерили Землю, Луну, Солнце и звёзды. Осталось собрать всё вместе — окинуть взглядом нашу Солнечную систему и сделать самый дерзкий шаг: заглянуть к **другим** звёздам и найти планеты у них. Ещё в 1990 году мы не знали ни одной планеты за пределами Солнечной системы. Сегодня их известно больше **пяти тысяч**. Причём почти все они не видны напрямую — их вычислили хитрыми методами. Разберём эти методы в финальном уроке.

Что ты узнаешь

- Чем планеты земной группы отличаются от газовых гигантов.
- Как ловят экзопланеты транзитным методом (по падению яркости).
- Как метод лучевых скоростей выдаёт планету по «покачиванию» звезды.
- Соберёшь весь курс в итоговых задачах.

Разбираемся в теме

Две семьи планет

Планеты Солнечной системы делятся на две непохожие группы.

Планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс): маленькие, каменные, плотные, близко к Солнцу, мало спутников или совсем нет.

Газовые гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун): огромные, состоят в основном из газа (водород, гелий) и льдов, далеко от Солнца, много спутников и кольца.

Планета	Радиус (в земных)	Расстояние, а.е.	Период, лет	Группа
Меркурий	0,38	0,39	0,24	земная

Планета	Радиус (в земных)	Расстояние, а.е.	Период, лет	Группа
Венера	0,95	0,72	0,62	земная
Земля	1,00	1,00	1,00	земная
Марс	0,53	1,52	1,88	земная
Юпитер	11,2	5,20	11,9	гигант
Сатурн	9,4	9,58	29,5	гигант
Уран	4,0	19,2	84	гигант
Нептун	3,9	30,1	165	гигант

💡 Проверь по 3-му закону Кеплера ($T^2 = a^3$): для Юпитера $a = 5,2$, $a^3 \approx 141$, $\sqrt{141} \approx 11,9$ года. Точно! Весь урок 5 работает и здесь.

🤔 **А знаешь ли ты?** Юпитер настолько массивнее остальных, что его масса больше суммы всех остальных планет в 2,5 раза. Но даже он в тысячу раз легче Солнца. Солнце — это 99,8% всей массы Солнечной системы.

Как найти планету у чужой звезды

Планета не светится сама, а рядом сияет звезда в миллиарды раз ярче. Разглядеть планету — всё равно что заметить комара рядом с прожектором за тысячи километров. Поэтому чаще ищут **косвенно** — по тому, как планета влияет на звезду.

Транзитный метод: планета затмевает звезду

Если орбита экзопланеты видна нам «с ребра», планета периодически проходит **перед** диском звезды (транзит) и чуть-чуть загораживает свет. Яркость звезды на время слегка падает — и снова возвращается. По регулярности провалов находят **период** обращения, а по глубине провала — **размер** планеты.



Насколько падает яркость? Планета закрывает долю диска звезды, равную отношению **площадей**: $\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{зв}}}\right)^2$. Например, Юпитер ($R \approx 0,1 R_{\odot}$) закрыл бы $(0,1)^2 = 0,01 = 1\%$ солнечного диска. Земля — всего $(R_{\oplus}/R_{\odot})^2 \approx (1/109)^2 \approx 0,0008\%$. Ловить такие крошечные провалы умеют космические телескопы (Kepler, TESS).

Запомни: глубина транзита = квадрат отношения радиусов планеты и звезды. Большие планеты у маленьких звёзд заметить легче всего.

Метод лучевых скоростей: звезда покачивается

Тяготение взаимно (урок 5): не только звезда держит планету, но и планета **тянет звезду**. Оба тела кружат вокруг общего центра масс, и звезда описывает маленький кружок — слегка «покачивается».

Это покачивание не видно глазом, но заметно по спектру: когда звезда чуть движется **к нам** — линии смещаются к синему, **от нас** — к красному (эффект Доплера из урока 6!). Периодическое дрожание линий выдаёт невидимую планету, а по величине сдвига оценивают её **массу**.


💡 Именно так в 1995 году Мишель Майор и Дидье Кело нашли первую планету у солнцеподобной звезды — 51 Пегаса b. В 2019-м за это дали Нобелевскую премию по физике.

⚠️ Оба метода лучше всего замечают **большие и близкие** к звезде планеты: они и звезду сильнее раскачивают, и транзиты у них глубже и чаще. Поэтому

первыми открыли «горячие юпитеры» — гиганты на тесных орбитах. Маленькие землеподобные планеты искать труднее.

Два метода дополняют друг друга

- Транзит даёт **размер** планеты (по глубине провала).
- Лучевые скорости дают **массу** (по амплитуде покачивания).
- Вместе — **плотность**, а значит, ответ: каменная планета или газовая? Есть ли шанс на твёрдую поверхность и воду?

 **Запомни:** ни один метод сам по себе не даёт полной картины. Наука о планетах — это сложение улик из разных наблюдений, как весь наш курс: каждый метод меряет своё, а вместе они рисуют устройство Вселенной.

Разбор примера

Задача. У звезды радиусом R_{\odot} проходит транзит планеты, и яркость падает на 1%. Оцени радиус планеты (в радиусах Юпитера, если $R_{\text{Юп}} \approx 0,1 R_{\odot}$).

Решение. Глубина транзита: $\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{зв}}}\right)^2 = 0,01$. Извлекаем корень: $\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{зв}}} = \sqrt{0,01} = 0,1$. Значит, радиус планеты $\approx 0,1 R_{\odot}$, то есть примерно **один радиус Юпитера**. Это типичный «горячий юпитер». Обрати внимание: падение яркости всего в 1% уже соответствует планете-гиганту — вот почему нужны очень точные приборы.

Задачи

1. Раздели планеты на две группы и назови по 3 отличия земной группы от газовых гигантов.
2. По 3-му закону Кеплера ($T^2 = a^3$) проверь период Сатурна ($a = 9,58$ а.е.) и Нептуна ($a = 30,1$ а.е.). Сравни с таблицей урока.

3. Экзопланета размером с Землю ($R \approx 0,009 R_{\odot}$) проходит перед звездой размером с Солнце. На сколько процентов упадёт яркость? Почему такие транзиты трудно ловить?
4. Транзит планеты у звезды даёт падение яркости 4%. Радиус звезды равен R_{\odot} . Оцени радиус планеты в радиусах Юпитера ($R_{\text{Юп}} \approx 0,1 R_{\odot}$).
5. Планета вызывает транзиты каждые 3,5 суток. Оцени по 3-му закону Кеплера радиус её орбиты в а.е. (считай, что звезда как Солнце: $T^2 = a^3$, T в годах). Ближе или дальше Меркурия она к своей звезде?
6. Объясни своими словами, почему метод лучевых скоростей использует эффект Доплера. Что именно «дрожит» в спектре звезды?
7. **Итог курса.** Расставь по возрастанию расстояния (в метрах, порядком величины): радиус Земли, до Луны, до Солнца, до ближайшей звезды, поперечник Галактики. Для каждого назови метод, которым его измерили в этом курсе.
8. **Итог курса.** Ты нашёл(нашла) экзопланету: транзит даёт радиус 1,2 радиуса Юпитера, лучевые скорости — массу примерно как у Юпитера. Плотность будет больше или меньше юпитерианской? Что это подсказывает о составе планеты? (Плотность \sim масса / объём, объём $\sim R^3$.)