

# Планеты и экзопланеты

**Роза М. Рос, Ханс Диг**

Международный Астрономический Союз, Технический университет Каталонии (Испания), Институт астрофизики Канарских островов и Университет Ла-Лагуны (Испания)

## Аннотация

Этот семинар представляет собой серию занятий для сравнения многих наблюдаемых свойств (таких как размер, расстояния, орбитальные скорости и скорости убегания) планет в нашей Солнечной Системе. Каждый раздел предоставляет контекст для различных таблиц планетарных данных, предоставляя демонстрации или расчеты для сравнения свойств планет, давая студентам конкретное представление о том, что означают эти данные.

В настоящее время для поиска экзопланет используется несколько методов, более или менее косвенных. Удалось обнаружить почти 4000 планет и около 500 систем с несколькими планетами.

## Цели

- Понять, что означают числовые значения в сводной таблице данных Солнечной системы.
- Понять основные характеристики внесолнечных планетных систем путем сравнения их свойств с орбитальной системой Юпитера и его галилеевых спутников.

## Солнечная Система

Создавая масштабные модели Солнечной Системы, ученики будут сравнивать различные параметры планет. Для выполнения этих активностей мы будем использовать данные Таблицы 1.

Планеты	Диаметр (км)	Расстояние до Солнца (км)
Солнце	1 392 000	-
Меркурий	4 878	$57.9 \cdot 10^6$
Венера	12 180	$108.3 \cdot 10^6$
Земля	12 756	$149.7 \cdot 10^6$
Марс	6 760	$228.1 \cdot 10^6$
Юпитер	142 800	$778.7 \cdot 10^6$
Сатурн	120 000	$1 430.1 \cdot 10^6$
Уран	50 000	$2 876.5 \cdot 10^6$
Нептун	49 000	$4 506.6 \cdot 10^6$

Таблица 1: Данные о телах Солнечной Системы

Во всех случаях главная цель модели - сделать данные понятными. Миллионы километров - это не те расстояния, которые легко охватить. Однако, если перевести их на масштабированные расстояния и размеры, учащиеся обычно находят их более легкими для понимания.

## Модели Солнечной Системы

### Занятие 1: Модели диаметров

Используя большой кусок (или несколько кусков, если необходимо) желтой бумаги, вырежьте круг, представляющий Солнце. Солнце масштабируется на 139 см в диаметре, так что 1 см составляет 10 000 км. Вырежьте разные планеты из простого картона или цветного картона и нарисуйте их морфологические характеристики. Располагая планеты вблизи солнечного диска, учащиеся могут охватить различные планетарные масштабы.

При масштабе 1 см на 10 000 км используйте следующие диаметры планет: Солнце 139 см, Меркурий 0,5 см, Венера 1,2 см, Земля 1,3 см, Марс 0,7 см, Юпитер 14,3 см, Сатурн 12,0 см, Уран 5,0 см и Нептун 4,9 см.

Предложение: Также можно завершить предыдущую модель, нарисовав планеты на футболке, сохраняя масштаб планет, но рисуя только часть солнца.



Рис. 1 и 2: Примеры футболок, с сравнением масштаба солнечного и планетарного диаметров.

### Занятие 2: Модель расстояний

Сравнивая расстояния между планетами и Солнцем, мы можем создать другую модель, которую легко установить в любом школьном коридоре. Сначала просто отрежьте полоски картона шириной 10 см, соединив их так, чтобы получилась длинная полоса в

несколько метров (рисунок 3). Затем поместите вырезки планет на нем на их правильных расстояниях. Напомните ученикам, что расстояние между планетами не в одном масштабе с диаметрами. В предложенном масштабе планеты были бы в тысячу раз меньше, так как здесь мы используем 1 см на 10 000 000 км, в то время как в первой активности выше мы использовали 1 см на 10 000 км. Если использовать шкалу 1 см на 10 миллионов км, то масштабируемые расстояния будут следующими: Меркурий 6 см, Венера 11 см, Земля 15 см, Марс 23 см, Юпитер 78 см, Сатурн 143 см, Уран 288 см и Нептун 450 см.



Рис. 3: Модель расстояний.

Предложение: Забавная вариация этой модели заключается в использовании каждого листа рулона туалетной бумаги для масштабирования. Например, вы можете взять в качестве масштаба кусок бумаги на каждые 20 миллионов километров.

### Занятие 3: Модель диаметров и расстояний

Следующая задача состоит в том, чтобы объединить две вышеупомянутых активности и создать модель, представляющую тела, а также соответствующие расстояния между ними в общем масштабе. На самом деле не так легко определить масштаб, который позволит нам представить планеты с объектами, которые не будут слишком малы и все еще будут иметь не слишком большие расстояния, ибо в этом случае размеры и расстояния не так легко усваиваются, и модель не будет полезна для учеников. В качестве предложения, возможно, будет хорошей идеей использовать школьный двор для создания модели и использовать мячи для планет, поскольку мячи различного диаметра доступны сколько нужно.



Рис. 4: Солнце и планеты модели диаметров и расстояний.

В качестве примера приведем возможное решение: на одном конце школьного двора мы ставим баскетбольный мяч диаметром около 25 см, который представляет собой Солнце. Меркурий будет представлять собой головку иглы (диаметром 1 мм), расположенную в 10 м от Солнца. Головка чуть большей иглы (2 мм в диаметре) будет представлять Венеру на расстоянии 19 м от Солнца, в то время как Земля будет головкой другой иглы, подобной предыдущей (2 мм) на расстоянии 27 м от Солнца. Марс представляет собой немного меньшую игольчатую головку (1 мм), расположенную в 41 м от Солнца. Обычно школьный двор на этом заканчивается, если не раньше. Мы должны будем поместить следующие планеты в других местах за пределами школьного двора, но на ориентирах рядом со школой, чтобы ученики были знакомы с расстояниями. Шарик для пинг-понга (диаметр 2,5 см) соответствует Юпитеру на расстоянии 140 м от Солнца. Еще один шарик для пинг-понга (2 см в диаметре) будет Сатурном на расстоянии 250 м от Солнца, стеклянный шарик (1 см в диаметре) будет представлять Уран на расстоянии 500 м от Солнца, а последний шарик (1 см), расположенный на расстоянии 800 м, будет представлять Нептун.

Следует подчеркнуть, что эта планетная система не вписывается ни в одну школу. Однако, если бы мы сократили расстояния, планеты были бы меньше, чем головка иглы, и их было бы почти невозможно визуализировать. В качестве последнего задания вы можете рассчитать, какой масштаб был использован для разработки этой модели.

## Занятие 4: Модель на карте города

Идея проста - с помощью карты города определить положение различных планет, предполагая, что Солнце расположено у входа в школу. В качестве примера приведем карту Барселоны с различными объектами (в частности, фруктами и овощами), которые будут располагаться на разных улицах, чтобы вы могли лучше представить себе их размеры. В качестве упражнения мы предлагаем вам проделать то же самое с вашим собственным городом.

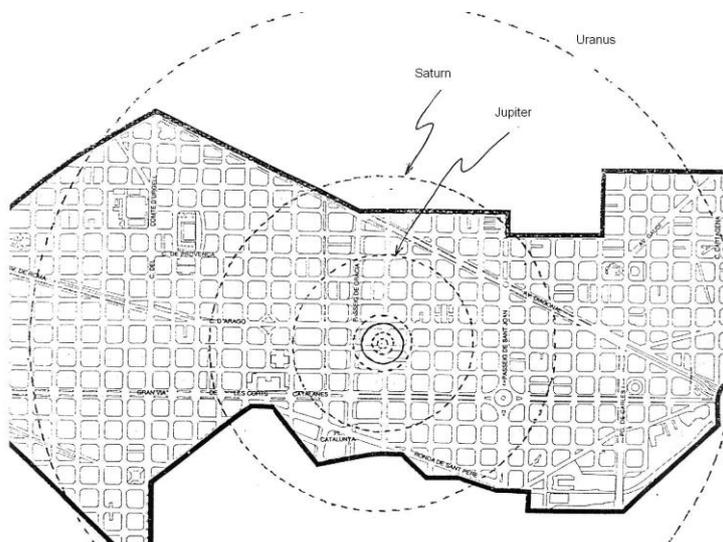


Рис. 5: Карта “Энсанче-де-Барселона” с некоторыми планетами.

Используя карту, показанную здесь, Меркурий был бы икринкой, Венера и Земля - парой горошин, Марс - горошком перца, Юпитер - апельсином, Сатурн - мандарином, а Уран и Нептун - парой грецких орехов. Для Солнца, поскольку нет достаточно большого овоща, учащиеся должны представить себе сферу размером примерно с посудомоечную машину. Инструктор может сделать то же самое действие, используя свой собственный город.



Рис. 6а и 6б: Снимки города Мец.

В городе Мец (Франция) есть Солнечная система, раскинувшаяся на его улицах и площадях, с соответствующими планетами, сопровождаемыми информационными панелями для тех, кто проходит мимо.

## Занятие 5: Модели световых расстояний

В астрономии принято использовать световой год как единицу измерения, которую часто путают с измерением времени. Эту концепцию можно проиллюстрировать с помощью модели Солнечной Системы. Поскольку скорость света  $c = 300\,000$  км/с, то расстояние, соответствующее 1 секунде, равно 300 000 км. Например, для путешествия от Луны до Земли, которые разделены расстоянием 384 000 км, свету требуется  $384\,000/300\,000 = 1,3$  секунды.

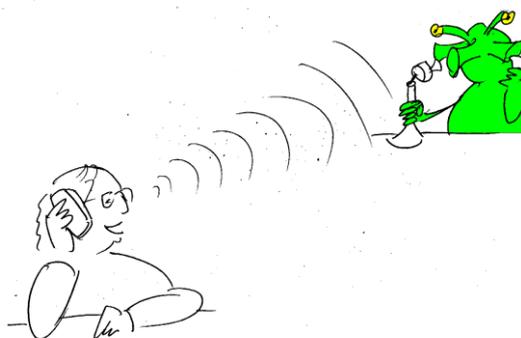


Рис. 7: Другой пример.

Используя эти единицы измерения, мы научим учеников вычислять время, необходимое для того, чтобы солнечный свет достиг каждой из планет Солнечной Системы. (Для инструктора, необходимые времена: время, необходимое солнечному свету для достижения Меркурия - 3,3 минуты, для Венеры - 6,0 минуты, для Земли - 8,3 минуты, для Марса - 12,7 минуты, для Юпитера - 43,2 минуты, для Сатурна - 1,32 часа, для Урана - 2,66 часа и для Нептуна - 4,16 часа. Вы можете попросить студентов представить себе, что будет представлять собой видеоконференция между Солнцем и любой из планет.

Мы вводим здесь также расстояние до ближайшей звезды, потому что очень полезно визуализировать огромные расстояния до других звезд, что является причиной того, что так трудно обнаружить экзопланеты. Ближайшая к нам звезда Альфа Центавра находится на расстоянии 4,37 световых лет или  $4,13 \times 10^{13}$  км. Вы можете попросить учеников рассчитать расстояние до этой звезды в любой из моделей планетных систем, которые были упомянуты ранее. В “модели школьного двора”, с масштабом 1 см на 56000 км, звезда будет находиться на расстоянии 7 375 км!

## Занятие 6: Модель солнечного диска от каждой планеты

С планеты, например Земли, Солнце видно под углом  $\alpha$  (figure 8). Для очень небольших значений  $\alpha$ , мы берем  $\tan \alpha \approx \alpha$  (в радианах)

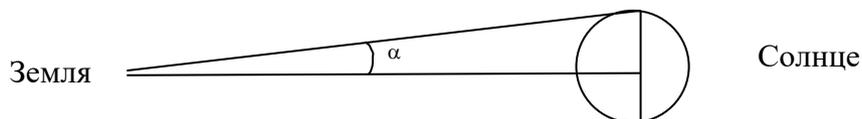


Рис. 8: С Земли, Солнце видно под углом  $\alpha$ .

Зная солнечный диаметр -  $1.4 \times 10^6$  км, т.е. радиус -  $0.7 \times 10^6$  км, и расстояние между Землей и Солнцем -  $150 \times 10^6$  км, мы выводим:

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{0,7 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6} = 0,0045 \text{ радиан}$$

И в градусах:

$$\frac{0,0045 \cdot 180}{\pi} = 0,255^\circ$$

То есть с Земли Солнце имеет размер  $2 \times 0,255 \approx 0,51^\circ$ , то есть около половины градуса. Повторяя тот же процесс для каждой планеты, мы получаем размеры Солнца в Таблице 2, и мы можем представить относительные размеры Солнца (рисунок 9).

Планеты	$2 \tan \alpha$	$2\alpha$ (°)	$2\alpha$ (°) пригл.
Меркурий	0.024	1.383	1.4
Венера	0.0129	0.743	0.7
Марс	0.006	0.352	0.4
Юпитер	0.0018	0.1031	0.1
Сатурн	0.000979	0.057	0.06
Уран	0.00048	0.02786	0.03
Нептун	0.0003	0.0178	0.02

Таблица 2: Размеры Солнца с разных планет.

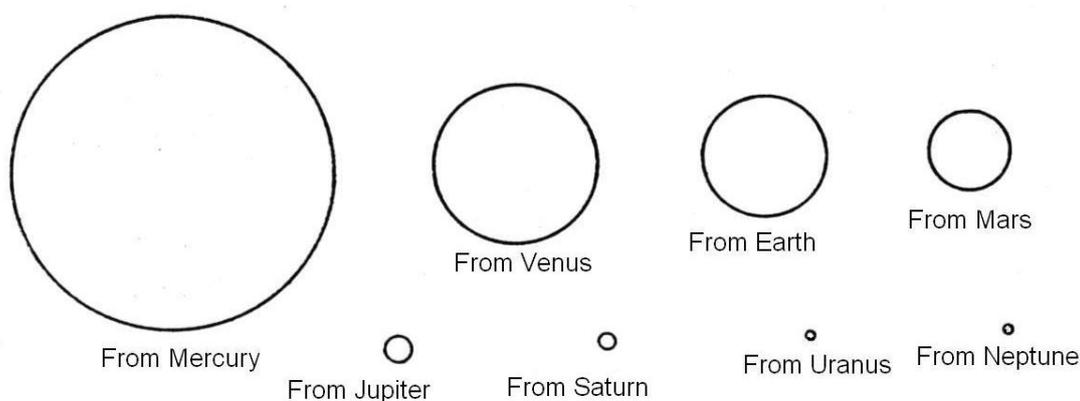


Рис. 9: Солнце видимое с каждой планеты: Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.

## Занятие 7: Модель плотностей

Цель этой модели состоит в том, чтобы отыскать образцы материалов, с которыми легко обращаться и которые имеют плотность, подобную каждому из тел Солнечной системы, чтобы иметь возможность "почувствовать это в наших руках."

	Плотность (г/см <sup>3</sup> )
Солнце	1.41
Меркурий	5.41
Венера	5.25
Земля	5.52
Луна	3.33
Марс	3.9
Юпитер	1.33
Сатурн	0.71
Уран	1.3
Нептун	1.7

Таблица 3: Плотности тел в Солнечной Системе



Рис. 10: Модель плотностей

Минералы	Плотность	Другие материалы	Плотность
Гипс	2.3	Глицерин	1.3
Ортоклаз	2.6	Пробка	0.24
Сера	1.1-2.2	Алюминий	2.7
Алит	2	Железо	7.86
Кварц	2.65	Цемент	2.7 – 3.1
Тетраборат натрия	1.7	Стекло	2.4 – 2.8
Сфалерит	4	Олово	7.3
Пирит	5.2	Глина	1.8 – 2.5
Эритроциты	5.4	Бакелит	1.25
Кальцит	2.7	Дуб	0.90
Галенит	7.5	Сосна	0.55

Таблица 4: Примеры плотностей некоторых материалов.

Из Таблицы 3 планетарных плотностей просто сравните с плотностями различных минералов (в каждой школе обычно есть коллекция минералов) или с образцами других материалов, которые легко найти, таких как стекло, керамика, дерево, пластик и т. д. В следующей Таблице 4 представлены некоторые примеры материалов и их плотности.

При использовании материалов, не включенных в таблицу 4, очень легко рассчитать его плотность. Просто возьмите часть этого материала, взвесьте его, чтобы найти его массу,  $m$ , и поместите его в емкость с водой, чтобы измерить его объем,  $V$ . Плотность  $d$  материала будет равна,

$$d = \frac{m}{V}$$

Ученики должны заметить, что Сатурн будет "плавать" в воде, потому что его плотность меньше 1.

## Занятие 8: Модель уплощения планет

Для визуализации деформации (сплющивания) газовых планет под действием центробежной силы, создаваемой их вращением, построим простую модель.

Как мы видим на рисунке 9, с помощью палки и нескольких картонных полосок мы можем построить эту простую модель, которая воспроизводит сплющивание планет Солнечной системы из-за вращения.

1. Отрежьте несколько картонных полосок размером 35 на 1 см.
2. Прикрепите оба конца картонных полосок к цилиндрической палочке длиной 50 см. Прикрепите верхние концы к палке так, чтобы они не могли двигаться, но позвольте нижним концам свободно двигаться вдоль палки.
3. Начните проворачивать палку, поместив ее между двух рук, а затем быстро вращая ее то в одном направлении, то в другом. Вы увидите, как центробежная сила деформирует картонные ленты (рисунок 11) точно так же, как она действует на планеты.



Рис. 11: Модель для имитации сплющивания из-за вращения.

## Занятие 9: Модель о планетарных орбитальных периодах

Планеты обращаются вокруг Солнца с различными скоростями и орбитальными периодами (таблица 5). Зная период и среднее расстояние от Солнца, можно вывести среднюю орбитальную скорость планеты для исследования ее орбиты. Рассмотрим, к примеру, Землю, но вы можете повторить тот же самый вывод для любой другой планеты.

Длина орбитального оборота  $L = 2\pi R$ , так что средняя орбитальная скорость  $v = L/T = 2\pi R/T$ . Для Земли, период - 365 дней, тогда  $v = 2,582,750$  км/день =  $107,740$  км/ч =  $29.9$  км/с, где расстояние от Земли до Солнца  $R = 150 \times 10^6$  км. Подчеркнем, что Солнце также вращается вокруг галактического центра со скоростью  $220$  км/с, или что то же самое около  $800,000$  км/ч.

Планета	Орбитальный период (дни)	Расстояние от Солнца (км)	Средняя орбитальная скорость (км/с)	Средняя орбитальная скорость (км/ч)
Меркурий	87.97	$57.9 \times 10^6$	47.90	172440
Венера	224.70	$108.3 \times 10^6$	35.02	126072
Земля	365.26	$149.7 \times 10^6$	29.78	107208
Марс	686.97	$228.1 \times 10^6$	24.08	86688
Юпитер	4331.57	$778.7 \times 10^6$	13.07	47052
Сатурн	10759.22	$1\,430.1 \times 10^6$	9.69	34884
Уран	30.799.10	$2\,876.5 \times 10^6$	6.81	24876
Нептун	60190.00	$4\,506.6 \times 10^6$	5.43	19558

Таблица 5: Орбитальные данные тел Солнечной системы.

Самый быстрый - Меркурий, самый близкий к солнцу, и самый медленный - Нептун, самый далекий. Римляне уже заметили, что Меркурий был самым быстрым из всех, и поэтому он был идентифицирован как посланник богов и представлен с крылатыми ногами. Орбитальный период или "год" на Меркурии длится всего 88 дней. Даже если наблюдать невооруженным глазом, в течение нескольких недель можно сказать, что Юпитер и Сатурн движутся гораздо медленнее по зодиакальным созвездиям, чем, например, Венера и Марс.

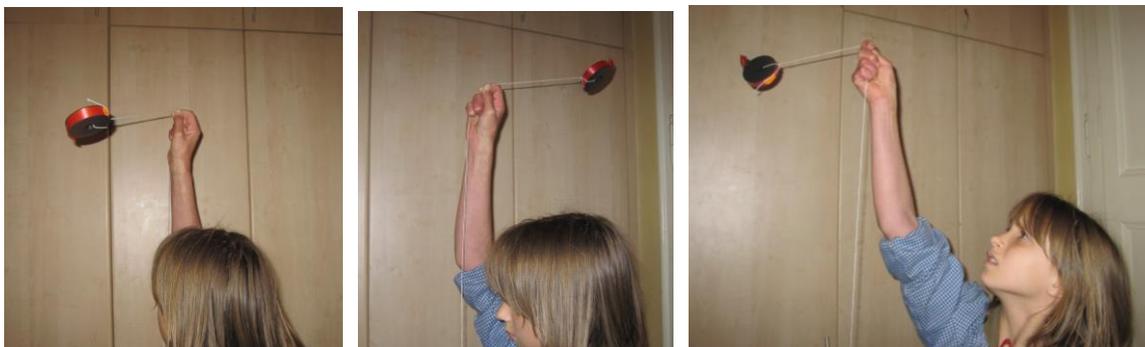


Рис. 12а, 12b и 12с: Симулирование кругового движения планет.

Существует также простой способ ощутить связь между расстоянием и орбитальным периодом.

Мы начинаем с того, что привязываем тяжелый предмет, например орех, к нитке. Держа нитку с конца, противоположного тяжелому предмету, мы вращаем предмет круговыми движениями над нашими головами. Затем мы можем заметить, что если мы отпускаем струну, когда мы вращаем ее (делая струну длиннее), объекту требуется больше времени, чтобы завершить орбитальный период. И наоборот, если мы втянем нить (сделав ее короче), потребуется меньше времени.

Затем мы можем разработать модель Солнечной системы с орехами и кусочками струн, пропорциональными по длине радиусам планетных орбит (опять же, предполагая, что все они движутся по круговым орбитам). Однако вместо того, чтобы вырезать

отдельный кусок для каждой планеты, отрежьте все куски длиной около 20 см. Затем, используя соответствующую шкалу, измерьте правильное расстояние от тяжелого объекта и сделайте узел в этой точке. Затем нитку можно удерживать в месте расположения узла, вращая тяжелый предмет.

Для использования модели, мы должны держать одну из ниток в месте расположения узла и поворачивать ее над нашими головами в плоскости, параллельной земле, с минимально возможной скоростью, которая удержит ее на орбите. Мы увидим, что объект нуждается в меньшем времени для полного вращения, когда радиус меньше.

### Модель поверхностных тяжестей

Формула для силы тяготения,  $F = G \frac{Mm}{d^2}$ , позволяет нам рассчитать поверхностную тяжесть  $g$  которая действует на поверхности планеты массой  $M$ . Рассматривая единицу массы ( $m = 1$ ) на поверхности планеты ( $d = R$ , радиус планеты), мы получаем поверхностную тяжесть  $g = \frac{GM}{R^2}$ , где  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ м}^3\text{кг}^{-1}\text{с}^{-2}$  – универсальная гравитационная постоянная. Если мы затем подставим массу планеты как  $M = 4/3\pi R^3 \rho$ , где  $\rho$  плотность планеты и  $R$  - радиус, мы находим:

$$g = 4/3\pi G\rho R$$

Подставляя эти последние две переменные в значения, приведенные в таблице 6 (после преобразования радиуса в метры и плотности в  $\text{кг}/\text{м}^3$ , при  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3 = 1 \text{ г}/\text{см}^3$ ), мы можем вычислить значение поверхностной тяжести  $g$  для всех планет.

Планета	R экваториальный радиус (км)	$\rho$ плотность ( $\text{г}/\text{см}^3$ )	$g$ поверхностная тяжесть ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ )
Луна	1738	3.3	1.62
Меркурий	2439	5.4	3.70
Венера	6052	5.3	8.87
Земля	6378	5.5	9.81
Марс	3397	3.9	3.71
Юпитер	71492	1.3	24.8
Сатурн	60268	0.7	8.96
Уран	25559	1.2	8.69
Нептун	25269	1.7	11.00

Таблица 6: Размер, плотность и поверхностная тяжесть тел Солнечной Системы.

Рассмотрим пару примеров:

$$g_{\text{меркурий}} = 4/3\pi G \cdot 2439 \times 10^3 \text{ м} \cdot 5400 \text{ кг}/\text{м}^3 = 3.7 \text{ м}/\text{с}^2,$$

$$g_{\text{венера}} = 4/3\pi G \cdot 6052 \times 10^3 \text{ м} \cdot 5300 \text{ кг}/\text{м}^3 = 8.9 \text{ м}/\text{с}^2.$$

Аналогично мы можем вычислить  $g$  для остальных планет. Как и в таблице 7,

поверхностные силы тяжести часто задаются относительно Земной и обозначаются буквой  $g$ .

## Занятие 10: Модель весов для ванной комнаты

В этом случае целью модели является разработка набора из 9 весов для ванной комнаты (8 планет и Луна), чтобы учащиеся могли имитировать взвешивание себя на каждой из планет и луны.

Поскольку этот процесс одинаков для каждой планеты, мы опишем только одну из них. Идея, по сути, состоит в том, чтобы открыть весы для ванной комнаты и заменить диск, помеченный весами, другим с весами, откалиброванными для конкретной планеты.

1. Во-первых, мы открываем весы. В большинстве весов есть две пружины, которые закрепляют основание. Помните, что мы должны снова собрать их вместе (рисунки 13а и 13б).
2. После открытия диск весов должен быть удален, либо заменен, либо перетянут соответствующими планетарными грузами.
3. В следующей таблице есть поверхностные силы тяжести Луны и различных планет Солнечной Системы. В одной колонке они перечислены в абсолютных значениях ( $m \cdot s^{-2}$ ), а в другой - в относительных значениях по отношению к земной гравитации. Эти значения мы будем использовать для преобразования единиц “земного” веса в пропорциональные единицы веса на других планетах.
4. Наконец, мы снова закрываем весы и теперь можем увидеть, сколько мы бы весили на одной из планет.

	$g$ поверхностная тяжесть ( $m \cdot s^{-2}$ )	$g$ поверхностная тяжесть (относительно Земли)
Луна	1.62	0.16
Меркурий	3.70	0.37
Венера	8.87	0.86
Земля	9.81	1.00
Марс	3.71	0.38
Юпитер	24.79	2.53
Сатурн	8.96	0.91
Уран	8.69	0.88
Нептун	11.00	1.12

Таблица 7: Абсолютная и относительная поверхностная гравитация тел Солнечной системы.

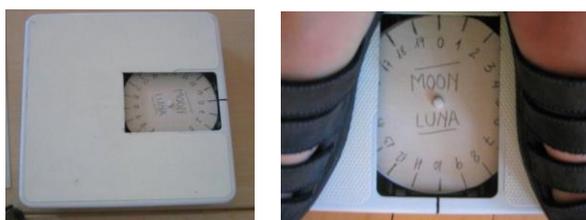


Рис. 13а и 13б: Весы для ванной комнаты с замененным диском.



Рис. 14: Модель Солнечной системы с весами для ванной комнаты.

## Занятие 11: Модели кратеров

Большинство кратеров в Солнечной системе не вулканические, а являются результатом падения метеороидов на поверхности планет и спутников.

1. Сначала, накройте пол старыми газетами, чтобы его не запачкать.
2. Положите 2-3 см слой муки в поднос, распределяя его с помощью ситечка/просеивателя так, чтобы поверхность была очень гладкой.
3. Положите слой какао-порошка в несколько миллиметров на муку с помощью ситечка/просеивателя (рисунок 15а).
4. С высоты 2 метров, сбросьте снаряд: столовую ложку какао-порошка. Падение оставит следы похожие на те которые имеют ударные кратеры (рисунок 15b).
5. Вы можете захотеть поэкспериментировать с изменением высоты, типа, формы, массы и т. д. снарядов. В некоторых случаях можно получить даже кратер с центральным пиком.



Рис. 15а: Симулирование кратеров.



Рис. 15b: Образовавшиеся кратеры.

## Скорости убегания

Скорость убегания зависит от формы гравитационного потенциала, в котором находится снаряд. Поэтому на поверхности небесного тела скорость убегания зависит только от высоты точки старта, и силы трения в атмосфере, если бы она присутствовала (так как в случае Земли). Скорость убегания не зависит от массы снаряда или направления его запуска, и ее вывод можно сделать в чисто энергетических терминах.

Чтобы рассчитать скорость убегания, следующие формулы используются связанные с потенциальной энергией и кинетической энергией:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad E_p = -G\frac{Mm}{R}$$

Рассматривая принцип сохранения энергии, если мы установим условие, что объект удаляется на бесконечное расстояние и остается в состоянии покоя, то получим:

$$\frac{1}{2}mv_e^2 - G\frac{Mm}{R} = 0$$

и соответственно скорость:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2gR}$$

где:  $v_e$  – скорость убегания,  $G$  – универсальная гравитационная постоянная ( $6.672 \times 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ ),  $M$  – масса звезды,  $m$  – масса снаряда,  $R$  – радиус звезды (в предположении сферической формы),  $g$  – гравитационное ускорение свободного падения на поверхности звезды. На Земле,  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ .

В качестве примера, мы рассчитаем скорости убегания некоторых планет. Для Земли,

$$v_{\text{Земли}} = \sqrt{2gR} = (2 \cdot 9.81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 6378 \times 10^3 \text{ м})^{1/2} = 11186 \text{ м/с} \approx 11.2 \text{ км/с}.$$

Сходно, для наименьшей планеты, Меркурия,

$$v_{\text{Меркурия}} = (2 \cdot 3.78 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 2439 \times 10^3 \text{ м})^{1/2} = 4294 \text{ м/с} \approx 4.3 \text{ км/с}.$$

И для наибольшей планеты, Юпитера,

$$v_{\text{Юпитера}} = (2 \cdot 23.1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 71492 \times 10^3 \text{ м})^{1/2} = 57471 \text{ м/с} \approx 57 \text{ км/с}.$$

Ясно, что ракету легче запустить с Меркурия, чем с Земли, но труднее всего запустить ракету на Юпитере, где скорость убегания составляет около 60 км/с.

(Чтобы иметь возможность сравнить результаты, принятые скорости убегания для каждого тела в Солнечной Системе следующие: Меркурий 4,3 км/с, Венера 10,3 км/с, Земля 11,2 км/с, Марс 5,0 км/с, Юпитер 59,5 км/с, Сатуре 35,6 км/с, Уран 21,2 км/с, Нептун 23,6 км/с. Как видим, наши несложные расчеты дают вполне приемлемые результаты.)

## Занятие 12: Модель ракеты с шипучей таблеткой

В качестве примера ракеты, которую можно безопасно запустить в классе, мы предлагаем следующую ракету, которая использует аспирин или шипучую таблетку в качестве топлива. Мы начинаем с вырезания модели ракеты на сплошных линиях и размещения на пунктирные линии, как на фотографии.

Мы будем использовать пластиковую капсулу, например, используемую для хранения таблеток или корма для рыб, убедившись, что капсула может поместиться внутри цилиндра ракеты. Затем мы помещаем три треугольника в качестве опор на корпус ракеты и, наконец, добавляем конус на верхнюю часть цилиндра (рисунки 16a, 16b, 16c, 16d, 17, 18, 19a, 19b, 19c)

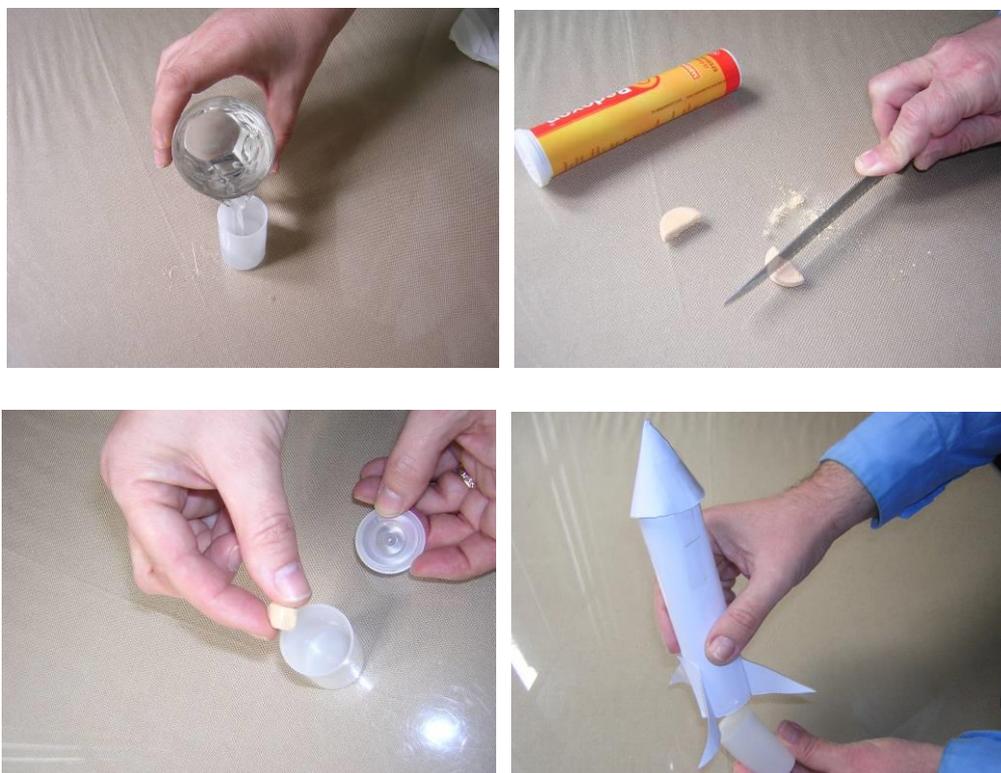


Рис. 16a, 16b, 16c и 16d: Процесс в четырех картинках.

Построив ракету, мы должны осуществить ее запуск. Для этого мы поместим воду в пластиковую капсулу, примерно до  $1/3$  ее высоты (около 1 см). Добавим  $1/4$  таблетки шипучего аспирина (или другой шипучей таблетки). Положите скотч и ракету над капсулой. Примерно через 1 минуту ракета взлетит. Очевидно, что мы можем повторять столько раз, сколько захотим (по крайней мере,  $3/4$  таблетки аспирина остается, так что наслаждайтесь запуском ракет!).

Также можно запускать ракеты с использованием бикарбоната и уксуса.

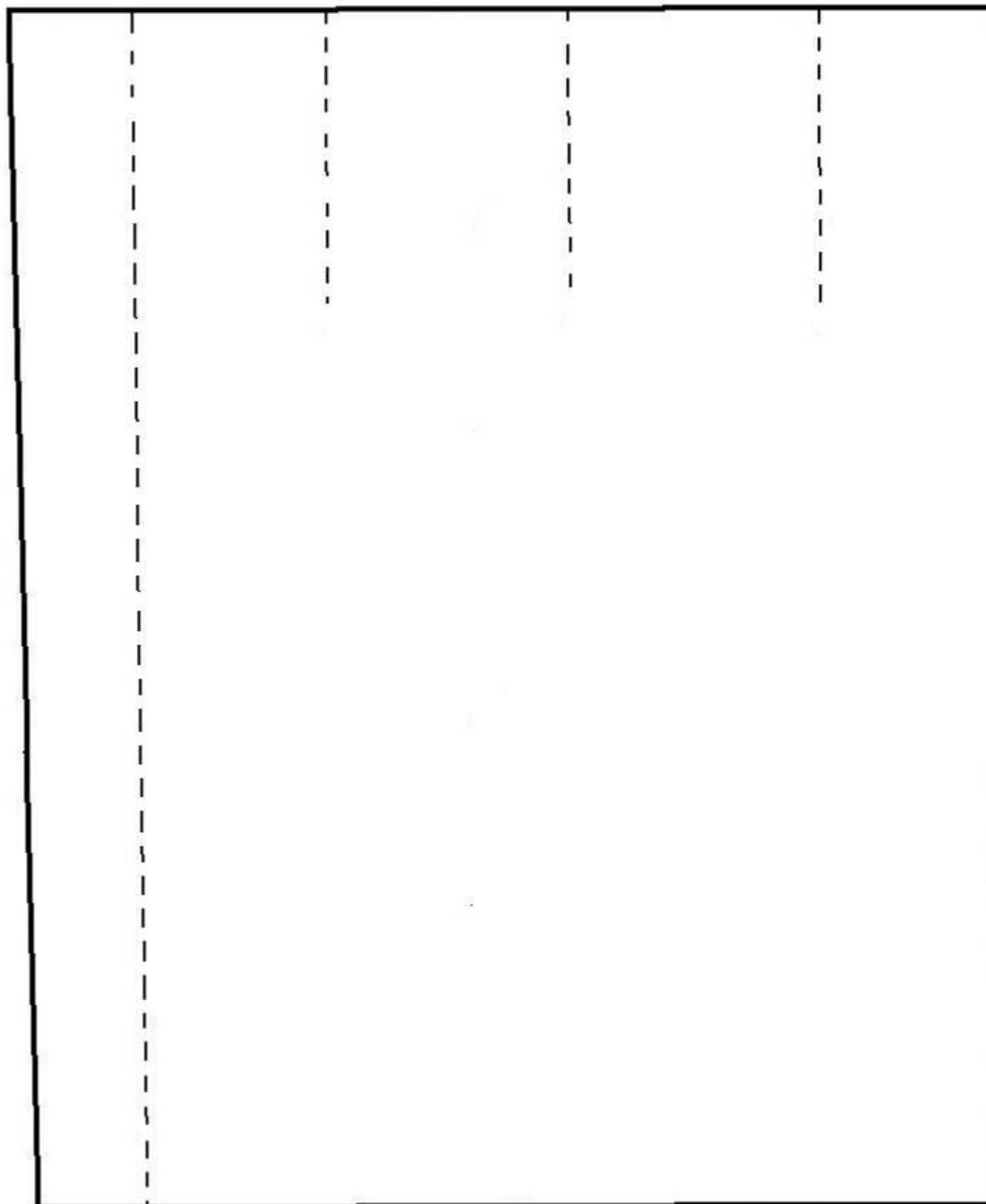


Рис. 19а: Тело ракеты. Вставьте плавники в пунктирную зону.

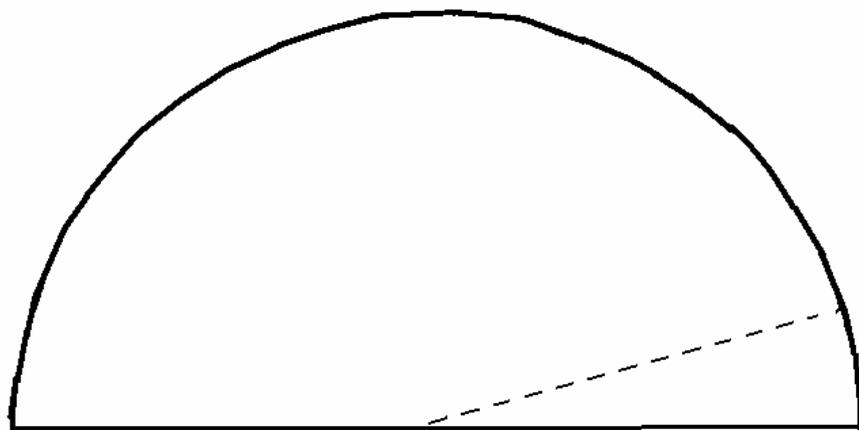


Рис. 19б: Верхний конус ракеты.

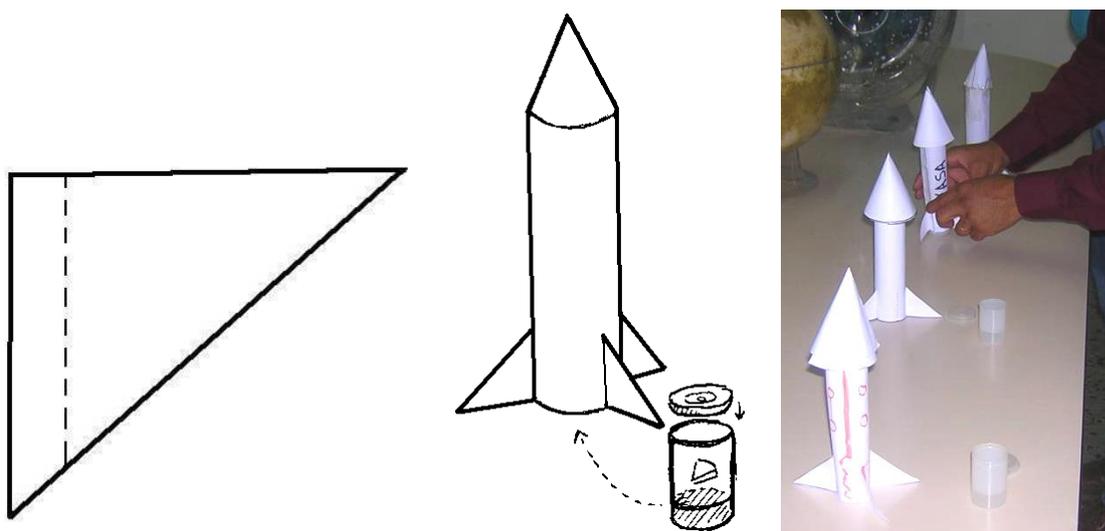


Рис. 19с: Модель для трех плавников. Рис. 18: Упрощенная схема Рис. 19: Некоторые ракеты.

## Экзопланеты

К настоящему времени астрономы обнаружили около 4000 планет и 500 различных планетных систем. Пример одной из первых планет, сфотографированных непосредственно, показан на рис. 20.

Темы этого семинара посвящены методам, которые позволили обнаружить экзопланеты. Некоторые из этих методов вполне доступны для понимания школьников. Исследование внесолнечных планет - быстроразвивающаяся область, и часть того, что написано далее, возможно, потребует обновить спустя время.

Рассмотрим пример из истории астрономии. В 1610 году Галилей впервые наблюдал за Сатурном. Он не понимал, что это планета, окруженная прекрасным кольцом. Вместо этого он интерпретирует его как звездное скопление с тремя компонентами. Лишь наблюдения Гюйгенса с помощью лучшего телескопа позволили убедиться, что Сатурн – это планета с кольцевой системой. В течение нескольких лет научное сообщество неверно истолковывало структуру Сатурна. Примером этого является картина Рубенса 1636-1638 годов, которая представляет Сатурн как три звезды, созданная после его недавнего открытия Галилеем.

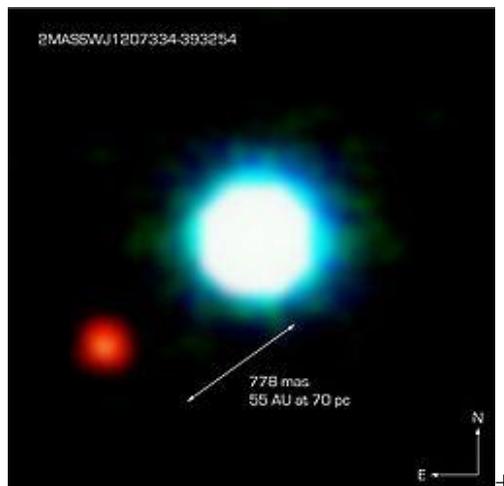


Рис. 20: Первая планета (2M1207b) наблюдалась непосредственно, 16 марта 2003 года с помощью одного из 8-метровых телескопов ESO VLT. Он имеет массу 3-10 раз Юпитера и вращается на 41 а.е. от своей центральной звезды, которая является коричневым карликом. В 2006 году вокруг центральной звезды был обнаружен пылевой диск, что свидетельствует о продолжающемся формировании планет в этой молодой системе (Источник: ESO).

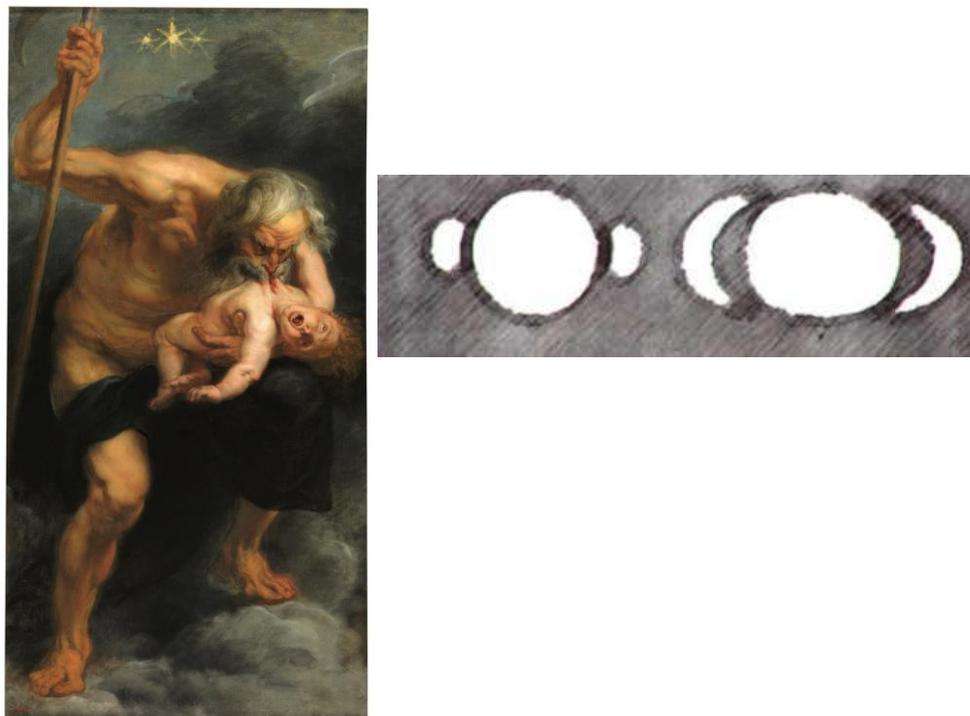


Рис. 21а и 21б: Сатурн по Рубенсу (1636-1638) и рисунок Галилея в 1610 году.

Интересно также, что Церера считалась планетой в начале XIX века (с 1801 по 1850 год), но позже она была классифицирована как астероид. Таким же образом, в момент открытия Плутона в 1930 году, он был классифицирован как планета. Однако в 2006 году он вместе с Церерой был реклассифицирован как карликовая планета. Поэтому, безусловно, некоторые из нынешнего понимания экзопланет, возможно, потребуются пересмотреть в будущем, но это не должно помешать нам ввести эту тему в школы.

## Номенклатура экзопланет

Экзопланета считается планетой, вращающейся вокруг звезды, не являющейся Солнцем, и поэтому не принадлежит к нашей Солнечной системе. НАСА ведет каталог (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) с более чем 4000 подтвержденных экзопланет в 2019 году. Номенклатура экзопланет проста и происходит от ее использования в кратных звездных системах. Нижняя буква помещается после имени звезды от буквы "b" для первой планеты, найденной в системе (например: 51 Pegasi b). Следующая планета, обнаруженная в системе, помечена следующей буквой алфавита c, d, e, f и т.д. (например: 51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e или 51 Pegasi f). Таким образом, порядок букв не имеет ничего общего ни с орбитальным периодом планет, ни с другими параметрами. Кроме того, в 2015 году Международный астрономический союз (IAU) присвоил названия первым 19 обнаруженным экзопланетным системам. Таким образом, в звездной системе Иpsilon Андромеды (см. таблицу 8) главная звезда (Urs And) имеет *альтернативное название Титавин*, а планеты b, c и d будут называться *Саффар*, *Самх* и *Макрити*. Но в настоящее время эти имена не используются ни в сообществе профессиональных, ни любительских астрономов.

## Обнаружение экзопланетных систем

Расстояние до Альфа Центавра или Проксима Центавра, ближайших к нам звезд, которые находятся всего в 4,5 световых годах от нас, огромно по сравнению с расстоянием планет в нашей Солнечной системе. На самом деле, Альфа Центавра примерно в 10 000 раз дальше Нептуна, нашей самой далекой планеты. Эти огромные расстояния сделали невозможным обнаружение планет вокруг других звезд до тех пор, пока в конце прошлого века не были разработаны сложные методы наблюдения.

Третья по яркости звезда ночного неба – Альфа Центавра. Альфа Центавра, на самом деле, тройная звездная система, состоящая из двоичной пары Альфа Центавра А и В и ближайшей к нам карликовой звезды под названием Проксима Центавра. Именно вокруг этой третьей звезды, типа «красного карлика», была обнаружена каменная планета, которая может иметь некоторое сходство с Землей: Проксима b, как была названа новая экзопланета, ближайшая к Земле, которая известна, но непосредственно не наблюдалась. Её удалось обнаружить благодаря наблюдениям небольшой аномалии на орбите звезды, вызванной гравитационным влиянием планеты. Эта аномалия послужила основанием для гипотезы о присутствии планеты и некоторых ее характеристиках. Планета вращается вокруг своего Солнца всего за 11 дней, она немного больше Земли и, вероятно, имеет твердую поверхность.

Важной особенностью этой экзопланеты является ее близость к своей материнской звезде Проксима Центавра. Всего 5% расстояния, которое отделяет Землю от Солнца, то есть около 0,05 а.е. Эта близость сделала бы его горящим адом, если бы его звезда была похожа на наше Солнце. Однако её звезда является красным карликом, и поэтому планета находится в обитаемой зоне. Это потому, что красные карлики, такие как Проксима Центавра, с 12% солнечной массы, имеет яркость только 0,1% от Солнца. В таких условиях новая планета будет иметь температуру 40 градусов ниже нуля без парникового эффекта возможной атмосферы, которая может поднять температуру на несколько градусов выше точки замерзания воды.

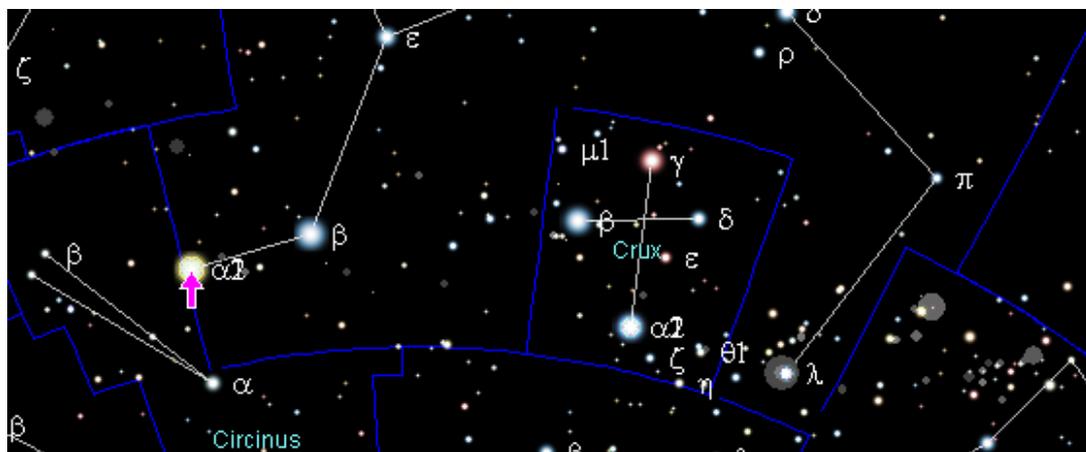


Рис. 22: Альфа Центавра возле южного креста.

Одной из сложностей для поддержания жизни на планетных системах вокруг красного карлика является то, что планеты должны быть очень близко к своей звезде, чтобы иметь температуру, при которой вода может существовать в жидком состоянии. Когда это происходит, во многих случаях есть явление, называемое синхронным вращением, которое мы видим на нашей собственной Луне. Время орбиты и время вращения выравниваются, и планета всегда показывает свое лицо звезде. Это предполагает выжженное полушарие, в котором атмосфера испаряется, а другая замерзает. Однако атмосфера, более плотная, чем земная, позволила бы умерить эти экстремальные температуры за счет циркуляции атмосферы и перераспределения тепла.

## Метод радиальной скорости

В настоящее время существует два метода, которые в основном используют для открытия экзопланет. Они оба – косвенные, т. е. вывод о наличии планетарной системы делается из наблюдений за центральной звездой.

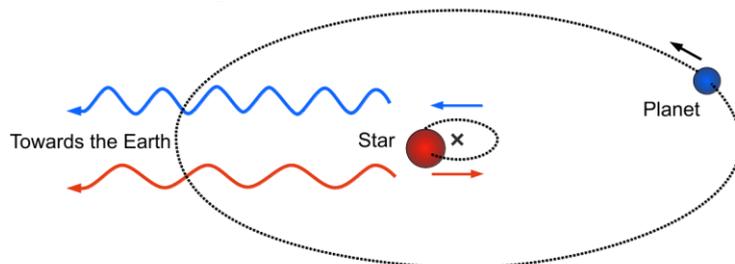


Рис. 23: Метод радиальной скорости для обнаружения экзопланет

Метод радиальной скорости обнаружил первую экзопланету, вращающуюся вокруг центральной звезды, с открытием 51 Пегаса b в 1995 году. В этом методе, колебания центральной звезды измеряется из-за движения планеты вокруг центральной звезды. Звезда и планета вращаются вокруг центра масс звездно-планетной системы. Это движение центральной звезды вызывает очень небольшие изменения в свете звезды от красного до синего (рис. 23), из-за доплеровского смещения. Таким образом, мы можем определить массу планеты по отношению к массе центральной звезды. На практике, однако, мы не знаем ориентации большинства планетных систем, обнаруженных с помощью этого метода, следовательно, массы планет, которые мы можем извлечь, являются минимальными массами (что означает, что реальные массы вполне могут быть больше).

## Упражнение 13: Эффект Доплера

Как известно из семинара по расширению Вселенной, эффект Доплера – то, из-за чего меняется длина волны звука, когда источник находится в движении. Это можно продемонстрировать, вращая будильник, вставленный в мешок ткани, завязанный веревкой в горизонтальной плоскости. Когда он приближается к слушателю длина волны сокращается и звук имеет более высокий шаг. Когда он отходит, длина волны

удлинится и звук имеет более низкую высоту. Человек в центре вращения не обнаруживает никаких изменений.

В случае экзопланеты и звезды, световые волны от звезды меняются. Когда звезда приближается к нам, видимая длина волны ее излучения уменьшается, ее свет смещается в сторону синего конца видимого спектра. Когда звезда отходит, видимая длина волны увеличивается, и ее свет смещается в сторону красного конца видимого спектра.

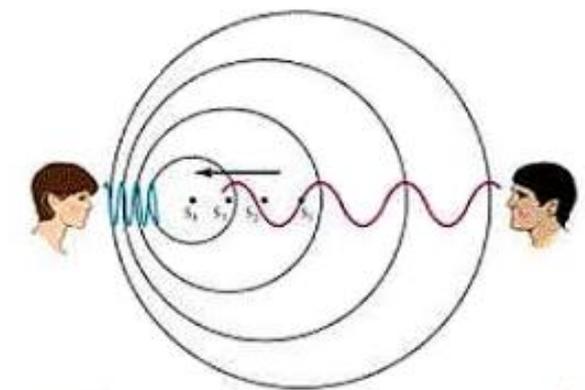


Рис. 24: когда источник приближается, длина волны уменьшается, а когда отходит – длина волны увеличивается.

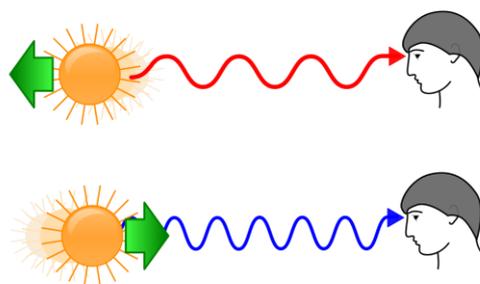


Рис. 25: когда источник приближается, он выглядит голубее, а когда отходит – выглядит краснее.

В этом случае эффект Доплера возникает из-за движения экзопланет вокруг материнской звезды. Когда экзопланта отходит от нас, ее свет движется в сторону красного, а когда он приближается, его свет движется к синему.

## Транзитный метод

Другой важный метод, называемый транзитным методом, основан на наблюдении изменений яркости звезды, когда одна из ее планет проходит транзитом перед звездой, тем самым скрывая небольшую часть диска звезды (рис. 26). С помощью транзитного метода может быть обнаружено отношения радиуса планеты  $R_{пл}$  к радиусу материнской звезды  $R_{зв}$ :

$$\frac{R_{пл}}{R_{зв}} = \sqrt{\frac{\Delta L}{L}}$$

где  $\Delta L/L$  – относительное изменение яркости звезды, наблюдаемое во время транзита экзопланеты (например,  $\Delta L/L = 0,01$  указывает на 1% снижение яркости звезды во время транзита).

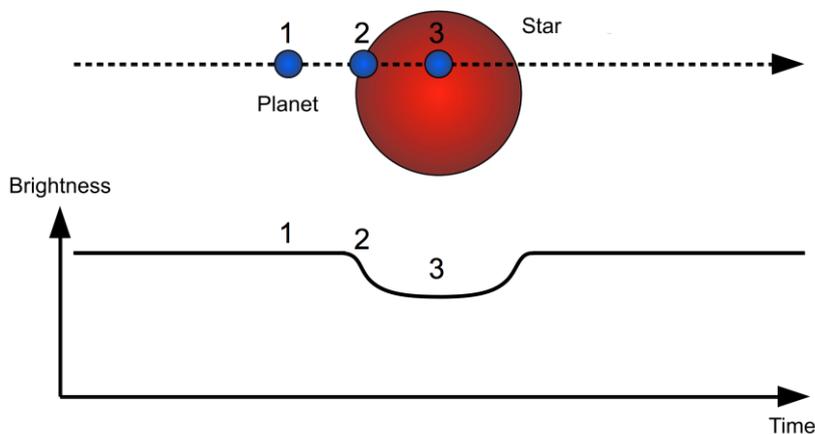


Рис. 26: Транзитный метод обнаружения планет.

### Деятельность 14: Моделирование транзита

Транзит можно смоделировать с помощью двух шаров: большого, который представляет звезду, и маленького, который представляет планету, вращая центральную звезду. Если наблюдатели находятся в той же плоскости, что и орбита планеты, и наблюдают в этот момент, они будут знать, когда планета проходит перед звездой при уменьшении и увеличении яркости звезды (рис. 27). Однако, если наблюдатель находится не в одной плоскости вращения, никаких изменений в яркости не будет наблюдаться (рис. 28).

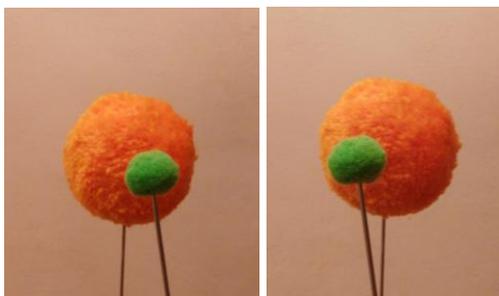


Рис. 27: Наблюдатель в плоскости вращения может видеть транзит планеты и обнаруживать изменения яркости.

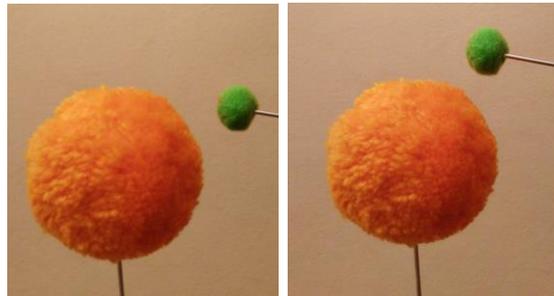


Рис. 28: Наблюдатель вне плоскости вращения, не может просматривать какие-либо изменения в яркости.

### Метод микролинзирования

Другие методы обнаружения экзопланет также применяются, хотя они используются реже. Метод микролинзирования заключается в наблюдении за увеличением яркости фоновой звезды, благодаря выравниванию фоновой звезды со звездой с экзопланетами. Экзопланетная система действует как гравитационная линза и будет генерировать очень характерное расширение яркости (красная линия на рис. 29). Для того, чтобы он работал, должно быть полное визуальное выравнивание между тремя частями (фоновая звезда, звезда с экзопланетой и Землей).

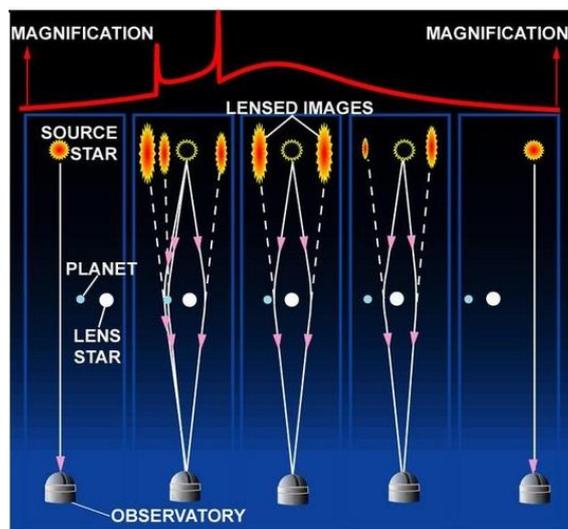


Рис. 29: Метод микролинза для обнаружения планет.

## Упражнение 15: Моделирование микролинсов

Вы можете смоделировать обнаружение экзопланеты вокруг материнской звезды с парой основ бокала вина, как это используется в мастер-классе «Расширяющаяся Вселенная». Сначала мы используем только одно основание, но ничего не видно. Затем мы проходим второй и точка возникает, а затем, возможно, даже две.



Рис. 30: сначала только с одним основанием.

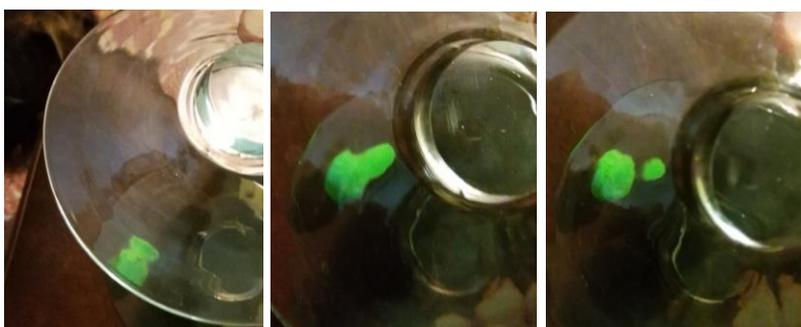


Рис. 31: при перемещении второго основания над первым появляется точка, а затем две. Оба раза без перемещения первого основания.

## Метод прямого обнаружения

И, наконец, метод прямого обнаружения соответствует получению и анализу изображений звезды с очень высоким разрешением, чтобы определить существование планет вокруг нее. Из-за количества света, излучаемого звездой, этот метод был успешным только для планет, которые очень далеки от своей центральной звезды и в то

же время очень молоды, поэтому они все еще излучают свет из-за тепла, выделяемого во время их образования (также рисунок 32).

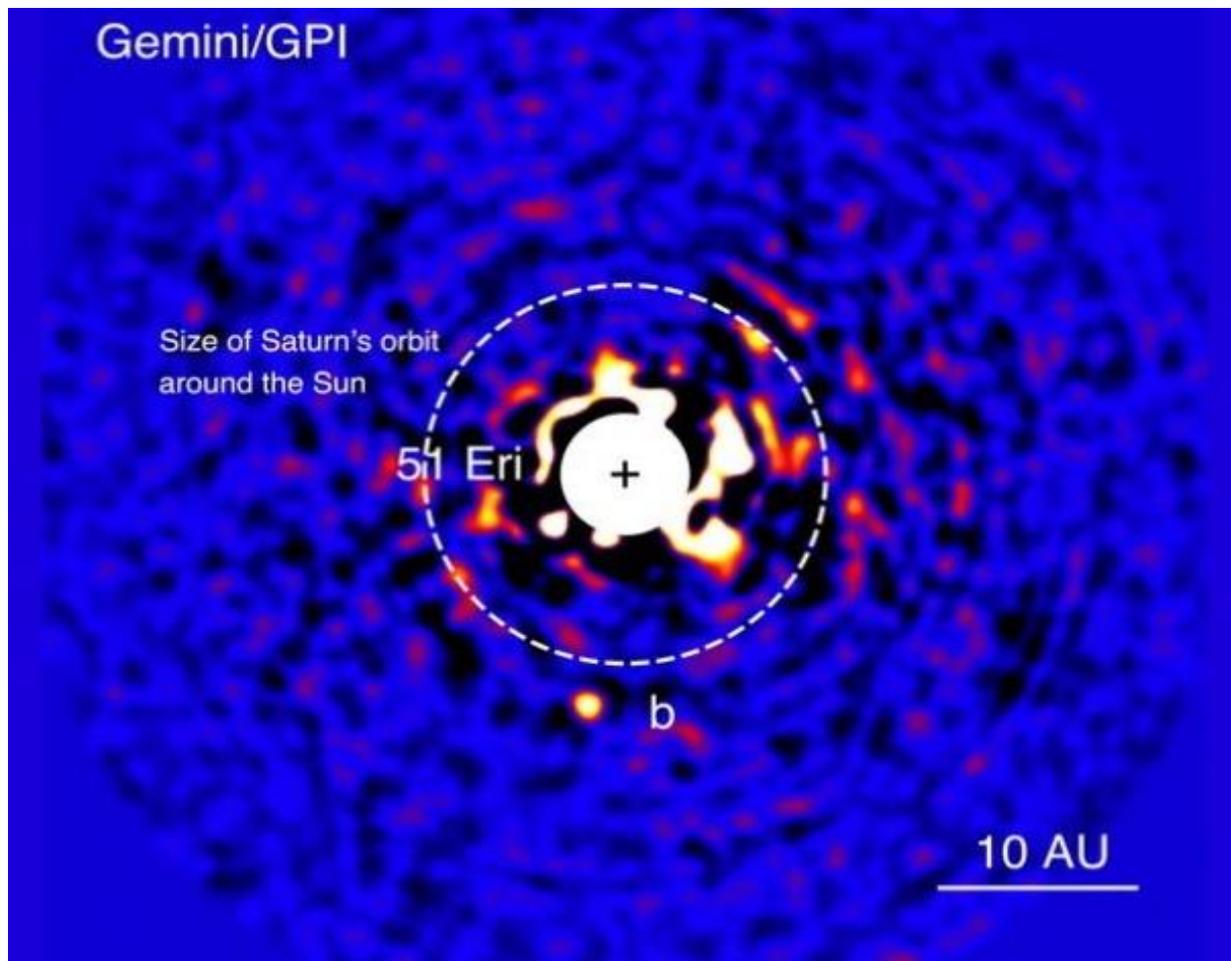


Рис. 32: Метод прямого обнаружения для обнаружения планет.

## Примеры внесолнечных систем

Самые известные экзопланеты имеют массу, сопоставимую с массой Юпитера, который является самой большой планетой в нашей солнечной системе. Поэтому часто указываются массы и размеры внесолнечных планет в единицах массы Юпитера MJ (1,90 x 10<sup>27</sup> кг) и радиуса Юпитера RJ (71492 км). Известно, что лишь очень немногие планеты (около 20) имеют массы, сопоставимые с массой Земли. Однако есть больше планет (около 700, или 20% от всех известных) с размерами, сопоставимыми с Землей, до 1,5 Rt (земных радиусов). Было показано, что эти планеты являются наиболее распространенными, но современные методы обнаружения более успешны в обнаружении более массивных или более крупных объектов.

Планета	Среднее расстояние AU	Орбитальный период Дней	Minimum mass * Jupiter or Terrestrial Mass	Открытие Год	Радиус Км
Ups And b	0,059	4,617	0,69 Mj	1996	124000*
Ups And c	0,83	241,5	1,98 Mj	1999	176000*
Ups And d	2,51	1274,6	4,13 Mj	1999	221999*
Ups And e	5,24	3832,5	1,06 Mj	2010	70000*
Gl 581 e	0,030	3,149	1,9 Mt	2009	7600*
Gl 581 b	0,041	5,368	15,7 Mt	2005	16000*
Gl 581 c	0,073	12,932	5,7 Mt	2007	11000*
Kepler-62 b	0,0553	5,714	9 Mt	2013	8350
Kepler-62 c	0,0929	12,441	4 Mt	2013	3400
Kepler-62 d	0,120	18,164	14 Mt	2013	12400
Kepler-62 e	0,427	122,387	1,6 Mt	2013	10300
Kepler-62 f	0,718	267,291	2,8Mt	2013	9000
Trappist-1 b	0,012	1,5111	1,02 Mt	2016	7100
Trappist-1 c	0,016	2,422	1,16 Mt	2016	7000
Trappist-1 d	0,022	4,050	0,30 Mt	2016	5000
Trappist-1 e	0,030	6,099	0,77 Mt	2017	5800
Trappist-1 f	0,039	9,206	0,93 Mt	2017	6700
Trappist-1 g	0,047	12,354	1,15 Mt	2017	7300
Trappist-1 h	0,062	18,768	0,33 Mt	2017	4900

Таблица 8: Четыре репрезентативных внесолнечных системы с множеством планет. Данные взяты из Каталога внесолнечных планет 2 (кроме последнего столбца). \* Эти планеты были открыты по лучевой скорости; поэтому нет уверенности в их размерах. Для планет-гигантов с массами 0,5-20 Мдж известно, что почти все они имеют радиус 0,7-1,4 раза больше, чем Юпитер (50-100 тысяч километров), с небольшой корреляцией с их массой. Для планет земной группы GJ861 его радиус был рассчитан в предположении, что плотность планеты равна плотности Земли (5520 кг / м<sup>3</sup>).

В этом разделе мы рассмотрим несколько примеров внесолнечных планетных систем, у которых есть три или более известных планеты. В таблице 3 показаны планеты вокруг звезд Ups Andromeda, Gliese 581, Kepler-62 и Trappist-1. Планетные системы Аps Андромеда и Глизе 581 были открыты с использованием метода лучевых скоростей, и об этих планетах мы знаем только их минимальные массы, но не их размеры. Считается, что их радиусы находятся в пределах 50000-100000 км (хотя в таблице 1 показано одно из возможных значений). Для Gliese 581 было объявлено о нескольких других планетах (d, f, g), но в других публикациях они противоречили; поэтому их открытие было отозвано. Вероятно, это было вызвано предельными сигналами или шумом от других источников данных.

Планеты системы Kepler-62 были открыты из транзитов. Следовательно, их размеры известны. Нам известны только верхние пределы (максимальные массы) их масс, и они слишком малы (и легки по весу), чтобы их можно было обнаружить методом лучевых скоростей. Однако есть также много планет, которые были обнаружены как с помощью метода транзита, так и с помощью метода лучевых скоростей, и мы знаем как их массы, так и их размеры.

Есть некоторые экзопланеты, которые находятся очень близко к центральной звезде (например, все планеты Gliese 876 имеют орбиты ближе к звезде, чем Меркурий к Солнцу). У других есть более далекие планеты, такие как система 2M1207b (см. Рис. 1), с формирующейся планетой на расстоянии 41 а.е., или в 1,4 раза больше Нептуна. Одна из возможностей визуализации этих данных - построение масштабных моделей выбранной планетной системы. Это позволит нам легко сравнивать друг друга и с нашей Солнечной системой.

Планета	Среднее Расстояние AU	Орбитальный период Лет	Масса, Масса Юпитера	Радиус Км
Mercury	0.3871	0.2409	0.0002	2439
Venus	0.7233	0.6152	0.0026	6052
Earth	1.0000	1.0000	0.0032	6378
Mars	1.5237	1.8809	0.0003	3397
Jupiter	5.2026	11.8631	1	71492
Saturn	9.5549	29.4714	0.2994	60268
Uranus	19.2185	84.04	0.0456	25559
Neptune	30.1104	164.80	0.0541	25269

Таблица 9: Планеты Солнечной системы

В настоящее время мы знаем, что вокруг звезд есть экзопланеты, которые сильно отличаются от Солнца. В 1992 году радиоастрономы объявили об открытии первой экзопланеты вокруг пульсара PSR 1257 + 12. Потребовалось еще три года, чтобы открыть первую экзопланету вокруг «нормальной» звезды солнечного типа 51 Пегаса. Впоследствии вокруг были обнаружены экзопланеты: красные карлики (например, Gliese 876 в 1998 году), гигантские звезды (Йота Драконис в 2001 году), коричневые карлики (2M1207 в 2004 году), звезды типа А (Фомальгаут в 2008 году, см. Рисунок 33), белые карлики. (WD1145-1017 в 2015 году, с распадающейся планетой), вокруг двойных систем (Kepler-16b в 2011 году) и другие.

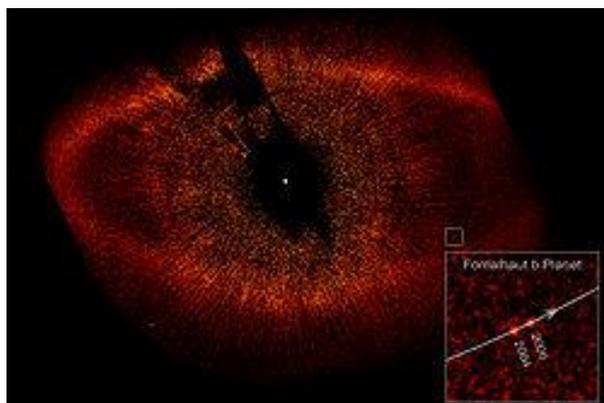


Рис. 33: Планета Фомальгаут b в межпланетном пылевом облаке Фомальгаут на снимке космического телескопа Хаббл с положениями в 2004 и 2006 годах (см. Небольшое изображение). (Фото: НАСА)

### Задание 16: Модели экзопланетных систем

Сначала выбираем масштаб модели. Использовать одну и ту же шкалу для диаметров и расстояний неудобно из-за проблем с размером. Для расстояний рассматривается масштаб: 1 AU = 1 м. В этом случае все экзопланеты могут поместиться в типичном классе, а также первые пять планет нашей солнечной системы. Для шкалы размеров планеты радиус планеты в 10 000 км соответствует диаметру модели 0,5 см. В этом случае самая большая планета Юпитер с радиусом 71000 км имеет диаметр 7 см, а самая маленькая, Меркурий, будет иметь размер 0,2 см. Если деятельность осуществляется на улице (например, на школьном дворе), мы можем построить полную модель с аналогичными масштабами диаметров и расстояний. Для родительских звезд такой же масштаб, радиус родительской звезды 10 000 км соответствует диаметру модели 0,5 см.

Солнечная система	Расстояние	Радиус Км	Расстояние в модели	Диаметр в модели
Mercury	0.39 AU	2439	40 cm	0.1 cm
Venus	0.72 AU	6052	70 cm	0.3 cm
Earth	1 AU	6378	1.0 m	0.3 cm
Mars	1.5 AU	3397	1.5 m	0.1 cm
Jupiter	5.2 AU	71492	5.0 m	3.0 cm
Saturn	9.55 AU	60268	10 m	2.5 cm
Uranus	19.22 AU	25559	19 m	1.0 cm
Neptune	30.11 AU	25269	30 m	1.0 cm

Таблица 10: Солнечная система. Родительская звезда, Солнце, имеет размер G2V с диаметром в модели 35 см. Зона обитаемости обозначена зеленым цветом.

При выраженных условиях масштаба Солнечная система построена (Таблица 10) или любая из систем в Таблице 1 с использованием радиусов и средних значений расстояний, включенных в таблицу. Для упрощения процесса ниже приведены таблицы с указанным выше масштабом.

Он начинается с первой планетной системы, которая была обнаружена в 1999 году путем обнаружения ее планет с помощью эффекта Доплера, примененного к лучевой скорости звезды. Этот метод, благодаря уровню технологий, позволяет обнаруживать очень большие экзопланеты, расположенные близко к родительской звезде. Несомненно, метод обнаружения также определяет характеристики расположенных планет. С помощью этого метода обнаружения были обнаружены газовые планеты, такие как Юпитер или даже большие. Чтобы найти планеты, которые могли бы поддерживать жизнь, необходимо было попытаться обнаружить меньшие планеты земной группы, такие как Земля.

Upsilon Andromedae Titawin	Расстояние AU	Диаметр Км	Расстояние в модели	Диаметр в модели
Ups And b / Saffar	0.059 AU	108000	6 cm	5.5 cm
Ups And c / Samh	0.830 AU	200000	83 cm	10.0 cm
Ups And d / Majriti	2.510 AU	188000	2.5 m	9.5 cm
Ups And e / Titawin e	5.24 AU	140000	5.2 m	7.0 cm

Таблица 11: Родительская звезда Иpsilon Андромеды - звезда F8V в 44 световых годах в созвездии Андромеды. Это двойная звезда, состоящая из Ups And A, звезды, очень похожей на Солнце, но несколько более горячей и яркой, с радиусом 1,28 R<sub>sun</sub> и Ups And B, который представляет собой небольшой красный карлик. В модели Ups And A он имеет диаметр 45 см.

Считается, что газообразные планеты не могут поддерживать жизнь в том смысле, в котором мы ее знаем, поэтому существует тенденция изучать скалистые планеты земного типа вместо планет Юпитера, которые были открыты первыми.

Gliese 581 - одна из первых систем, где удалось обнаружить экзопланеты земного типа. Хотя с 2014 года некоторые из его экзопланет обсуждаются. В данном случае рассматривался метод обнаружения лучевых скоростей, но из-за малой массы GL 581, равной 0,31 M<sub>c</sub> Солнца, было возможно обнаружить экзопланеты земного типа.

Gliese 581	Расстояние AU	Диаметр / Км	Дистанция в модели	Диаметр в модели
Gliese 581 e	0.030 AU	15200	3 cm	0.8 cm
Gliese 581 b	0.041 AU	32000	4 cm	1.6 cm
Gliese 581 c	0.073 AU	22000	7 cm	1.1 cm

Таблица 12: Родительская звезда Gliese 581 - это красный карлик M2,5V, расположенный на высоте 20,5 св. Лет в созвездии Весов. Она имеет треть массы Солнца, менее яркая и холодная, чем она. Его радиус составляет 0,29 R<sub>sun</sub> и в модели он соответствует диаметру 10 см.

В 2009 году была запущена миссия Кеплера. Эта космическая обсерватория вращается вокруг Солнца и ищет внесолнечные планеты, особенно те, которые имеют размер, близкий к Земле, которые находятся в обитаемой зоне своей родительской звезды. За 9 лет работы миссии было обнаружено около 3000 экзопланет, и тысячи кандидатов все еще ожидают подтверждения. Кеплер охватил 0,25 процента неба, и его результаты показали, что планеты очень часто встречаются в Млечном Пути. В 2018 году был запущен спутник TESS. Он предназначен для идентификации близлежащих планет

размером не более чем в два раза больше Земли и в гораздо более широкой области неба, которая будет покрывать 85 процентов небесного свода. И Кеплер, и ТЕСС были разработаны для исследования неба в поисках планетарных транзитов.

Kepler 62	Расстояние AU	Диаметр / Км	Дистанция в модели	Диаметр в модели
Kepler 62 b	0.056 AU	33600	5.5 cm	1.7 cm
Kepler 62 c	0.093 AU	13600	9 cm	0.7 cm
Kepler 62 d	0.120 AU	48000	12 cm	2.4 cm
Kepler 62 e	0.427 AU	40000	43 cm	2.0 cm
Kepler 62 f	0.718 AU	36000	72 cm	1.8 cm

Таблица 13: Родительская звезда Кеплер 62 - звезда F2V в созвездии Лиры в 1200 св. Лет. Это звезда немного холоднее и меньше Солнца. Его радиус составляет 0,64 R<sub>sun</sub> и в модели он соответствует диаметру 22 см.

Кеплер-62 - один из самых интересных примеров потенциально обитаемой планетной системы. Особый интерес представляют планеты e и f, поскольку они являются лучшими кандидатами на место твердых планет, попадающих в обитаемую зону своей звезды. Их радиусы, 1,61 и 1,41 земного радиуса соответственно, помещают их в диапазон радиусов того, что может быть твердой планетой земной группы, и попадают в обитаемую зону Кеплера-62: и на диапазоне расстояний, на котором эти две планеты могут иметь жидкую воду. на их поверхности, возможно, полностью покрывая их. Для Кеплер-62e, который расположен недалеко от внутреннего края обитаемой зоны, это потребует отражающего облачного покрова, который уменьшает излучение, которое нагревает поверхность. Кеплер-62f, с другой стороны, находится во внешней зоне обитаемой зоны, как и Марс в нашей Солнечной системе. Там требуется значительное количество углекислого газа, чтобы поддерживать поверхность планеты в тепле с достаточным количеством воды для поверхности жидкости.

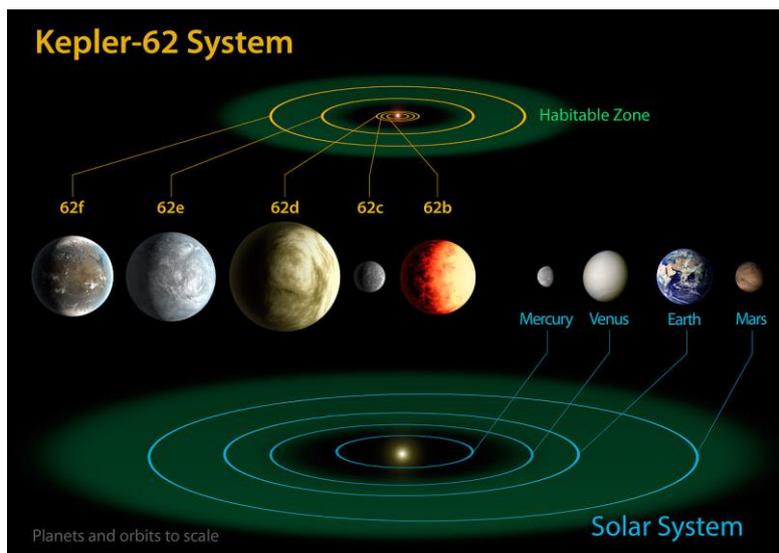


Рис. 34: Система Кеплер-62 в сравнении с внутренней солнечной системой. Зеленая область указывает на обитаемую зону - область, где может существовать жизнь в том виде, в котором мы ее знаем. Источник NASA Ames / JPL-Caltech.

Близлежащий красный карлик, обозначенный как 2MASS J23062928-0502285, был отслежен во время транзита в 2015 году с помощью траппистского телескопа, первоначально обнаружившего около трех планет земных размеров, получивших название Траппист-1b, c и d. Более поздние исследования, проведенные международными группами с использованием телескопов Хаббла, Кеплера, Спитцера и телескопа в Чили, позволили нам лучше понять в общей сложности семь планет. Пять из этих планет (b, c, e, f и g) похожи по размеру на Землю, а две (d и h) имеют средний размер между Марсом и Землей. Три планеты (e, f и g) вращаются внутри обитаемой зоны.

Все планеты TRAPPIST-1 вращаются очень близко к своей звезде и проходят так близко друг к другу, что гравитационные взаимодействия значительны, а их орбитальные периоды почти резонансны. Планеты будут казаться заметными в небе своих соседей, а в некоторых случаях в несколько раз больше, чем Луна появляется с Земли. Фактически, их массы были определены не по лучевым скоростям, а по отклонениям периодичности их орбит с использованием метода, называемого «временные вариации прохождения» (отклонения времени прохождения).

Массы всех из них можно было получить с очень небольшой погрешностью, что позволило с точностью определить плотность, поверхностную гравитацию и их состав. Экзопланеты имеют диапазон масс примерно от 0,3 до 1,16 мегатонн, а плотность - от 0,62 до 1,02 земных (3,4-5,6 г / см<sup>3</sup>). Планеты c и e почти полностью каменистые, в то время как b, d, f, g и h имеют слой летучих веществ в виде водной оболочки, ледяной оболочки или толстой атмосферы. Похоже, что Trappist-1d имеет океан жидкой воды, составляющий примерно 5% от его массы, для сравнения, содержание воды на Земле <0,1%, в то время как слои воды Trappist-1f и g, вероятно, заморожены. Trappist-1e имеет немного более высокую плотность, чем Земля, что указывает на состав земных горных пород и железа. Кроме того, было обнаружено, что атмосфера Trappist-1b была выше предела утечки парниковых газов от 101 до 104 бар водяного пара. На планетах c, d, e и f отсутствует водородно-гелиевая атмосфера. Планета g также наблюдалась, но данных, чтобы исключить наличие водородной атмосферы, было недостаточно.

Траппист - 1	Расстояние AU	Диаметр / Км	Расстояние в модели	Диаметр в модели
Trappist-1 b	0.012	14284	1.2 cm	1.4 cm
Trappist-1 c	0.016	13952	1.6 cm	1.4 cm
Trappist-1 d	0.022	9990	2.2 cm	1.0 cm
Trappist-1 e	0.030	11595	3.0 cm	1.2 cm
Trappist-1 f	0.039	13328	3.9 cm	1.3 cm
Trappist-1 g	0.047	14628	4.7 cm	1.5 cm
Trappist-1 h	0.062	9850	6.2 cm	1.0 cm

Таблица 14: Родительская звезда Траппист-1 - красный карлик типа M8V, расположенный в созвездии Водолея на 40-м году рождения. Это звезда немного больше Юпитера, диаметром 168000 км и диаметром модели 7 см. Замечено, что расстояния до планет в модели меньше диаметра звезды, что дает представление о компактности этой системы.

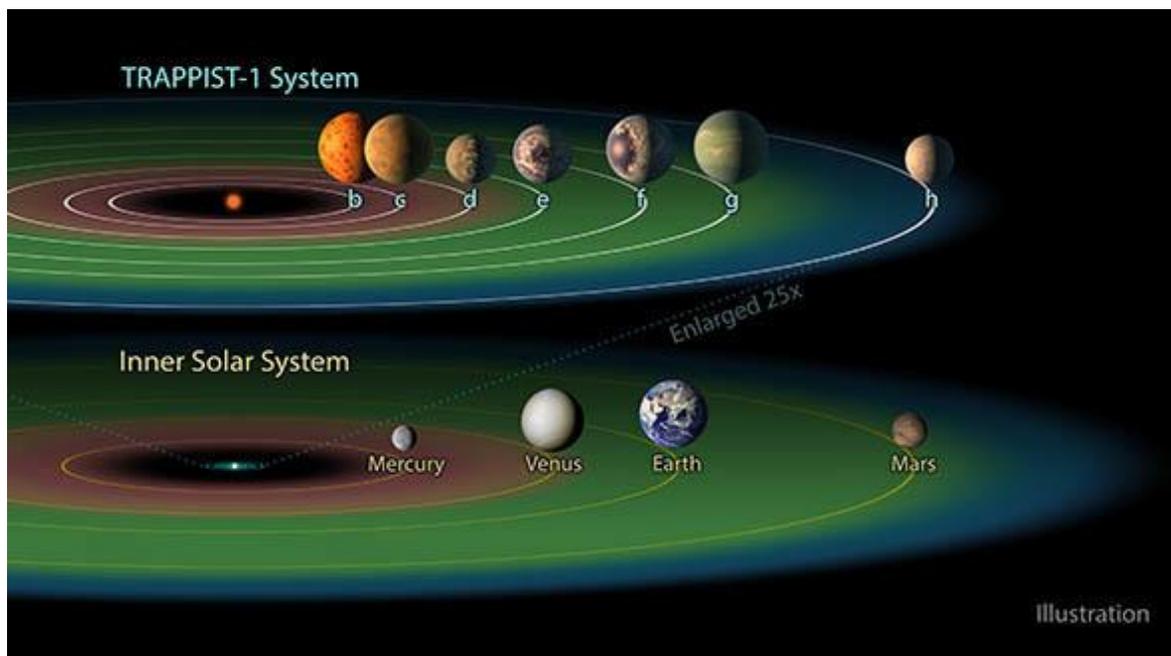


Рис. 35: Сравнение системы Trappist-1 с внутренней солнечной системой. Зеленая область указывает на обитаемую зону - область, где может существовать жизнь в том виде, в котором мы ее знаем.

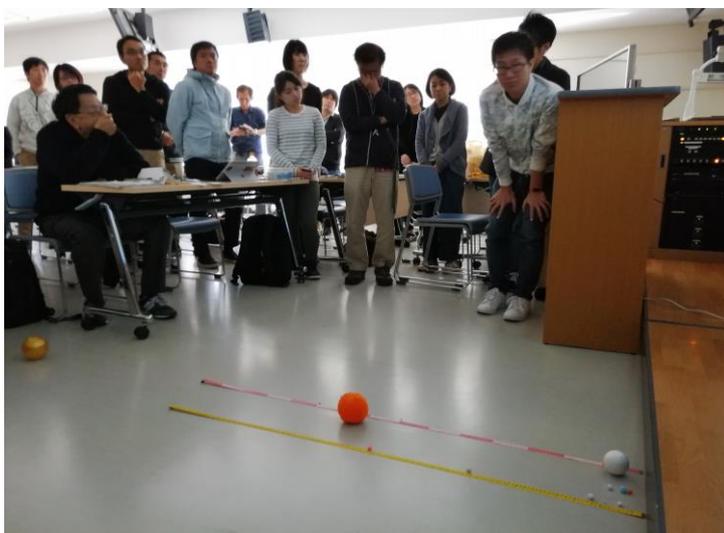


Рис. 36: После того, как все модели будут построены, точки, выделенные в презентации зоны обитаемости, необходимо прокомментировать. В зависимости от массы и типа родительской звезды зона обитаемости более или менее близка.

Есть еще много безответных вопросов о свойствах и обитаемости экзопланет. Узнав больше о них и узнав больше об их свойствах и характеристиках, это послужило стимулом для нескольких текущих и будущих космических миссий, таких как миссии НАСА TESS и JWST, а также миссии ЕКА CHEOPS и PLATO, последняя из которых будет запущена в 2026 году и дает надежду на увеличение количества известных планет земной группы.

## Bibliography

- Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., *Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17<sup>th</sup> century*, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona, 2006.
- Gaitsch, R., *Searching for Extrasolar Planets*, Proceedings of 10<sup>th</sup> EAAE International Summer School, Barcelona 2006.
- Ros, R.M., *A simple rocket model*, Proceedings of 8th EAAE International Summer School, 249, 250, Barcelona, 2004.
- Ros, R.M., *Measuring the Moon's Mountains*, Proceedings of 7th EAAE International Summer School, 137, 156, Barcelona, 2003.
- Vilks I., *Models of extra-solar planetary systems*, *Proceedings of 10<sup>th</sup> EAAE International Summer School*, Barcelona 2006.