

# Планеты и экзопланеты

Rosa M. Ros, Hans Deeg

*International Astronomical Union  
Technical University of Catalonia, Spain  
Canarian Astrophysical Institute, Spain*



# Задачи

- Рассмотреть основные числовые показатели внесолнечных планетных систем
- Рассмотреть основные характеристики внесолнечных планетных систем



# Солнечная система

Мы ищем  
показательные  
модели, а не объекты  
искусства



# Опираясь на содержание

## Модели с научным содержанием

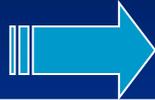


# Активность 1: расстояние от Солнца в масштабе

<b>Меркурий</b>	<b>57 900 000 km</b>		<b>6 cm</b>	<b>0.4 AU</b>
<b>Венера</b>	<b>108 300 000 km</b>		<b>11 cm</b>	<b>0.7 AU</b>
<b>Земля</b>	<b>149 700 000 km</b>		<b>15 cm</b>	<b>1.0 AU</b>
<b>Марс</b>	<b>228 100 000 km</b>		<b>23 cm</b>	<b>1.5 AU</b>
<b>Юпитер</b>	<b>778 700 000 km</b>		<b>78 cm</b>	<b>5.2 AU</b>
<b>Сатурн</b>	<b>1 430 100 000 km</b>		<b>143 cm</b>	<b>9.6 AU</b>
<b>Уран</b>	<b>2 876 500 000 km</b>		<b>288 cm</b>	<b>19.2 AU</b>
<b>Нептун</b>	<b>4 506 600 000 km</b>		<b>450 cm</b>	<b>30.1 AU</b>



# Активность 2: диаметры планет в масштабе

Солнце	1 392 000 km		139.0 cm
Меркурий	4 878 km		0.5 cm
Венера	12 180 km		1.2 cm
Земля	12 756 km		1.3 cm
Марс	6 760 km		0.7 cm
Юпитер	142 800 km		14.3 cm
Сатурн	120 000 km		12.0 cm
Уран	50 000 km		5.0 cm
Нептун	45 000 km		4.5 cm



# Активность 2: диаметры планет в масштабе



Футболка с диаметрами  
планет в масштабе



# Активность 3: Диаметры и расстояние от солнца

Солнце	1 392 000 km			25.0 cm	
Mercury	4 878 km	57 900 000 km		0.1 cm	10 m
Venus	12 180 km	108 300 000 km		0.2 cm	19 m
Earth	12 756 km	149 700 000 km		0.2 cm	27 m
Mars	6 760 km	228 100 000 km		0.1 cm	41 m
Jupiter	142 800 km	778 700 000 km		2.5 cm	140 m
Saturn	120 000 km	1 430 100 000 km		2.0 cm	250 m
Uranus	50 000 km	2 876 500 000 km		1.0 cm	500 m
Neptune	45 000 km	4 506 600 000 km		1.0 cm	800 m

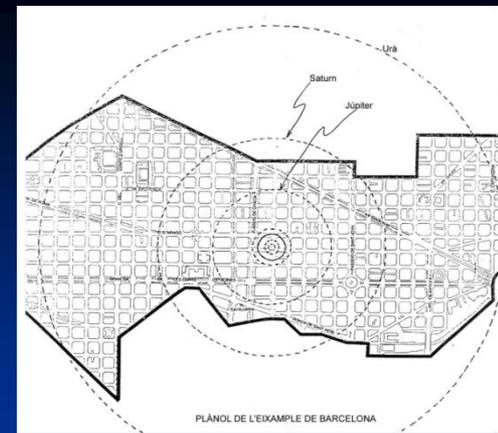
При таком масштабе школьного двора хватает до марса



# Активность 3: Масштабная модель на школьной игровой площадке



# Активность 4: Модель в городе (Барселона)



Солнце	Стиральная машина	<i>Puerta Instituto</i>
Меркурий	Яйцо	<i>Puerta Hotel Diplomatic</i>
Венера	Горох	<i>Pasaje Méndez Vigo</i>
Земля	Горох	<i>Entre Méndez Vigo y Bruc</i>
Марс	Перец	<i>Paseo de Gracia</i>
Юпитер	Апельсин	<i>Calle Balmes</i>
Сатурн	Мандарин	<i>Pasaje Valeri Serra</i>
Уран	Каштан	<i>Calle Entenza</i>
Нептун	Каштан	<i>Estación de San</i>

# Модель в городе Мец (Франция)



Exposition réalisée en collaboration avec le Club d'Astronomie M57 - MJC des Quatre Bornes

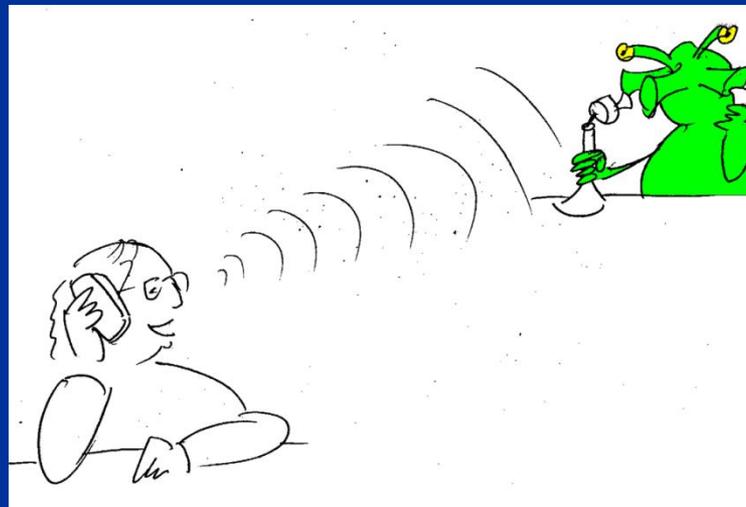
# Активность 5: Модель времени

- $c = 300\,000$  км/сек

Время, которое требуется солнечному свету чтобы добраться до луны:

$$t = \text{дистанция EM} / c = 384\,000 \text{ км} / 300\,000 = 1.3 \text{ сек}$$

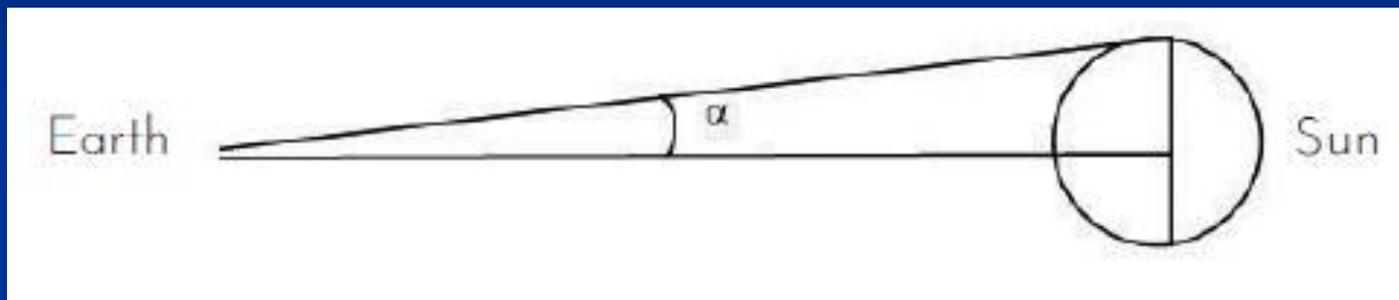
Каким же может  
быть видео  
разговор между  
планетами?



# Солнечному свету требуется чтобы ДОСТИГНУТЬ ...

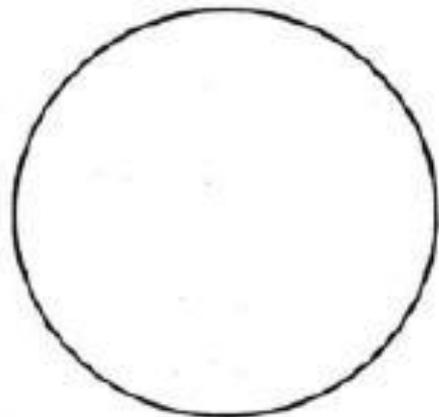
Меркурий	57 900 000 km		3.3 минут
Венера	108 300 000 km		6.0 минут
Земля	149 700 000 km		8.3 минут
Марс	228 100 000 km		12.7 минут
Юпитер	778 700 000 km		43.2 минут
Сатурн	1 430 100 000 km		1.32 часов
Уран	2 876 500 000 km		2.66 часов
Нептун	4 506 600 000 km		4.16 часов

# Активность 6: как выглядит солнце с других планет

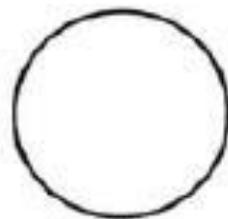


- $a = \tan a = \text{радиус солнца} / \text{расстояние до солнца}$   
 $= 700\,000 / 150\,000\,000 = 0.0045 \text{ радиан} = 0.255^\circ$
- С земли солнце измеряется как  $2a = 0.51^\circ$

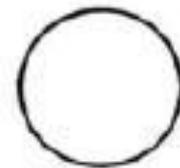
# Активность 6: как выглядит солнце с других планет



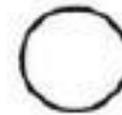
From Mercury



From Venus



From Earth



From Mars



From Jupiter



From Saturn



From Uranus



From Neptune



# Активность 7: модель плотностей

Солнце	1.41 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Сера (1.1-2.2)
Меркур	5.41 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Пирит (5.2)
Венера	5.25 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Пирит (5.2)
Земля	5.52 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Пирит (5.2)
Марс	3.90 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Цинк (4.0)
Юпитер	1.33 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Сера (1.1-2.2)
Сатурн	0.71 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Сосна (0.55)
Уран	1.30 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Сера (1.1-2.2)
Нептун	1.70 g/cm <sup>3</sup>	⇒	Глина (1.8-2.5)



# Активность 8: модель сплющивания

- Нарежьте картонные полоски размером 35 x 1 см.
- Прикрепите их к цилиндрической палочке длиной 50 см и диаметром 1 см. Оставьте нижний конец свободным, чтобы он мог двигаться вдоль стержня.
- Раскрутите палочку в руках по часовой и против часовой стрелки. Центробежная сила деформирует картонные ленты так же, как деформируются и планеты.



# Активность 8: Сплюсцивание

Планеты	(экваториальный радиус- полярный радиус) / экваториальный радиус
Меркурий	0.0
Венера	0.0
Земля	0.0034
Марс	0.005
Юпитер	0.064
Сатурн	0.108
Уран	0.03
Нептун	0.03



# Активность 9: модель орбитальных периодов

- Прикрепите груз (рулон ленты) к одному концу веревки и держите веревку за другой конец. раскрутите веревку над головой.
- Чем больше вы удлините веревку – тем больше времени потребуется на завершение орбитального периода.
- При уменьшении же длины веревки – уменьшится и необходимое кол-во времени на один оборот.



# Данные земной орбиты

Средняя орбитальная скорость  $v = 2\pi R / T$

Для Земли

$$v = 2\pi \times 150 \times 10^6 / 365$$

$$v = 2\,582\,100 \text{ км/день} = 107\,590 \text{ км/ч} = 29.9 \text{ км/с}$$

(Средняя орбитальная скорость Солнца вокруг галактического центра – 220 км/сек или 800 000 км/ч.)



# Орбитальные данные

Планета	Орбитальный период(дней)	Расстояние от Солнца (км)	Средняя орбитальная скорость(км/сек)	Средняя орбитальная скорость(км/ч)
Меркурий	87.97	$57.9 \times 10^6$	47.90	172 440
Венера	224.70	$108.3 \times 10^6$	35.02	126 072
Земля	365.26	$149.7 \times 10^6$	29.78	107 208
Марс	686.97	$228.1 \times 10^6$	24.08	86 688
Юпитер	4331.57	$778.7 \times 10^6$	13.07	47 052
Сатурн	10759.22	$1 430.1 \times 10^6$	9.69	34 884
Уран	30.799.10	$2 876.5 \times 10^6$	6.81	24 876
Нептун	60190.00	$4 506.6 \times 10^6$	5.43	19 558



# Активность 10: Модель поверхностных гравитаций

- Поверхностная гравитация,  $F = G M m / d^2$ , где  $m = 1$ ,  $d = R$ . Таким образом  $g = G M / R^2$ , где  $M = 4/3 \rho R^3$
- Заменяем:  $g = 4/3 \rho G R$



# Поверхностная гравитация

Планета	Экват. радиус	Плотность		Калк. гравит.	Реальная гравитация	
Меркур.	2 439 км	5.4 г/см <sup>3</sup>		0.378	3.70 м/сек <sup>2</sup>	0.37
Венера	6 052 км	5.3 г/см <sup>3</sup>		0.894	8.87 м/сек <sup>2</sup>	0.86
Земля	6 378 км	5.5 г/см <sup>3</sup>		1.000	9.80 м/сек <sup>2</sup>	1.00
Марс	3 397 км	3.9 г/см <sup>3</sup>		0.379	3.71 м/сек <sup>2</sup>	0.38
Юпитер	71 492 км	1.3г/см <sup>3</sup>		2.540	23.12 м/сек <sup>2</sup>	2.36
Сатурн	60 268 км	0.7 г/см <sup>3</sup>		1.070	8.96 м/сек <sup>2</sup>	0.91
Уран	25 559 км	1.2 г/см <sup>3</sup>		0.800	8.69 м/сек <sup>2</sup>	0.88
Нептун	25 269 км	1.7 г/см <sup>3</sup>		1.200	11.00 м/сек <sup>2</sup>	1.12
Луна					1.62 м/сек <sup>2</sup>	0.16

# Активность 11: Модель «ударных кратеров»

- Постелите на пол газеты во избежании беспорядка
- Возьмите коробку и насыпьте слой муки в 1-2 см. Выравните поверхность.
- Посыпьте поверхность сверху слоем какао в несколько миллиметров.
- С высоты двух метров уроните столовую ложку какао, чтобы создать следы похожие на кратеры.
- Мука может быть использована повторно в этом эксперименте



# Активность 12: вторая космическая скорость

- $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2$
- $E_{\text{pot}} = -GM_{\text{Planet}} m / R_{\text{Planet}}$
- $E_{\text{mec}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = 0$
- $g_{\text{planet}} = GM_{\text{planet}} / R_{\text{planet}}^2$

$$\text{То: } -GM_{\text{planet}} m / R_{\text{Planet}} + \frac{1}{2} mv^2 = 0$$

$$\frac{1}{2} mv^2 = g_{\text{planet}} m R_{\text{planet}}$$

Итого:

$$v = (2gR)^{1/2}$$

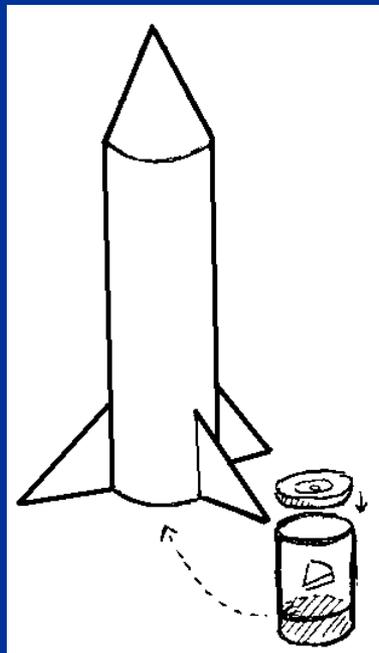


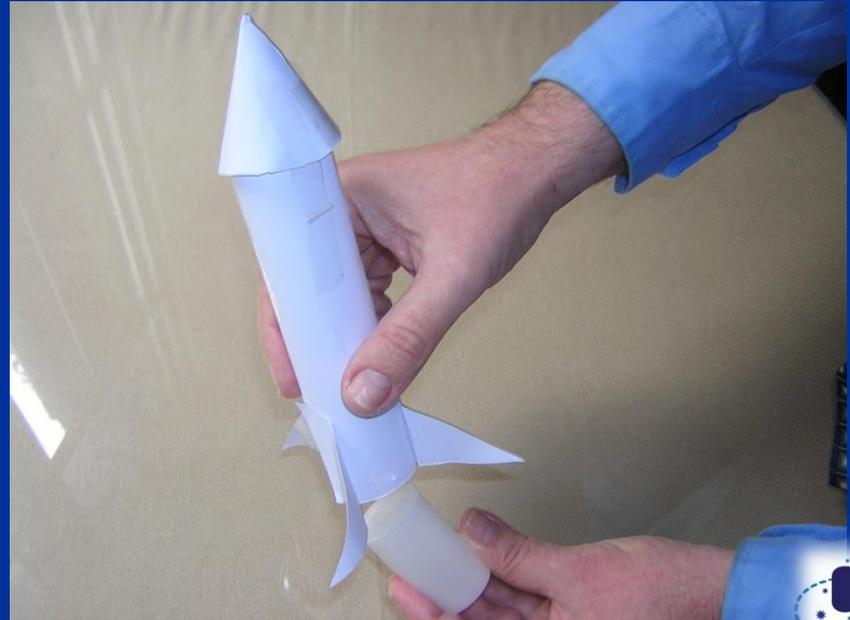
# Активность 12: вторая космическая скорость

Планета	Экватор. радиус	Поверхн. сила тяж.		Ускорение
Меркурий	2 439 km	0.378		4.3 km/s
Венера	6 052 km	0.894		10.3 km/s
Земля	6 378 km	1.000		11.2 km/s
Марс	3 397 km	0.379		5.0 km/s
Юпитер	71 492 km	2.540		59.5 km/s
Сатурн	60 268 km	1.070		35.6 km/s
Уран	25 559 km	0.800		21.2 km/s
Нептун	25 269 km	1.200		23.6 km/s

# Запуск ракеты

- Картон
- Упаковка от пленки
- $\frac{1}{4}$  Шипучий аспирин

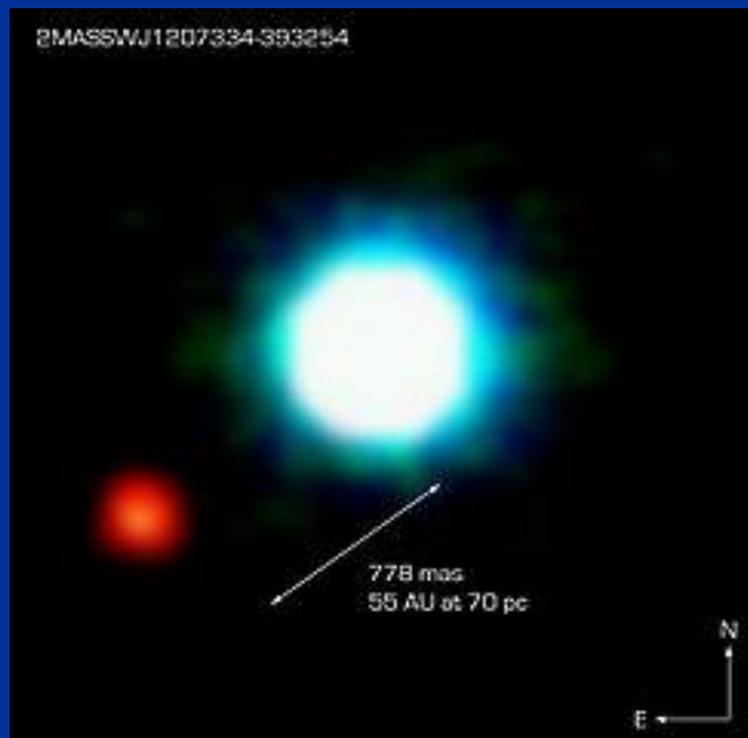




# Внесолнечные планетные СИСТЕМЫ



В 1995 Майкл Майор и Дидье Келоз  
объявили об обнаружении экзопланеты,  
вращающейся вокруг 51 пегаса.



Первое  
изображение  
экзопланеты  
16 марта 2003

2M1207b directly imaged (ESO)



# МЫ ЗАВИСИМ ОТ ТЕХНОЛОГИЙ



Галилей в 1610 году Сатурн впервые наблюдал Сатурн с помощью своего телескопа, но он не видел тонкого кольца, а интерпретировал его как звезду с тремя телами. Позже Гюйгенс (1659) обнаружил кольцо при помощи более мощного телескопа. По этой причине картина Рубенса (1636-1638) символизирует Сатурн с тремя объектами как увидел их Галилей.



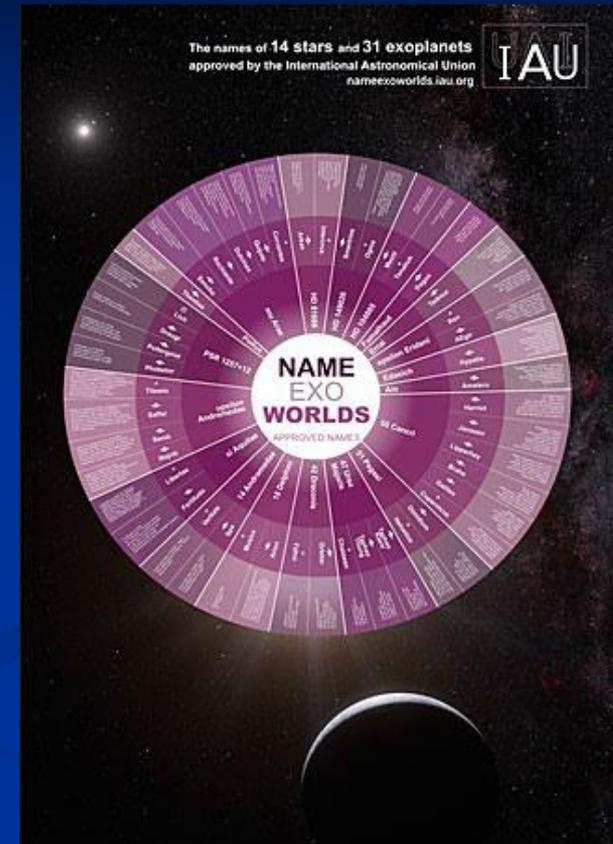
# Имена экзопланет

Буква помещается после названия центральной звезды, начинающейся с «b» для первой планеты, найденной в системе

(e.g. *51 Pegasi b*).

Планеты идут по алфавиту: c, d, e, f, и т.д.

(*51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e or 51 Pegasi f*).



# Методы обнаружения экзопланет

Используется различные методы:

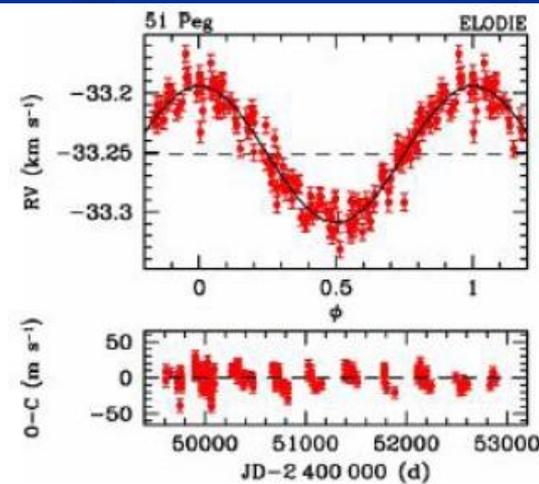
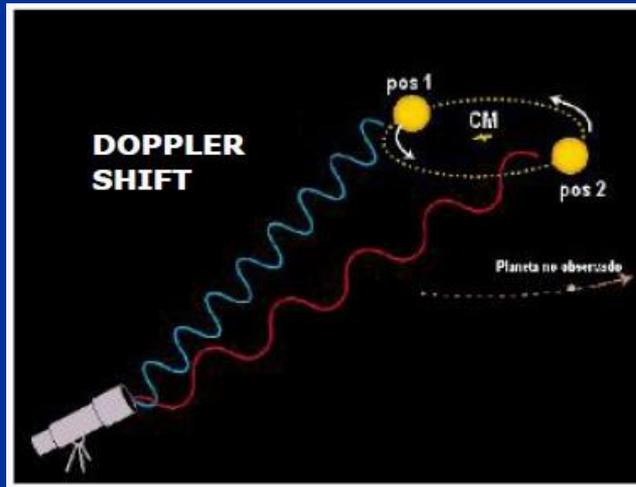
- ❑ Радиальная скорость и эффект Доплера
- ❑ Транзитный метод
- ❑ Микролинзирование
- ❑ Другие



# Метод радиальных скоростей

Изменение радиальной скорости звезды при вращении вокруг барицентра планеты и звездной системы измеряется с помощью эффекта Доплера.

Именно с помощью этого метода была обнаружена первая экзопланета 51 Pegasus b.

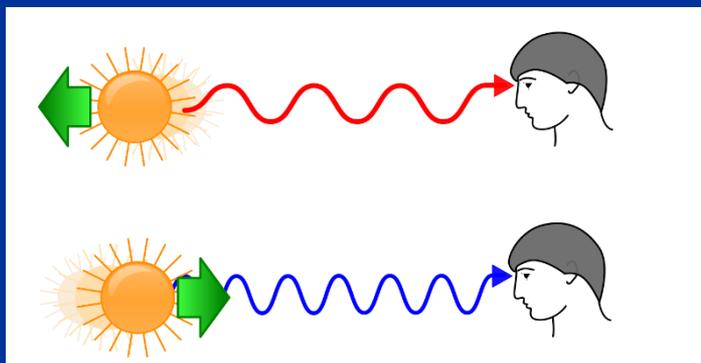


# Тема 13: Эффект Доплера

Эффект Доплера – это изменение длины волны света от движущегося источника, относительно длины волны неподвижного источника.

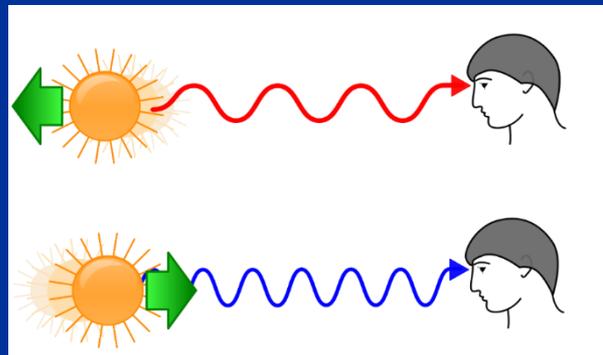
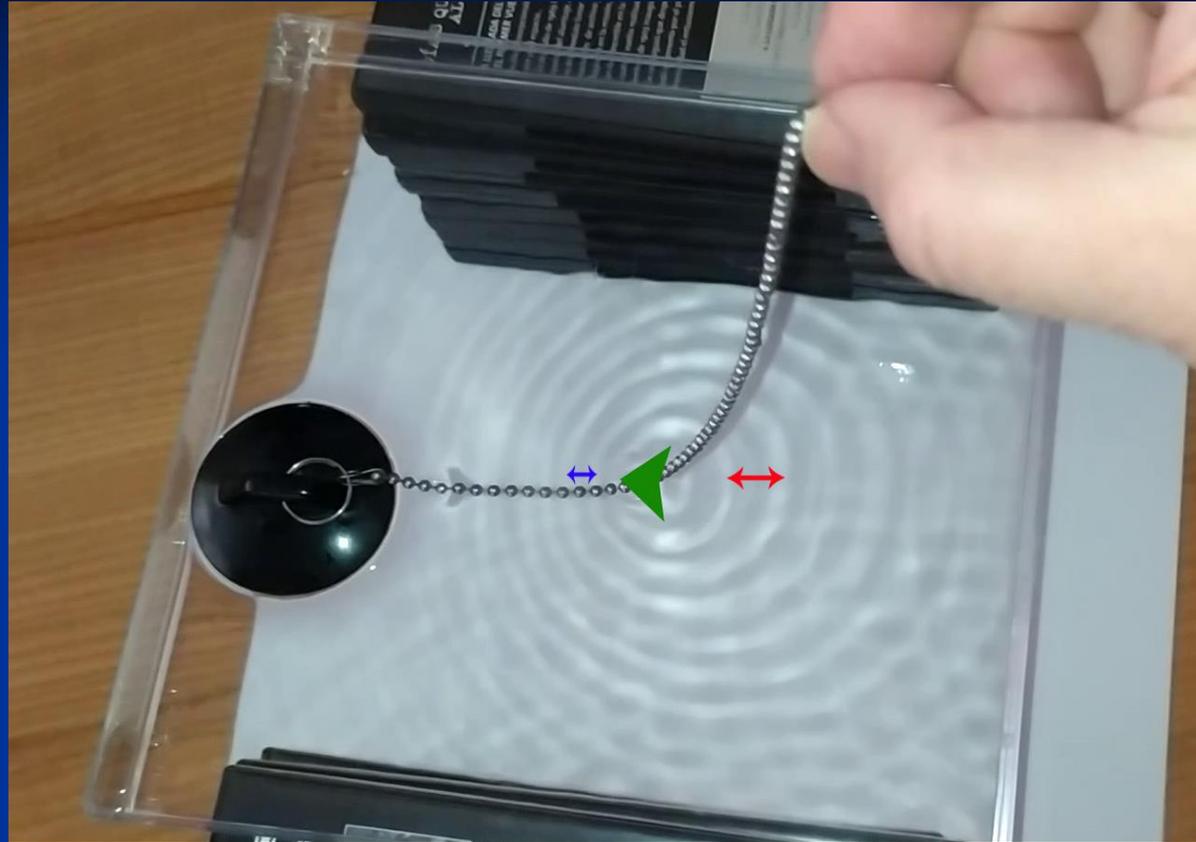
Когда источник приближается к нам, **длина волны уменьшается**, и наблюдаемый свет смещается в синюю часть видимого спектра.

Когда он удаляется от нас, **длина волны увеличивается**, и наблюдаемый свет смещается в красную часть видимого спектра.



# Тема 13: Эффект Доплера

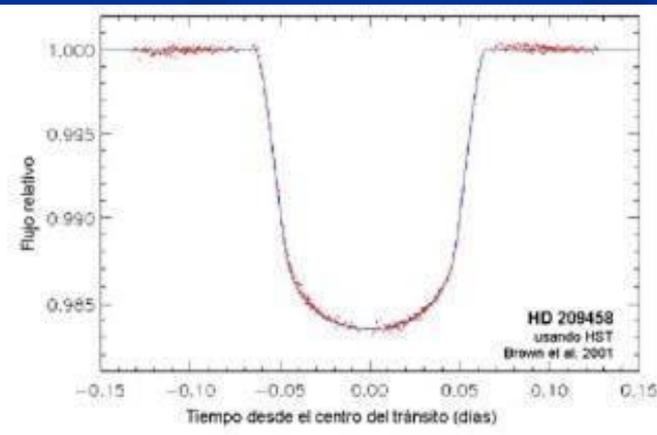
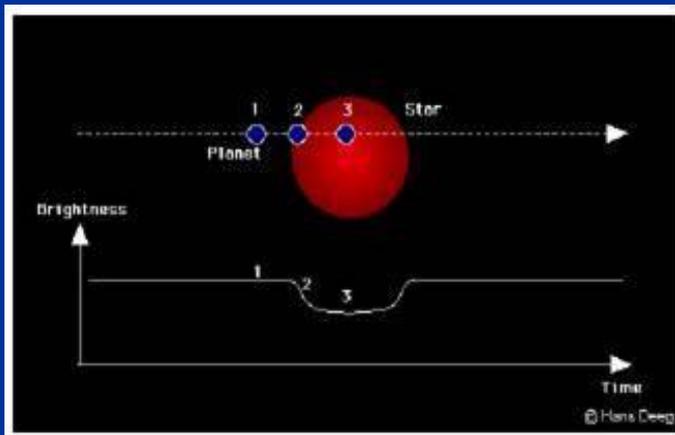
Эффект  
воспроизведен  
с помощью  
тазика с водой,  
пробки для  
ванны на  
цепочке и  
вспышки  
мобильного  
телефона.



# Транзитный метод

При прохождении экзопланеты, яркость звезды немного уменьшается.

Для звезд солнечного типа и планет размером с Юпитер, уменьшение яркости составляет примерно 1%, в случае планет размером с Землю уменьшение составляет около 0,03%.

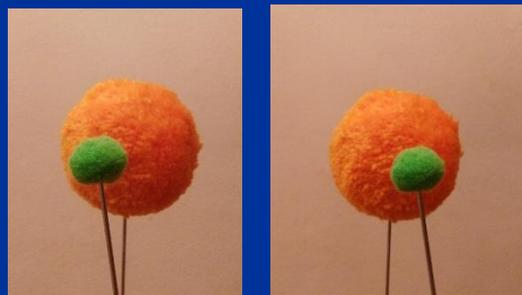


# Упражнение 14: Симуляция транзита

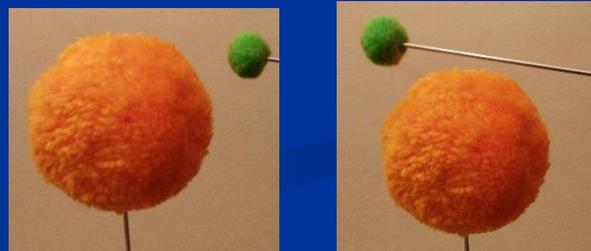
Используя два шара: один большой для звезды и один маленький для экзопланеты, вращающейся вокруг звезды.

Когда наблюдатель находится в одной плоскости орбиты и наблюдает момент транзита, то он увидит, что планета проходит перед звездой, и яркость звезды уменьшается.

Но если наблюдатель не находится в одной плоскости орбиты, никаких изменений в кривой яркости не будет наблюдаться.



Наблюдатель в плоскости

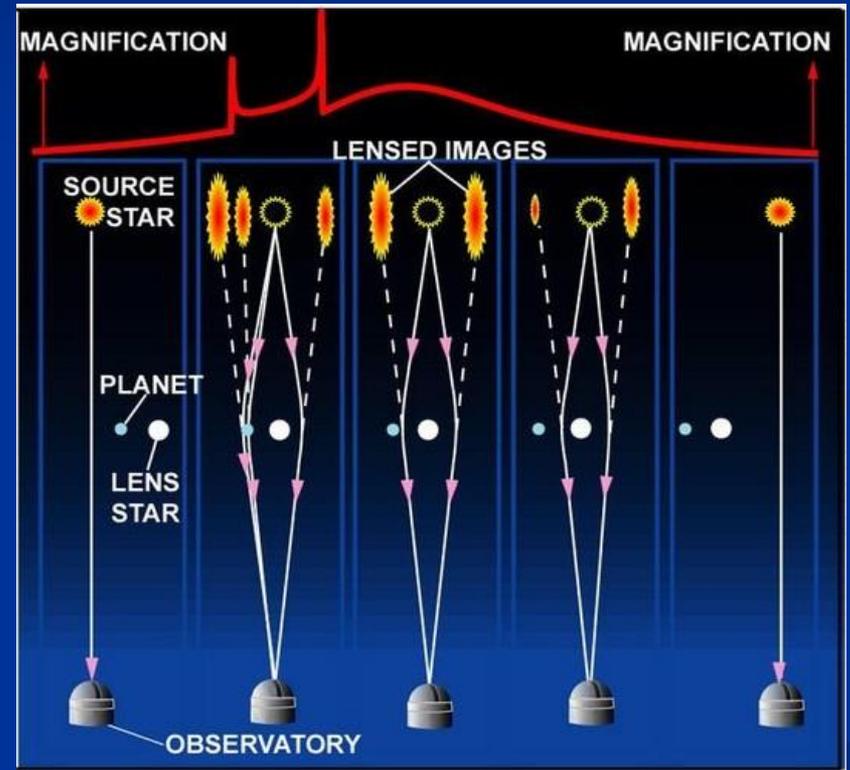


Наблюдатель вне плоскости



# Метод микролинзирования

Существует увеличение или искажение, которое показательно для системы звезда-экзопланета. Оно возникает при выравнивании системы со звездой или объектом, которые составляют гравитационную линзу.



Должно быть полное визуальное выравнивание между тремя телами (земля, объект-линза и звезда-экзопланета).

# Упражнение 15: Симуляция микролинзирования



С одним  
бокалом вина  
ничего не  
видно



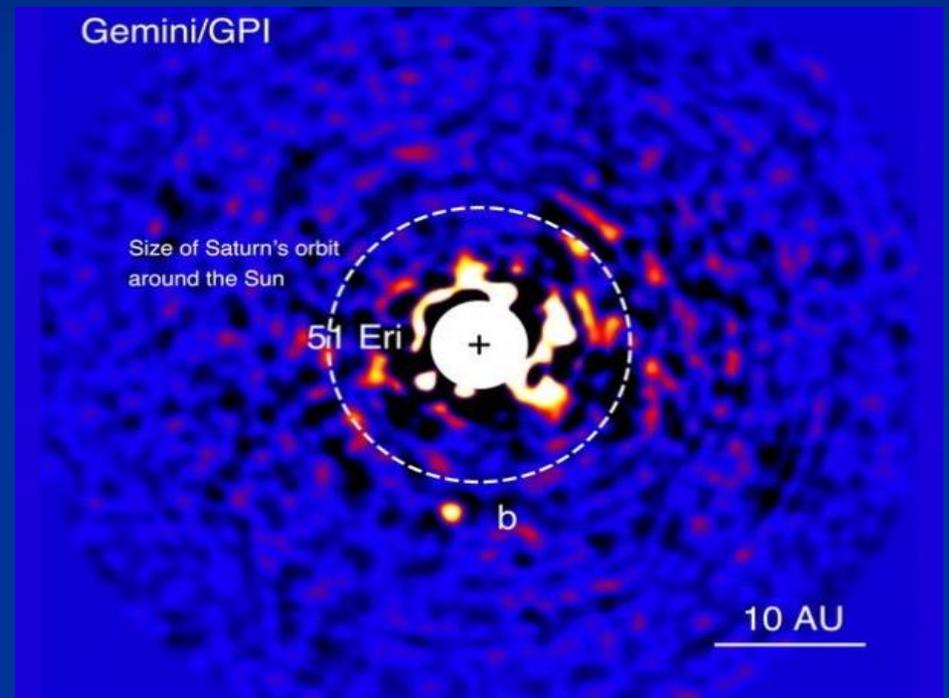
С двумя бокалами вина

Затем помещаем один над другим,  
и возникает точка, а затем даже  
две.



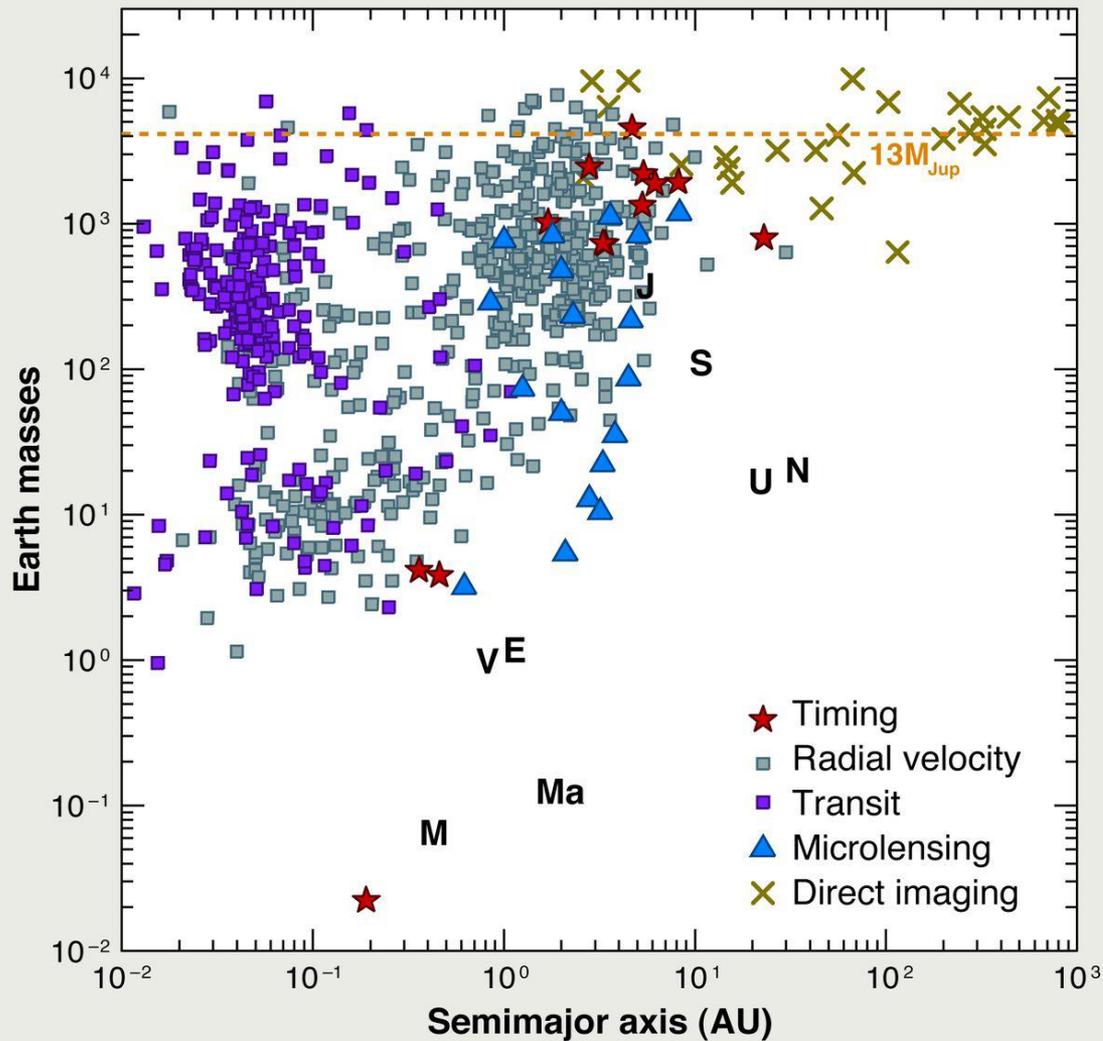
# Метод прямого наблюдения

Изображение звезды  
изучается для  
определения экзопланет  
вокруг нее.



Из-за количества света, испускаемого  
звездой, это не так легко осуществить.





Известные в  
2013 году  
экзопланеты  
по методу  
прямого  
обнаружения



# Модели экзопланетных систем

Подтверждено более 2000 экзопланетных систем и несколько тысяч кандидатов в экзопланеты.

Jet Propulsion Laboratory (NASA; <http://planetquest.jpl.nasa.gov/>)

Массы обнаруженных планет часто сравнивают с массой Юпитера

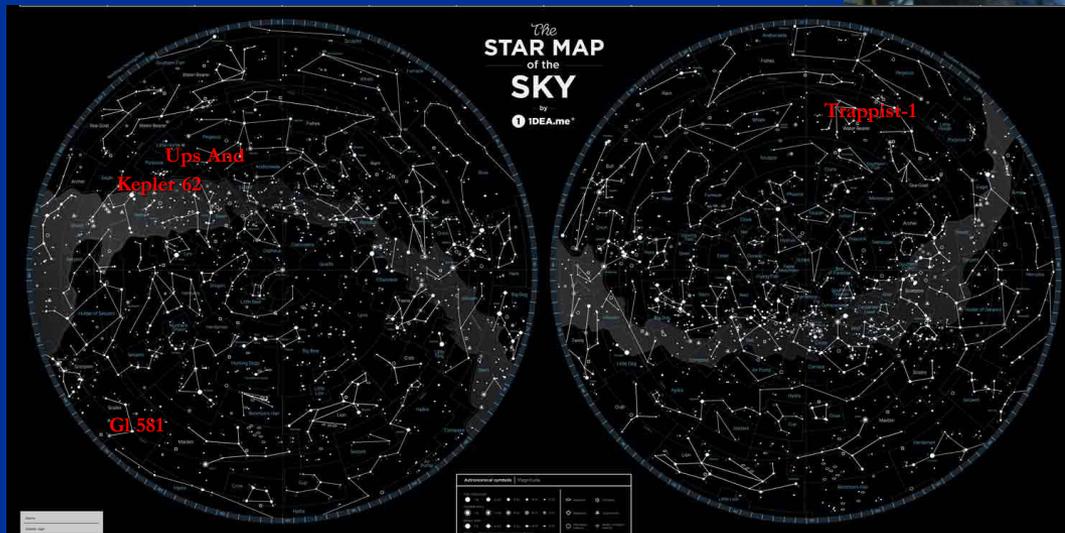
( $M_{\text{Ю}}$ ) ( $1.9 \times 10^{27}$  кг) или Земли ( $M_{\text{З}}$ ) ( $5.97 \times 10^{24}$  кг).



По технологическим ограничениям



# Упражнение 16: Масштабные модели ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ



Расстояние 1 АЕ = 1 м  
Диаметр 10000 км = 0.5 см



# Упражнение 16: строим Солнечную систему:

Solar System	Дистанция АЕ	Диаметр Км	Расстояние в модели	Диаметр в модели
Меркурий	0.39	4879	40 см	0.2 см
Венера	0.72	12104	70 см	0.6 см
<b>Земля</b>	<b>1</b>	<b>12756</b>	<b>1 м</b>	<b>0.6 см</b>
<b>Марс</b>	<b>1.52</b>	<b>6794</b>	<b>1.5 м</b>	<b>0.3 см</b>
Юпитер	5.2	142984	5 м	7 см
Сатурн	9.55	120536	10 м	6 см
Уран	19.22	51118	19 м	2.5 см
Нептун	30.11	49528	30 м	2.5 см

Диаметр материнской звезды G2V, диаметр Солнца, в модели 35

Расстояние <sup>см</sup> 1 АЕ = 1 м  
Диаметр 10000 км = 0.5 см



## Упражнение 16: строим первую экзопланетную систему:

Upsilon Andromedae Titawin	Год обнаружен ия	Расстояние АЕ	Диаметр Км	Расстояние в модели	Диаметр в модели
Ups And b/Saffar	1996	0.059	108 000	6 см	5.5 см
Ups And c/Samh	1999	0.830	200 000	83 см	10 см
Ups And d/Majriti	1999	2.510	188 000	2.5 м	9 см
Ups And e/Titawin e	2010	5.240	140 000	5.2 м	7 см

Материнская звезда Upsilon Andromedae F8V в 44 св. год  
диаметром 1.28 диаметра Солнца, в модели будет 45 см

Дистанция 1 АЕ = 1 м

Диаметр 10000 км = 0.5 см



# Упражнение 16: строим “земные” планеты

Gliese 581	Год открытия	Дистанция АЕ	Диаметр Км	Расстояние в модели	Диаметр в модели
Gl.581 e	2009	0.030	15 200	3 см	0.8 см
Gl.581 b	2005	0.041	32 000	4 см	1.6 см
Gl.581 c	2007	0.073	22 000	7 см	1.1 см

Материнская звезда Gliese 581 M2,5V в 20,5 св. год. в Libra, Диаметр 0.29 диаметра Солнца, в модели 10 см

Дистанция 1 АЕ = 1 м  
Диаметр 10000 км = 0.5 см



# Упражнение 16: строим обитаемые земные планеты

Kepler 62	Год открытия	Расстояние АЕ	Диаметр Км	Расстояние в модели	Диаметр в модели
Kepler-62 b	2013	0.056	33 600	5.6 см	1.7 см
Kepler-62 c	2013	0.093	13 600	9 см	0.7 см
Kepler-62 d	2013	0.120	48 000	12 см	2.4 см
Kepler-62 e	2013	0.427	40 000	43 см	2 см
Kepler-62 f	2013	0.718	36 000	72 см	1.8 см

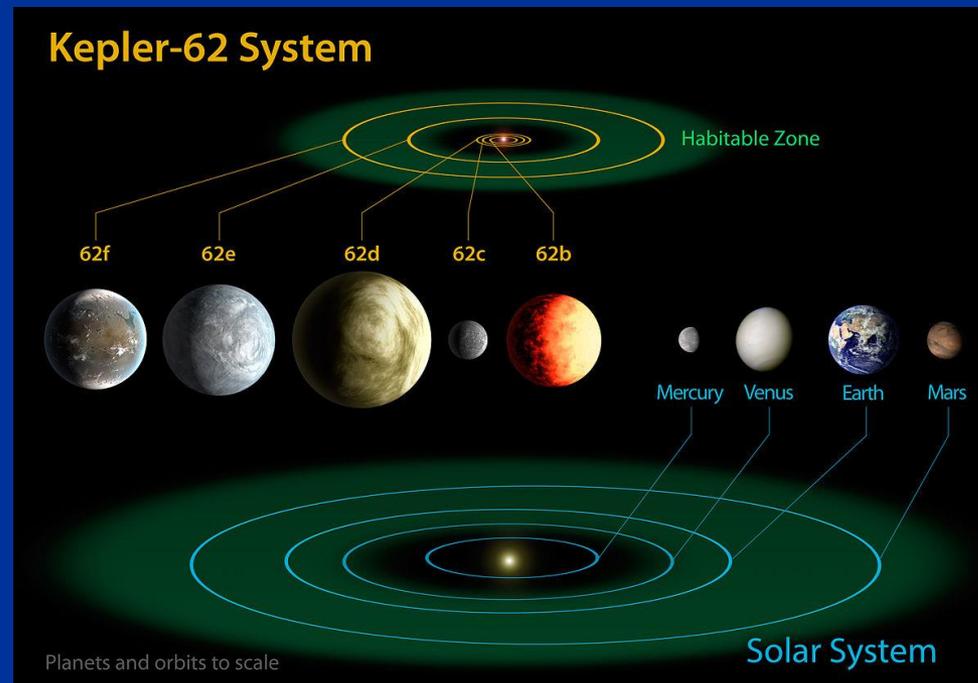
Материнская звезда Kepler 62 K2V в 1200 св. год. в Лур,  
диаметр 0.64 диаметра Солнца, в модели 22 см

Дистанция 1 АЕ = 1 м  
Диаметр 10000 км = 0.5 см



# Возможная обитаемость экзопланет

- В обитаемой зоне Кеплера-62 есть две экзопланеты, которые могли иметь жидкую воду на своих поверхностях. Для Kepler-62e, который находится вблизи внутренней части обитаемой зоны, это потребовало бы наличия облаков, которые отражали бы излучение, нагревающее поверхность. Кеплер-62f, с другой стороны, находится во внешней зоне обитаемой зоны



# Строим обитаемые “земные” планеты

Trappist-1	Год открытия	Дистнация АЕ	Диаметр км	Дистнация в модели	Диаметр в модели
Trappist-1 b	2016	0.012	28 400	1.2 см	1.4 см
Trappist-1 c	2016	0.016	28 000	1.6 см	1.4 см
Trappist-1 d	2016	0.022	20 000	2.2 см	1.0 см
Trappist-1 e	2017	0.030	23 200	3.0 см	1.2 см
Trappist-1 f	2017	0.039	26 800	3.9 см	1.3 см
Trappist-1 g	2017	0.047	29 200	4.7 см	1.5 см
Trappist-1 h	2017	0.062	19 600	6.2 см	1.0 см

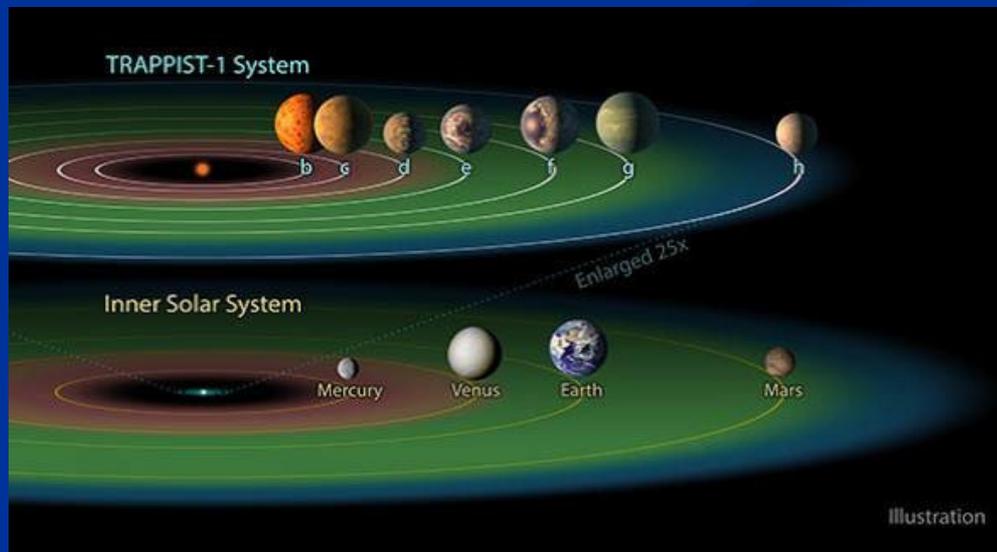
Материнская звезда Trappist 1 M8V в 40 св.год. в Aquarius,  
Диаметром 0.1 диаметра Солнца, размер в модели 4 см

Дистанция 1 АЕ = 1 м  
Диаметр 10000 км = 0.5 см



# Возможная обитаемость экзопланет

В системе Trappist-1 планеты скалистые и могут иметь большое количество воды на поверхности, или жидкости в виде пара или в виде ледяной корки. В зоне обитаемости Trappist-1e который, по-видимому, имеет плотное ядро, сравнимое с Землей, что, указывает на то, что из всех планет в этой системе, наиболее похож на Землю и, вероятно, имеет защитную магнитосферу.



# ВЫВОДЫ

- Более конкретное знание о планетах
- Взаимосвязи порождают “параметры”, которые позволяют лучше понять характеристики тел
- Солнечная система “пуста”
- Введение в теорию экзопланет. Знаем разные методы обнаружения.



Спасибо за  
внимание!

