

Planetas e exoplanetas

Rosa M. Ros, Hans Deeg

União Astronómica Internacional, Universidade Politécnica da Catalunha (Espanha), Instituto de Astrofísica das Canárias e Universidade de La Laguna (Espanha)

Resumo

Esta oficina fornece uma série de atividade para comparar as muitas propriedades observadas (como o tamanho, distâncias, velocidades orbitais e velocidade de escape) dos planetas no nosso Sistema Solar. Cada secção fornece contexto para diversas tabelas de dados planetários através de demonstrações ou cálculos para comparação das propriedades dos planetas, dando aos estudantes uma ideia concreta dos que os dados representam.

Atualmente, são usados vários métodos para procurar exoplanetas, mais ou menos de forma indireta. Já foi possível detetar aproximadamente 4 000 planetas, e cerca de 500 sistemas com múltiplos planetas.

Objetivos

- Compreender o significado dos valores numéricos da tabela resumo de dados do Sistema Solar.
- Compreender as principais características dos sistemas planetários extrassolares por paralelismo com o sistema orbital de Júpiter e dos seus satélites galileanos.

O Sistema Solar

Ao criar modelos à escala do Sistema Solar, os alunos são incentivados a comparar os diferentes parâmetros planetários. Para realizar esta atividade usaremos os dados da tabela 1.

Planeta	Diâmetro (km)	Distância ao Sol (km)
Sol	1 392 000	
Mercúrio	4 878	$57,9 \times 10^6$
Vénus	12 180	$108,3 \times 10^6$
Terra	12 756	$149,7 \times 10^6$
Marte	6 760	$228,1 \times 10^6$
Júpiter	142 800	$778,7 \times 10^6$
Saturno	120 000	$1 430,1 \times 10^6$
Urano	50 000	$2 876,5 \times 10^6$
Neptuno	49 000	$4 506,6 \times 10^6$

Tabela 1: Dados dos corpos do Sistema Solar

O principal objetivo do modelo é tornar os dados compreensíveis. Os milhões de km não são distâncias facilmente imagináveis, porém, se traduzidas para escalas de distância e tamanho os

alunos acham-nas mais fáceis de compreender.

Modelos do Sistema Solar

Modelos de diâmetros

Num grande papel (ou múltiplos papéis, se necessário) de cor amarela, recortar um círculo que representará o Sol. O sol terá 139 cm de diâmetro já que cada 1 cm representa 10 000 km. Recortar os diferentes planetas em cartolina e desenhar as suas características morfológicas. Colocando os planetas junto do disco solar os alunos poderão perceber as diferentes escalas planetárias.

Com uma escala de 1 cm por cada 10 000 km, usar os seguintes diâmetros: Sol 139 cm, Mercúrio 0,5 cm, Vénus 1,2 cm, Terra 1,3 cm, Marte 0,7 cm, Júpiter 14,3 cm, Saturno 12,0 cm, Urano 5,0 cm e Neptuno 4,9 cm.

Sugestão: o modelo anterior pode ser complementado pintando os planetas numa t-shirt, cumprindo a escala dos planetas e pintando apenas uma fração do Sol.



Fig. 1a e 1b: Exemplos de t-shirts com o Sol e os planetas à escala em diâmetros.

Modelo de distâncias

Por comparação das distâncias entre os planetas e o Sol é possível elaborar outro modelo para colocar num qualquer corredor da escola. Primeiro, basta cortar uma cartolina em tiras de 10 cm de comprimento, que uniremos para formar uma longa fita de vários metros (figura 2). A seguir, são colados, nas distâncias correspondentes, os nomes dos diferentes planetas.

Relembrar os estudantes que a distância entre os planetas não corresponde a uma escala de diâmetros. Na escala sugerida utilizado os planetas seriam mil vezes mais pequenos já que a escala é de 1 cm para cada 10 000 000 de km, enquanto na atividade anterior era de 1 cm para 10 000 km. Na escala de 1 cm para cada 10 000 000 de km as distâncias obtidas são: Mercúrio 6 cm, Vénus 11 cm, Terra 15 cm, Marte 23 cm, Júpiter 78 cm, Saturno 143 cm, Urano 288 cm e Neptuno 450 cm.



Fig. 2: Maquete de distâncias.

Sugestão: Uma variação interessante para este modelo consiste em usar um rolo de papel higiênico utilizando a escala de uma porção de papel para cada 20 milhões de km.

Modelo de diâmetros e distâncias

O desafio seguinte consiste em combinar as duas atividades anteriores e produzir um modelo que represente os corpos à escala assim como as correspondentes distâncias entre eles. Não é tão simples como parece encontrar uma escala que permita representar os planetas com objetos não sejam demasiado pequenos e em que as distâncias entre eles não sejam exageradamente grandes, já que nesse caso não seriam representáveis e o modelo seria pouco útil para os alunos. Como sugestão, é uma boa ideia usar o pátio da escola para fazer o modelo e usar bolas para os planetas já que existem bolas de diversos diâmetros.



Fig. 3: O Sol e os planetas do modelo de diâmetros e distâncias.

Oferecemos uma possível solução como exemplo. Num extremo do pátio colocamos uma bola de basquete de aproximadamente 25 cm de diâmetro que representa o Sol. Mercúrio será a

cabeça de uma agulha (1 mm de diâmetro) situada a 10 m do Sol. A cabeça de outra agulha, um pouco maior (2 mm de diâmetro) será Vénus a 19 m do Sol, enquanto a Terra será a cabeça de outra agulha como a anterior (2 mm) a 27 m do Sol. Marte é outra cabeça de agulha, um pouco menor (1 mm) situada a 41 m do Sol. Normalmente o pátio da escola termina aqui, se é que não acabou antes. Os seguintes planetas terão que estar postos noutros lugares fora do pátio, mas próximos da escola, para que os alunos conheçam as distâncias. Uma bola de pingue-pongue (2,5 cm de diâmetro) corresponde a Júpiter, a 140 m do Sol. Outra bola de pingue-pongue (2 cm de diâmetro) será Saturno, a 250 m do Sol. Um berlinde (1 cm de diâmetro) representará Urano, a 500 m do Sol, e outro berlinde (1 cm), situado a 800 m, será Neptuno.

É necessário ressaltar que este sistema planetário não cabe em nenhuma escola. Mas deve-se considerar que se reduzirmos as distâncias, os planetas seriam menores que a cabeça de uma agulha e praticamente seriam impossíveis de visualizar. Como tarefa final, os alunos podem calcular qual é a escala utilizada para elaborar este modelo.

Modelo na cidade

A ideia é simples: usar a escala de um mapa da localidade para imaginar as posições dos diferentes planetas, assumindo que o Sol está situado à porta da escola. Como exemplo, é apresentado o plano de Barcelona com diferentes objetos (frutas e legumes) que estariam postos nas diferentes ruas para, desta forma, podermos imaginar melhor as dimensões. Como exercício, sugere-se a realização do mesmo trabalho na própria localidade.

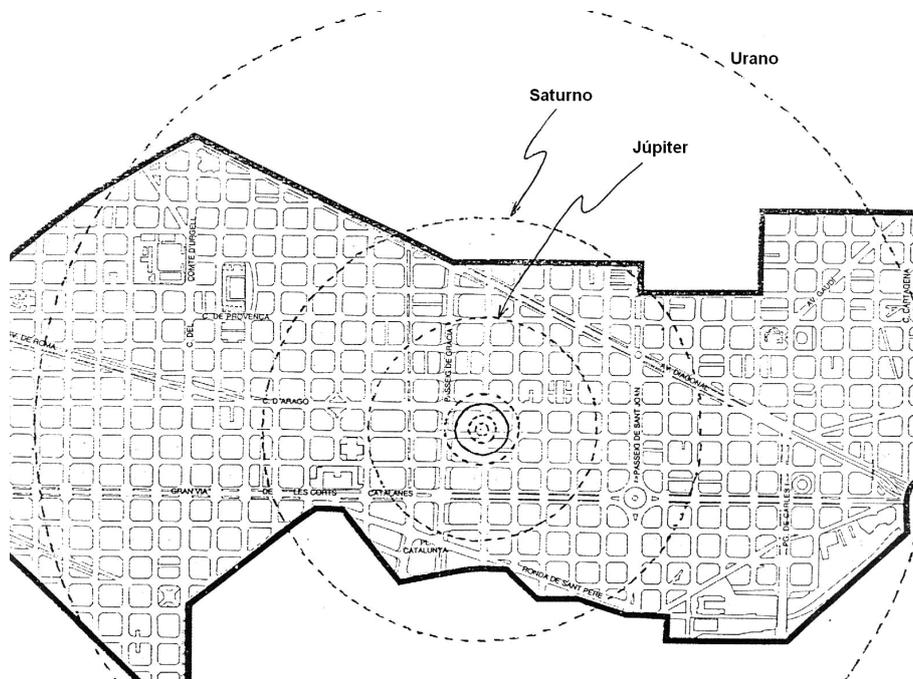


Fig. 4: Mapa ampliado de Barcelona com alguns planetas.

No mapa da figura, Mercúrio seria um grão de caviar, Vénus e a Terra ervilhas, Marte um grão de pimenta, Júpiter uma laranja, Saturno uma tangerina e Urano e Neptuno um par de nozes. Para o Sol, como não há nenhuma esfera vegetal suficientemente grande, os próprios alunos

terão que imaginar uma esfera do tamanho de uma máquina de lavar louça. Qualquer professor pode fazer o mesmo na sua própria localidade.



Fig. 5a e 5b: Fotos da cidade de Metz.

Na cidade de Metz (França) há um Sistema Solar disposto através das suas ruas e praças, com os correspondentes planetas acompanhados de painéis informativos para o transeunte.

Modelo de distâncias-luz

Em astronomia, é comum usar o ano-luz como unidade de medida, que facilmente é confundida com uma medida de tempo. Este conceito pode ser ilustrado usando um modelo do Sistema Solar. Como a velocidade da luz é $c = 300\,000$ km/s, a distância correspondente a 1 segundo-luz é de 300 000 km. Por exemplo, para a Lua, que está posicionada a 384 000 km, o tempo que a luz demora em chegar da Lua à Terra é de $384\,000 / 300\,000 = 1,3$ segundo.

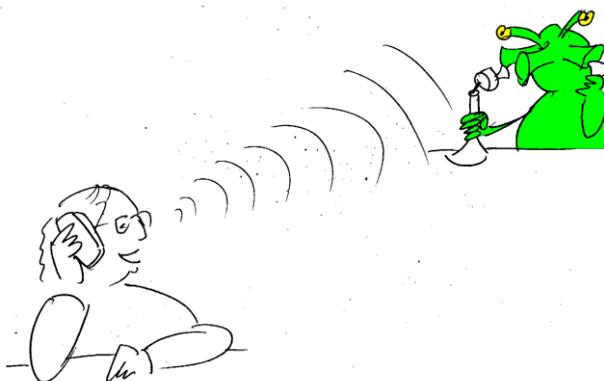


Fig. 6: Outro exemplo de modelo.

Usando estas unidades será solicitado aos alunos que calculem o tempo necessário para que a luz do Sol chegue a cada um dos planetas do Sistema Solar (como solução, aqui ficam os tempos solicitados: o tempo que a luz do Sol demora a chegar a Mercúrio que é de 3,3 minutos; a Vénus 6,0 min.; à Terra 8,3 min.; a Marte 12,7 min.; a Júpiter 43,2 min.; a Saturno 1,32 horas; a Urano

2,66 horas; e a Neptuno 4,16 horas). Poderá propor aos alunos que imaginem como seria uma videoconferência entre o Sol e um planeta à escolha.

Introduzimos também aqui a distância para a estrela mais próxima porque é útil para visualizar as enormes distâncias até às outras estrelas, o que é uma das razões para que seja tão difícil detetar planetas extrassolares. A mais perto de nós, Alpha Centauri, está a uma distância de 4,37 anos-luz, ou $4,13 \times 10^{13}$ km. Poderá solicitar aos alunos que calculem a distância para esta estrela em qualquer dos modelos previamente usados. No modelo do pátio da escola, com a escala de 1 cm para 56 000 km, a estrela estaria a uma distância de 7 375 km!

Modelo de tamanhos aparentes do disco solar a partir de cada planeta

De um planeta, por exemplo, a Terra, o Sol observa-se sob um ângulo α (figura 8). Para valores de α muito pequenos, toma-se $\tan \alpha = \alpha$ (em radianos).

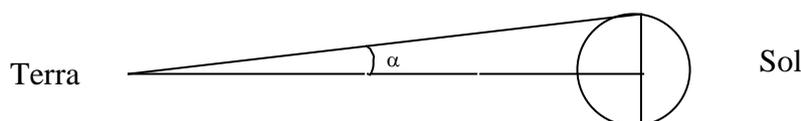


Fig. 7: O Sol é visto da Terra sob um ângulo α .

Sabendo que o diâmetro solar é de $1,4 \times 10^6$ km, ou seja, um raio de $0,7 \times 10^6$ km, e que a distância Terra-Sol é 150×10^6 km, deduz-se:

$$\alpha = \tan \alpha = \frac{0,7 \times 10^6}{150 \times 10^6} = 0,0045 \text{ radianos}$$

e em graus:

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

Ou seja, da Terra, o Sol é visto do tamanho $2 \times 0,255^\circ = 0,51^\circ$, isto é, aproximadamente meio grau. Repetindo o mesmo processo para cada um dos planetas, obtêm-se os resultados da tabela 2 e pode-se representar seu tamanho relativo (figura 9).

Planetas	$2 \tan \alpha$	2α ($^\circ$)	2α aproximado ($^\circ$)
Mercúrio	0,024	1,383	1,4
Vénus	0,012 9	0,743	0,7
Marte	0,006	0,352	0,4
Júpiter	0,0018	0,103 1	0,1
Saturno	0,000 979	0,057	0,06
Urano	0,000 48	0,027 86	0,03
Neptuno	0,000 3	0,017 8	0,02

Tabela 2: Tamanho do Sol a partir dos diferentes planetas.

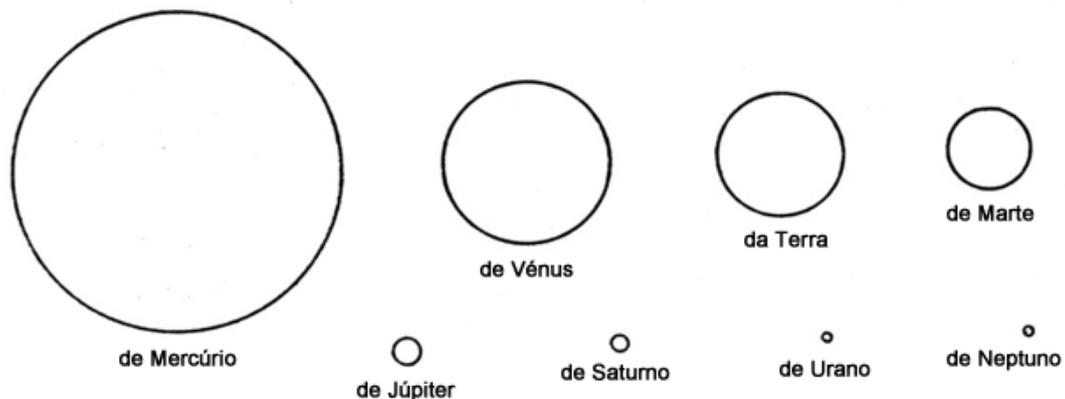


Fig. 8: O Sol visto de cada planeta: Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno.

Modelo de densidades

O objetivo deste modelo consiste em procurar amostras de materiais que sejam facilmente manipuláveis e que tenham uma densidade semelhante a cada um dos corpos do Sistema Solar, de modo a poder “sentir nas mãos”.

Planetas	Densidade (g/cm ³)
Sol	1,41
Mercúrio	5,41
Vénus	5,25
Terra	5,52
Lua	3,33
Marte	3,9
Júpiter	1,33
Saturno	0,71
Urano	1,3
Neptuno	1,7

Tabela 3: Densidades dos corpos do Sistema Solar.



Fig. 9: Modelo de densidades.

A partir da tabela 3, das densidades dos planetas, é simples comparar com as densidades de diversos minerais (em todas as escolas costuma haver uma coleção de materiais) ou alguns

casos usar amostras de outros materiais fáceis de encontrar, como o vidro, cerâmica, madeira, plásticos, etc. A seguinte tabela 4 apresenta alguns exemplos de materiais e densidades.

Minerais	Densidade	Outros materiais	Densidade
Gesso	2,3	Glicerina	1,3
Ortosa	2,6	Rolha	0,24
Enxofre	1,1 - 2,2	Alumínio	2,7
Halite	2	Ferro	7,86
Quartzo	2,65	Cimento	2,7 - 3,1
Bórax	1,7	Vidro	2,4 - 2,8
Blenda	4	Estanho	7,3
Pirita	5,2	Argila	1,8 - 2,5
Hematites	5,4	Baquelite	1,25
Calcite	2,7	Madeira de roble	0,90
Galena	7,5	Madeira de pino	0,55

Tabela 4: Exemplos de densidades de alguns materiais.

Em caso de utilizar outro tipo de material que não figure nesta tabela 4, é muito fácil calcular a sua densidade. Basta pegar uma porção deste material, pesá-lo para conhecer a sua massa, m , e introduzi-lo num recipiente de água e medir seu volume, V . A densidade, d , do material será,

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

Os alunos devem verificar que Saturno “flutuará” na água, porque a sua densidade é menor que 1.

Modelo de achatamento dos planetas

Para visualizar a deformação (achatamento) dos planetas gasosos devido à força centrífuga gerada pela sua rotação, construiremos um modelo simples.

Tal como pode ser visto na figura 10, com um pau de madeira e umas tiras de cartolina é possível construir este modelo simples que reproduz o achatamento dos planetas do Sistema Solar devido à rotação.

1. Recorte tiras de cartolina de 35×1 cm.
2. Amarre as duas extremidades das tiras de cartolina a um pedaço de madeira cilíndrico, de 50 cm de comprimento, fazendo com que não subam ou baixem pela parte superior, enquanto na parte inferior possam ser deslocados com liberdade ao longo do pedaço de madeira.
3. Gire o pau de madeira, movendo-o entre as duas mãos e fazendo um rápido movimento de rotação num sentido e depois no outro. Observe como a força centrífuga deforma as bandas de cartolina (figura 10) da mesma forma que atua sobre os planetas.



Fig. 10: Modelo para simular o achatamento.

Modelo dos períodos orbitais

Todos os planetas orbitam o Sol com diferentes velocidades e períodos orbitais (tabela 5). Sabendo o período e a distância média ao Sol pode-se deduzir a velocidade orbital média do planeta. Veja o exemplo do caso da Terra, mas que pode ser repetido para qualquer outro planeta.

O comprimento de uma revolução orbital é $L = 2 \pi R$, pelo que a velocidade orbital média é $v = \frac{L}{T} = \frac{2 \pi R}{T}$. Para a Terra o período é 365 dias, então $v = 2\,582\,750 \text{ km/dia} = 107\,740 \text{ km/h} = 29,9 \text{ km/s}$, onde a distância da Terra ao Sol, $R = 150 \times 10^6 \text{ km}$. De notar que o Sol também orbita o centro da galáxia com uma velocidade de 220 km/s , que é o mesmo que $800\,000 \text{ km/h}$.

Planeta	Período orbital (dias)	Distância ao Sol (km)	Velocidade orbital média (km/s)	Velocidade orbital média (km/h)
Mercúrio	87,97	$57,9 \times 10^6$	47,90	172 440
Vénus	224,70	$108,3 \times 10^6$	35,02	126 072
Terra	365,26	$149,7 \times 10^6$	29,78	107 208
Marte	686,97	$228,1 \times 10^6$	24,08	86 688
Júpiter	4 331,57	$778,7 \times 10^6$	13,07	47 052
Saturno	10 759,22	$1\,430,1 \times 10^6$	9,69	34 884
Urano	30 799,10	$2\,876,5 \times 10^6$	6,81	24 876
Neptuno	60 190,00	$4\,506,6 \times 10^6$	5,43	19 558

Tabela 5: Dados orbitais dos corpos do Sistema Solar.

O mais rápido é Mercúrio, o mais próximo do Sol, e o mais lento é Neptuno, o mais afastado. Os romanos já tinham observado que Mercúrio era o mais rápido de todos os planetas e por isso representaram-no como o mensageiro dos deuses, com asas nos pés. O período orbital, ou um “ano” em Mercúrio, dura apenas 88 dias. Mesmo através de observação a olho nu, durante

algumas semanas, é fácil comprovar que Júpiter e Saturno se movimentam mais lentamente relativamente às constelações zodiacais do que Vénus ou Marte.



Fig. 11a, 11b e 11c: Simulando o movimento circular dos planetas.

Existe uma forma simples de verificar a relação entre distância e período orbital.

Começamos por amarrar um objeto pesado, como uma noz, a um pedaço de corda. Segurando a corda pela outra extremidade, giraremos o objeto num movimento circular acima da nossa cabeça. Veremos que se soltarmos um pouco de corda (fazendo com que a corda que gire fique maior) o objeto demora mais tempo a completar um período orbital. Ao contrário, se puxarmos a corda (reduzindo o tamanho livre para girar) demora menos tempo.

Podemos preparar um modelo de Sistema Solar com nozes e pedaços de corda de comprimentos semelhantes aos raios das órbitas planetárias (supondo que todos viajam em movimento circular). Em vez de cortar um fio separado para cada planeta, use uma escala apropriada e meça as distâncias corretas, a partir do objeto pesado, e faça um nó em cada um desses pontos. Desta forma a corda pode ser agarrada pela localização de um nó enquanto se gira o objeto pesado.

Para usar o modelo é necessário segurar uma das cordas pela zona do nó e girá-la acima da nossa cabeça, num plano paralelo ao solo com a mínima velocidade possível para manter a órbita. Verificamos que o objeto necessita de menos tempo para uma rotação completa quando o raio é menor.

Modelo de gravidades superficiais

A fórmula da força gravitacional $F = G \frac{Mm}{d^2}$ permite calcular a gravidade superficial, g , que atua sobre a superfície de um planeta com massa M . Considerando a massa unidade ($m = 1$) na superfície do planeta ($d = R$, o raio do planeta), obtemos $g = \frac{GM}{R^2}$, onde G , a constante de gravitação universal, tem o valor de $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. Substituindo a massa do planeta por $M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$, onde ρ é a densidade do planeta e R o seu raio, então:

$$g = \frac{4}{3} \pi G \rho R$$

Substituindo estas duas últimas variáveis pelos valores listados na tabela 6 (após conversão do raio para metro e a densidade para kg/m^3 , com $1\,000\text{ kg/m}^3 = 1\text{ g/cm}^3$), é possível calcular o valor da gravidade superficial, g , para todos os planetas.

Planeta	R raio equatorial (km)	ρ densidade (g/cm^3)	g gravidade superficial (m s^{-2})
Lua	1 738	3,3	1,62
Mercúrio	2 439	5,4	3,70
Vénus	6 052	5,3	8,87
Terra	6 378	5,5	9,81
Marte	3 397	3,9	3,71
Júpiter	71 492	1,3	24,8
Saturno	60 268	0,7	8,96
Urano	25 559	1,2	8,69
Neptuno	25 269	1,7	11,00

Tabela 6: Tamanho, densidade e gravidade superficial dos corpos do Sistema Solar.

Vejamos alguns exemplos,

$$g_{\text{Mercúrio}} = \frac{4}{3} \pi \times G \times 2\,439 \times 10^3 \text{m} \times 5\,400 \text{kg m}^{-3} = 3,7 \text{ m s}^{-2}$$

$$g_{\text{Vénus}} = \frac{4}{3} \pi \times G \times 6\,052 \times 10^3 \text{m} \times 5\,300 \text{kg m}^{-3} = 8,9 \text{ m s}^{-2}$$

De forma semelhante é possível calcular g para os restantes planetas. Tal como na tabela 7, a gravidade à superfície é muitas vezes expressa relativamente à da Terra, indicada pela letra g .

Modelo das balanças de casa de banho

O objetivo deste modelo consiste em preparar um conjunto de 9 balanças de casa de banho (8 planetas e a Lua) para que os estudantes possam simular a sua pesagem em cada um dos planetas e na Lua.

Como o procedimento é semelhante para cada planeta, apenas será explicado para um deles. Essencialmente, a ideia é abrir uma balança de casa de banho e substituir o disco com as marcações por outro com os novos pesos, que serão marcados sobre o círculo, calibrados para um determinado planeta.

1. Primeiro abra a balança. Na maioria dos modelos há duas molas que fixam a base. Lembre-se que é necessário montar tudo novamente (figuras 12a e 12b).
2. Após aberta a balança, é necessário substituir o disco de pesos, ou desenhar por cima, apropriados para o outro planeta.
3. Na tabela seguinte estão as gravidades superficiais da Lua e dos diferentes planetas do Sistema Solar. Numa coluna, estão em valores absolutos (m s^{-2}) e na outra em valores relativos à gravidade terrestre. Estes valores são os que devem aplicar-se às unidades de peso “terrestres” da balança para converter nos valores correspondentes a outro planeta.
4. Finalmente, é necessário fechar a balança de novo, para se poder pesar nesse planeta.

	Gravidade (m s^{-2})	Gravidade (relativamente à Terra)
Lua	1,62	0,16
Mercúrio	3,70	0,37
Vénus	8,87	0,86
Terra	9,81	1,00
Marte	3,71	0,38
Júpiter	24,79	2,53
Saturno	8,96	0,91
Urano	8,69	0,88
Neptuno	11,00	1,12

Tabela 7: Gravidades superficiais, absolutas e relativas, para cada corpo do Sistema Solar.



Fig.12a e 12b: Balança de casa de banho com o disco substituído.



Fig. 13: Modelo do Sistema Solar com balanças de casa de banho.

Modelos de crateras

A maioria das crateras do Sistema Solar não tem origem vulcânica mas são o resultado da queda de meteoroides sobre a superfície dos planetas e satélites.

1. Primeiro cubra o chão com jornais velhos para não o sujar.
2. Coloque, dentro de uma bandeja, uma camada de 2 a 3 cm de farinha, distribuindo-a com uma peneira para que a superfície fique bem lisa.
3. Coloque uma camada de alguns milímetros de cacau em pó, sobre a farinha, com a ajuda de uma peneira (figura 14a).
4. De uma altura de cerca de 2 metros, deixe cair o projétil: uma colher de sopa de cacau em pó. Ao cair deixará marcas semelhantes às crateras de impacto (figura 14b).
5. Pode querer experimentar com variações de altura, do tipo, da forma ou da massa dos projéteis, etc. É possível conseguir, inclusive, um pico central de uma cratera.



Fig. 14a: Simulando crateras.



Fig. 14b: Crateras resultantes.

Modelos de velocidades de escape

Se a velocidade de lançamento de um foguetão não for muito grande, a força gravitacional do próprio planeta fá-lo-á cair novamente sobre a sua superfície. Se a velocidade de lançamento for suficientemente grande o foguetão escapa do campo gravitacional do planeta. Calculemos a velocidade acima da qual o foguetão poderá escapar, isto é, a velocidade mínima de lançamento ou velocidade de escape.

Considerando as fórmulas do movimento uniformemente acelerado, onde e é o espaço percorrido e a a aceleração,

$$e = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t$$

$$v = a t + v_0$$

Se substituirmos a aceleração por g e for considerarmos nula a velocidade inicial, v_0 , verificamos que na superfície do planeta $R = \frac{1}{2} g t^2$, e também que, $v = g t$. Eliminando a variável tempo,

$$v = \sqrt{2 g R}$$

onde podemos substituir os valores de g e R pelos que figuram na tabela 6, para calcular a velocidade de escape para cada planeta.

Mas também pode ser deduzida de outra forma. A velocidade de escape depende da forma do potencial gravítico no qual o projétil se desloca. Por isso, na superfície de um corpo celeste, a velocidade de escape depende apenas da altura do ponto de lançamento.

A velocidade de escape não depende da massa nem da direção de lançamento do projétil, e a sua dedução pode ser efetuada em termos puramente energéticos.

Para calcular a velocidade de escape, as seguintes expressões relacionadas com a energia potencial e energia cinética são usadas:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \qquad E_p = -G \frac{M m}{R}$$

Considerando o princípio da conservação da energia, se estabelecermos a condição de que o objeto se afasta para uma distância infinita e permanece em repouso, resulta que:

$$\frac{1}{2} m v_e^2 - G \frac{M m}{R} = 0$$

E resolvendo em função da velocidade:

$$v_e = \sqrt{\frac{2 G M}{R}} = \sqrt{2 g R}$$

Como exemplo, calculamos a velocidade de escape de alguns planetas. Para Terra,

$$v_{Terra} = \sqrt{2 g R} = \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m s}^{-2} \times 6\,378 \times 10^3 \text{ m}} = 11\,186 \text{ m/s} \approx 11,2 \text{ km/s}$$

De forma semelhante, para o planeta mais pequeno, Mercúrio,

$$v_{Mercúrio} = \sqrt{2 \times 3,78 \text{ m s}^{-2} \times 2\,439 \times 10^3 \text{ m}} = 4\,294 \text{ m/s} \approx 4,3 \text{ km/s}$$

E para o maior planeta, Júpiter,

$$v_{Júpiter} = \sqrt{2 \times 23,1 \text{ m s}^{-2} \times 71\,492 \times 10^3 \text{ m}} = 57\,471 \text{ m/s} \approx 57,5 \text{ km/s}$$

É evidente que é mais fácil lançar um foguetão a partir de Mercúrio do que da Terra, mas é mais difícil lançar um foguetão a partir de Júpiter, onde a velocidade de escape é de cerca de 60 km/s.

(Para poder comparar os resultados acrescentamos que os valores das velocidades de escape aceites para cada corpo do Sistema Solar são os seguintes: Mercúrio 4,3 km/s, Vénus 10,3 km/s, Terra 11,2 km/s, Marte 5,0 km/s, Júpiter 59,5 km/s, Saturno 35,6 km/s, Urano 21,2 km/s e Neptuno 23,6 km/s. Como se pode observar, os nossos cálculos, simples, fornecem resultados aceitáveis).

Modelo de foguete com uma pastilha efervescente

Como exemplo de um foguete que pode ser lançado, em segurança numa sala de aula, propomos o seguinte foguetão que usa como propulsor uma aspirina ou uma pastilha efervescente. Começamos por recortar o modelo pelas linhas contínuas e colar nas linhas tracejadas, de acordo com a fotografia.

Usaremos uma cápsula de plástico, como as de guardar comprimidos ou comida para peixes, depois de confirmar que cabe dentro do cilindro do foguetão. Depois colamos os três triângulos como suportes do corpo do foguetão e, finalmente, acrescentamos o cone na parte superior do cilindro (figuras 15a, 15b, 15c, 15d, 16, 17, 18a, 18b e 18c).



Fig. 15a, 15b, 15c e 15d: O processo, em quatro fotos.

Após finalizar a construção do foguetão, é necessário realizar o lançamento. Para isso colocaremos água dentro da cápsula de plástico, até cerca de $\frac{1}{3}$ da sua altura (aproximadamente 1 cm). Acrescentamos $\frac{1}{4}$ da aspirina efervescente (ou outra pastilha efervescente). Colocamos a tampa e o foguete em cima. Após aproximadamente 1 minuto o

foguete descola. Evidentemente que podemos repetir tantas vezes quanto se desejar (ainda sobram 3/4 de aspirina, por isso aproveitem lançando foguetes...). Também é possível lançar foguetões usando bicarbonato de sódio e vinagre.



Fig. 16: Vários foguetes.

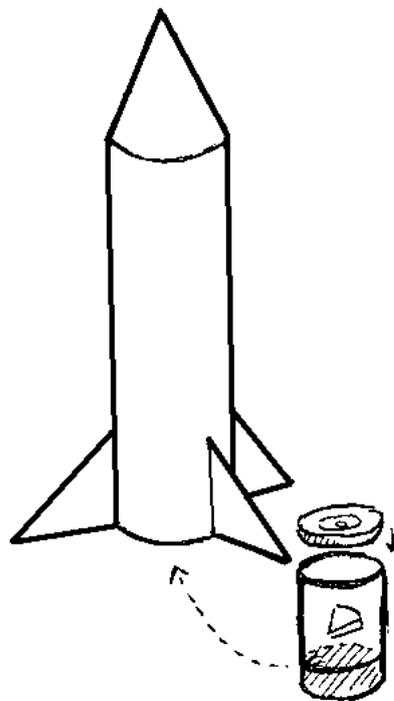


Fig. 17: Esquema simplificado.

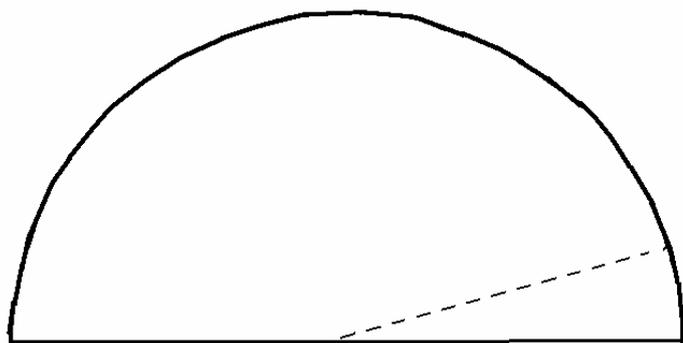
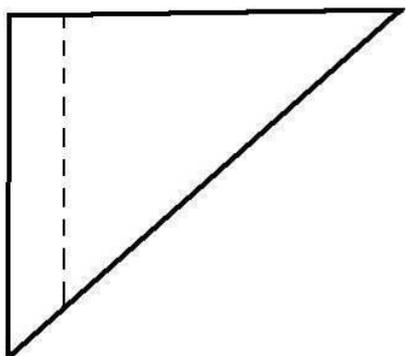


Fig. 18a: Cone superior do foguete , Fig. 18b: Modelo para as três asas.

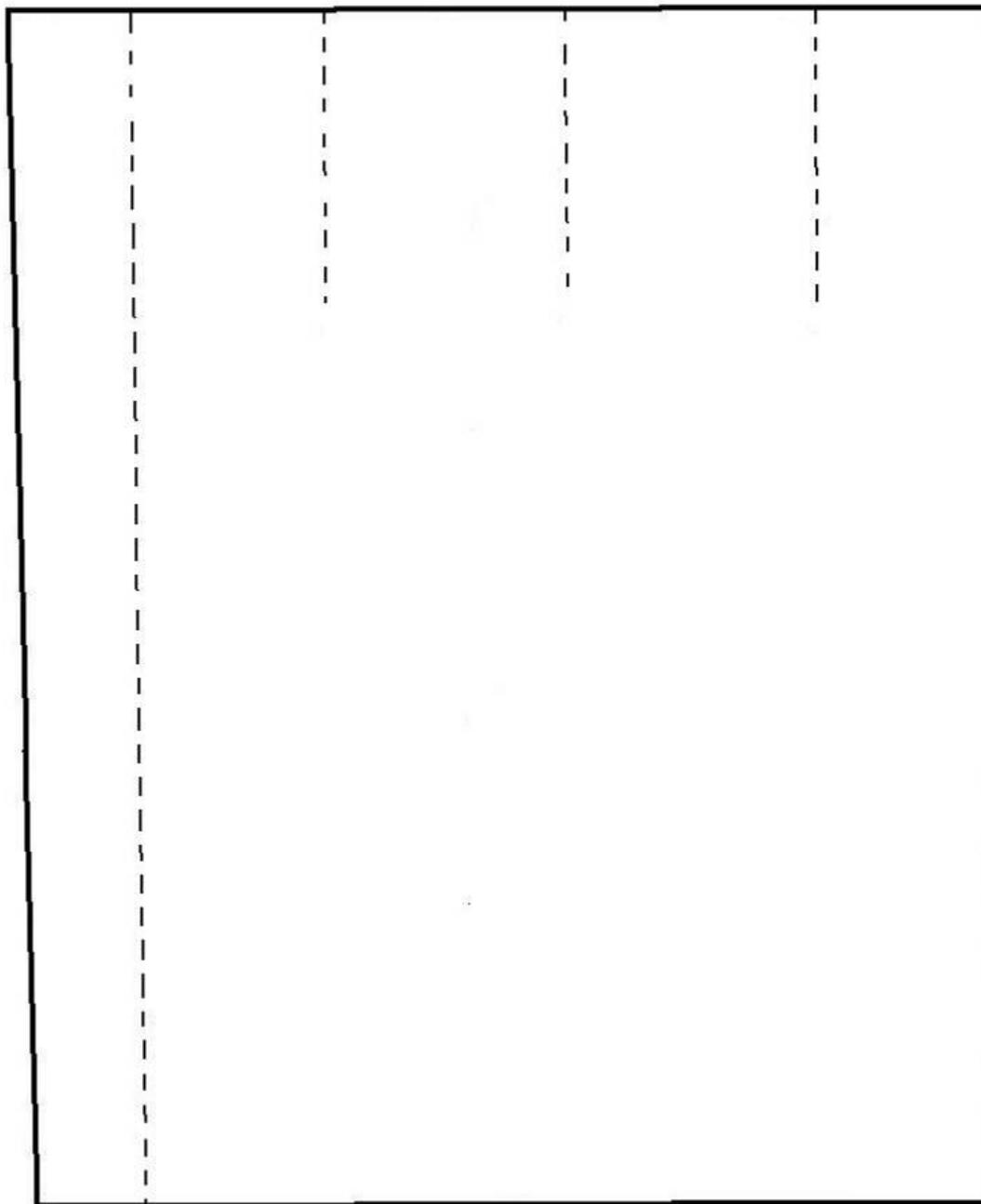


Fig. 18c: Corpo do foguete. É necessário colar as asas na zona pontilhada.

Exoplanetas

Até ao momento, os astrónomos detetaram cerca de 4 000 planetas e 500 sistemas planetários múltiplos. Um exemplo de um dos primeiros planetas a ser fotografados diretamente é mostrado na figura 19.

Todos os tópicos desta oficina são parte da evolução tecnológica que permite avanços nesta área. Alguns aspetos poderão vir a ser menos importantes, no futuro, mas é bom levá-los até às

escolas. Este é o campo em constante avanço e alguns dos conteúdos poderão necessitar de atualização.

Consideremos um exemplo da história da astronomia. Em 1629 Galileu observou Saturno pela primeira vez. Ele não compreendeu que o objeto era um planeta rodeado por um fino anel. Na verdade, interpretou-o como um agrupamento de estrelas com três componentes. Tivemos de esperar pelas observações de Huygens, com um telescópio melhor, para definir o planeta e o sistema de anéis. Durante anos a comunidade científica interpretou erradamente a estrutura de Saturno. Um exemplo disto é observável na pintura de Rubens de 1636-1638, que representa Saturno como três estrelas, em consonância com as recentes descobertas de Galileu.

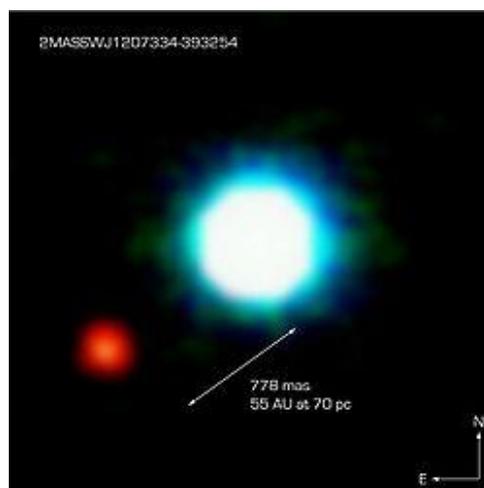


Fig. 19: O primeiro planeta (2M1207b) observado diretamente, a 16 de março de 2003, com um dos telescópios de 8m do VLT do ESO. Tem uma massa de 3-10 vezes a de Júpiter e orbita a 41 ua da sua estrela central que é uma anã castanha. Em 2006, foi encontrado um disco de poeira em torno da estrela central, dando evidências da formação contínua de planetas neste sistema jovem (Fonte: ESO).

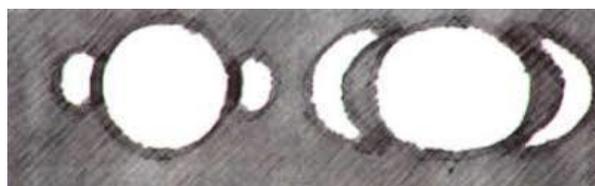


Fig. 20a e 20b: Saturno de acordo com Rubens (1636-1638) e desenho feito por Galileu em 1610.

Da mesma forma, é bom lembrar que Ceres foi considerado planeta no século XIX (de 1801 a 1850) mas foi posteriormente classificado como asteroide. Também, quando Plutão foi descoberto em 1930 foi classificado como planeta. No entanto, em 2006 foi reclassificado como um planeta anão, com Ceres. Certamente, no futuro, algum do atual conhecimento sobre exoplanetas terá que ser reconsiderado, mas isso não deve impedir-nos de introduzir este tópico nos centros educacionais.

Nomenclatura de exoplanetas

Um planeta extrassolar, ou exoplaneta, é considerado um planeta que orbita uma estrela que não o Sol e, por isso, não pertence ao nosso sistema. A NASA mantém um catálogo (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) com mais de 4 000 exoplanetas confirmados em 2019. A nomenclatura de um exoplaneta é simples e semelhante ao usado para estrelas binárias. Uma letra minúscula é colocada depois do nome da estrela, começando pela letra “b” para o primeiro planeta descoberto no sistema (por exemplo: 51 Pegasi b). O seguinte planeta detectado no sistema é nomeado com a seguinte letra do alfabeto c, d, e, f, etc. (por exemplo: 51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e or 51 Pegasi f). Então, a ordem das letras não tem que ver com o período orbital dos planetas, ou de qualquer outro parâmetro. Mais, em 2015, a União astronômica Internacional (UAI) atribuiu nomes aos primeiros 19 sistemas exoplanetários descobertos. Por isso, no sistema estelar Upsilon Andromedae (ver Tabela 8), a estrela principal (Ups And) tem o nome alternativo *Titawin*, e os planetas b, c e d serão chamados *Saffar*, *Samh* e *Makriti*. Atualmente, esses nomes não estão ainda em uso nem na comunidade profissional nem amadora de astrónomos.

Deteção de sistemas exoplanetários

A distância para Alpha Centauri, ou Proxima Centauri, a estrela mais perto de nós e que é de apenas 4,5 anos-luz, é enorme comparada com a distância aos planetas dos Sistema Solar. De facto, Alpha Centauri é cerca de 10 000 vezes mais afastada que Neptuno, o planeta mais distante. Estas enormes distâncias fizeram com que a deteção de planetas em torno de outras estrelas impossível até que técnicas de observação sofisticadas fossem desenvolvidas, no final do século passado.

A terceira estrela mais brilhante no céu á a Alpha Centauri. Alpha Centauri é, na realidade, um sistema triplo de estrelas. Consiste num binário, Alpha Centauri A e B, e uma estrela anã mais perto de nós, chamada Proxima Centauri. É em redor desta terceira estrela, do tipo anã vermelha, que um planeta rochoso foi detetado e que poderá ter algumas semelhanças com a Terra: Proxima b, que é o mais recente exoplaneta a ter noma, o mais perto da Terra que é conhecido, mas que ainda não foi observado diretamente. A responsabilidade da sua descoberta deve-se à observação de uma pequena anomalia na órbita da estrela, causada pela influência gravitacional do planeta. Este distúrbio serviu para deduzir a presença do planeta e algumas das suas características. Ele dá uma volta em torno do seu sol em apenas 11 dias, é ligeiramente maior que a Terra e provavelmente terá uma superfície sólida.

Uma característica importante deste exoplaneta é a sua proximidade à sua estrela anfitriã, Proxima Centauri. É 5% da distância que separa a Terra do Sol, que é cerca de 0,05 ua. Esta proximidade faria com que fosse um inferno em chamas se a estrela fosse como o nosso Sol. No entanto o seu sol é uma anã vermelha e por isso o planeta encontra-se na zona habitável. Isto acontece porque uma anã vermelha como Proxima Centauri, com 12% da massa solar, tem um brilho de apenas 0,1% do Sol. Com estas características, o novo planeta poderá ter uma temperatura de 40 graus negativos sem efeito de estufa devido a uma possível atmosfera, que poderá aumentar a temperatura para uns graus acima do ponto de congelação da água.

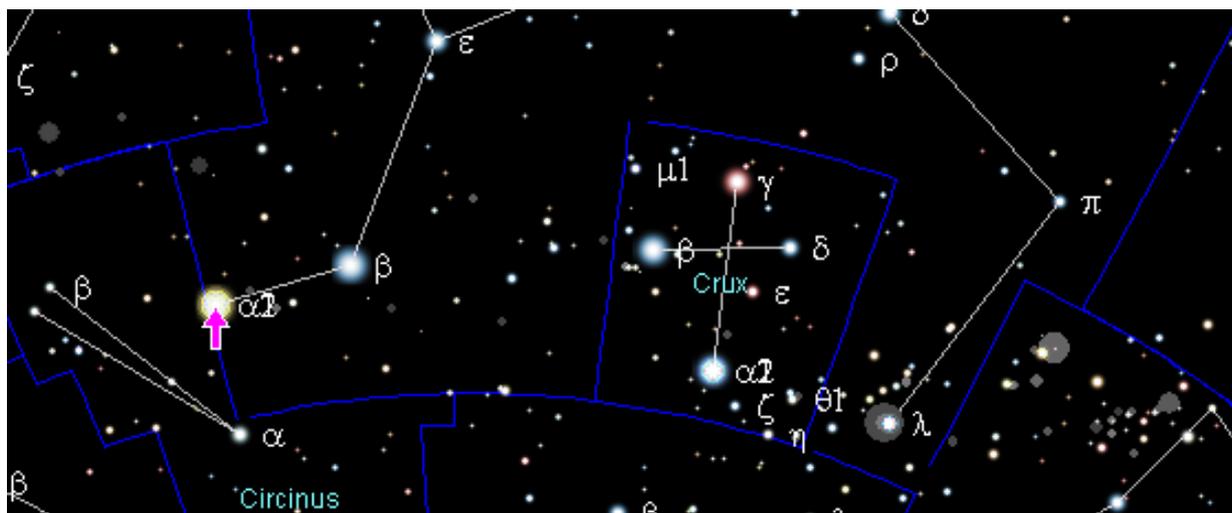


Fig. 21: Alpha Centauri perto da Cruzeiro do Sul.

Uma das desvantagens da presença de vida nesses sistemas planetários em torno de uma anã vermelha é que os planetas precisam estar muito perto da estrela para ter uma temperatura na qual a água possa existir no estado líquido. Quando isso acontece, na maioria dos casos, há um fenómeno chamado rotação síncrona que vemos na nossa Lua. O tempo orbital e o tempo de rotação são equivalentes e o planeta sempre mostra a mesma face para a estrela. Isso sugeriria um hemisfério abrasador no qual a atmosfera evaporou e no outro congelou. No entanto, uma atmosfera mais densa que a da Terra permitiria que essas temperaturas extremas fossem moderadas através da circulação atmosférica e da redistribuição de calor.

Métodos das velocidades radiais

Atualmente existem dois métodos dominantes na descoberta de exoplanetas. São ambos indiretos, onde a presença de um sistema planetário é inferida da observação da estrela central do sistema.

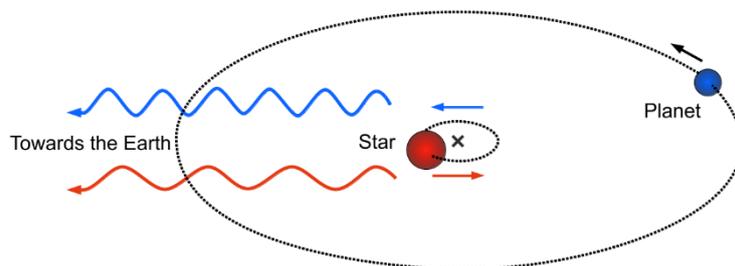


Fig. 22: Detecção de planetas pelo método da velocidade radial.

O método das velocidades radiais descobriu o primeiro um exoplaneta em volta de uma estrela normal, com a descoberta do 51 Pegasus b, em 1995. Neste método, é medida a oscilação da estrela central devido ao seu movimento em torno da estrela central. A estrela e o planeta orbitam em torno do centro de massa do sistema estrela-planeta. Este movimento da estrela central induz pequeníssimas alterações na luz da estrela, no sentido do vermelho ou do azul (figura 19a), devido ao efeito Doppler. Desta forma, podemos determinar a massa do planeta relativamente à massa da estrela central. Na entanto, na prática, não sabemos a orientação da maioria dos sistemas detetados com este método já que a massa do planeta que podemos calcular é a massa mínima (o que significa que a massa real pode ser bem maior).

Atividade 5: Efeito Doppler

Tal como visto na oficina da Expansão do Universo, o efeito Doppler é o que faz o comprimento de onda de um som variar quando a fonte está em movimento. Isso pode ser demonstrado girando um despertador, inserido num saco de pano amarrado com uma corda, num plano horizontal. Quando se aproxima, o comprimento de onda do ouvinte é reduzido e o som tem um tom mais alto. Quando se afasta, o comprimento de onda aumenta e o som tem um tom mais baixo. A pessoa no centro de rotação não deteta nenhuma variação.

No caso do exoplaneta e da sua estrela, as ondas de luz da estrela são afetadas. Quando uma estrela se aproxima de nós, o comprimento de onda aparente da sua radiação diminui, a sua luz move-se para o extremo azul do espectro visível. Quando a estrela se afasta, o comprimento de onda aparente aumenta e a sua luz move-se para a extremidade vermelha do espectro visível.

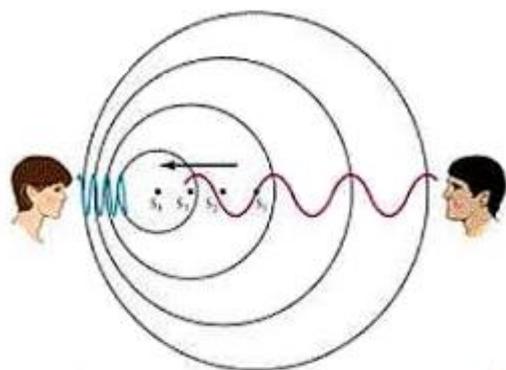


Fig. 23: Quando a fonte se aproxima o comprimento de onda diminui e quando a fonte se afasta o comprimento de onda aumenta.

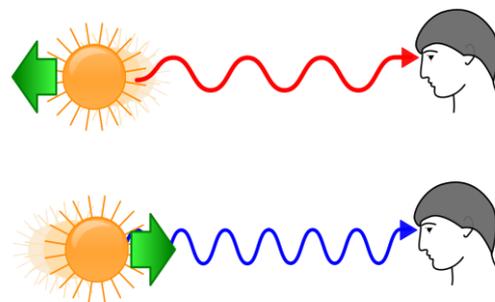


Fig. 24: Quando a fonte se aproxima parece mais azulada e quando a fonte se afasta parece mais avermelhada.

Este é o efeito Doppler devido ao movimento relativo que é o que os exoplanetas apresentam quando se movem em redor da estrela hospedeira. Quando o exoplaneta se afasta de nós a luz apresenta um desvio para o vermelho e quando se aproxima a luz apresenta um desvio para o azul.

Método dos trânsitos

O outro método importante, denominado método dos trânsitos, é baseado na observação da variação do brilho de uma estrela quando um dos seus planetas passa (transita) na sua frente, ocultando uma pequena parte do seu disco estelar (figura 19b). Com o método do trânsito, o tamanho do planeta, R_p , relativamente ao da estrela central, R_* , pode ser medido e é dado, aproximadamente, por,

$$\frac{R_p}{R_*} = \sqrt{\frac{dF}{F}}$$

onde $\frac{dF}{F}$ é a alteração relativa observada no brilho durante o trânsito do planeta (por exemplo, $\frac{dF}{F} = 0,01$ se uma estrela diminui o brilho em 1% durante o trânsito).

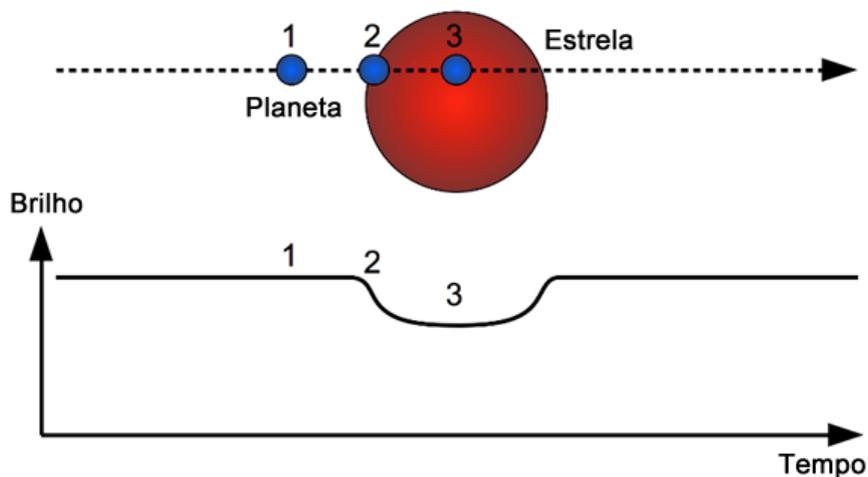


Fig. 25: Detecção de planetas pelo método dos trânsitos.

Atividade 6: Simulação de um trânsito

Um trânsito pode ser simulado usando duas bolas: a maior representa a estrela e a menor representa o planeta orbitando a estrela. Se os observadores estiverem no mesmo plano da órbita do planeta e estiverem a observar a estrela nesse momento, saberão que o planeta passa à frente da estrela pela diminuição e aumento da curva de luminosidade da estrela (Fig. 26). É evidente que se o observador não estiver no mesmo plano da rotação, não será observada alteração da curva de brilho (Fig. 27).

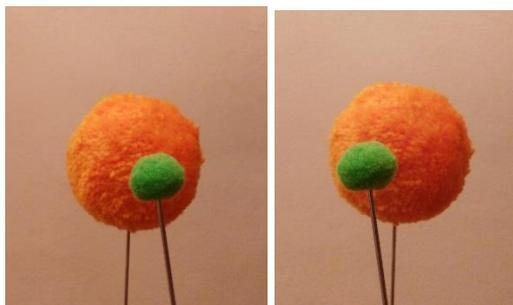


Fig. 26: Um observador no plano de rotação pode ver o trânsito do planeta e detetar as alterações na curva de brilho da estrela.

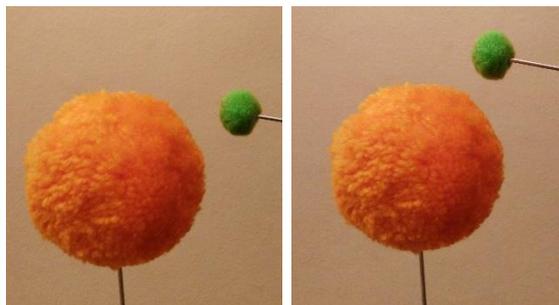


Fig. 27: Um observador fora do plano de rotação não pode detetar alterações na curva de brilho da estrela.

Método das lentes gravitacionais

Existem outros métodos de deteção de exoplanetas apesar de serem pouco usados. O método de microlentes gravitacionais consiste na observação de um aumento de brilho de uma estrela de fundo, devido ao alinhamento dessa estrela de fundo com uma estrela com exoplanetas. O sistema exoplanetário atua como uma lente gravitacional e deverá gerar um aumento de brilho característico (linha vermelha na Fig. 28). Para que funcione é necessário um alinhamento visual perfeito entre as três partes (estrela de fundo, estrela com exoplaneta e a Terra).

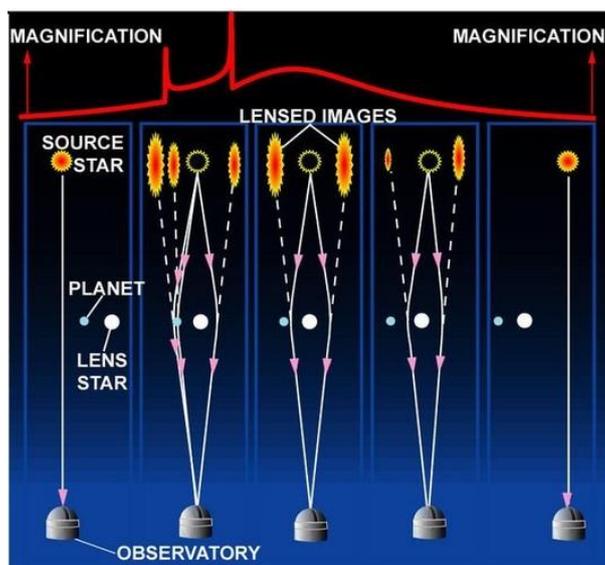


Fig. 28: Método de microlente para a deteção de exoplanetas.

Atividade 7: Simulação de microlentes

Pode simular a deteção de um exoplaneta em redor de uma estrela com um par de pés de copo de vidro, como as usadas na oficina da expansão do Universo. Primeiro, usamos apenas uma base e nada é observado. Depois, passamos a outra e surgirá um ponto e talvez mesmo dois.



Fig. 29: Primeiro, com apenas uma lente.



Fig. 30: Movendo a segunda lente por cima da primeira, surgirá um ponto depois dois, em qualquer dos casos sem mover a primeira lente.

Método de detecção direta

E, finalmente, o método de detecção direta que corresponde à aquisição e análise de imagens de muito alta resolução da estrela, para determinação a existência de planetas em seu redor. Devido à quantidade de luz emitida pela estrela, este método apenas tem tido sucesso para planetas que estão muito afastados da sua estrela central e que ao mesmo tempo são muito jovens, e por isso ainda emitam luz devido ao calor gerado na sua formação (ver Fig. 31).

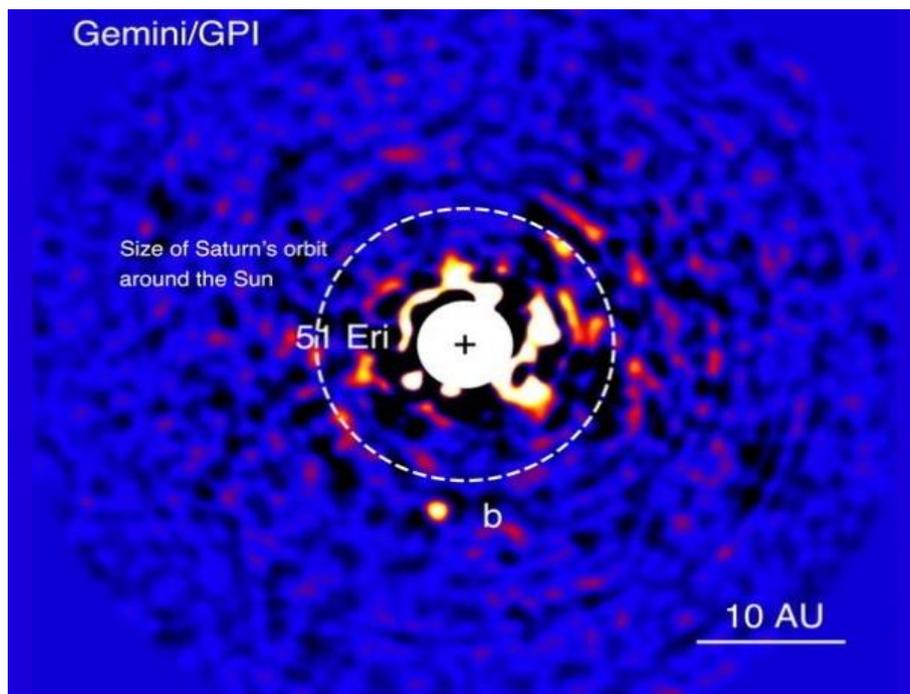


Fig. 31: Método de detecção direta de planetas.

Exemplos de sistemas extrassolares

Os mais bem conhecidos exoplanetas têm massas comparáveis à de Júpiter, que é o maior planeta de nosso Sistema Solar. É por esta razão pela que, com frequência, se comparam as massas e tamanhos dos planetas extrassolares com a massa, $M_{Júp}$ ($1,90 \times 10^{27}$ kg), e raio, $R_{Júp}$ (71 492 km), de Júpiter. Apenas alguns deles (cerca de 20) têm massa semelhante à Terra. Há,

no entanto, mais planetas (cerca de 600, 20% dos conhecidos) com tamanho semelhante à Terra, até $1,5 R_T$ (raio da Terra). É esperado que estes planetas sejam os mais comuns, mas as atuais técnicas de detecção têm mais sucesso na detecção de objetos mais massivos ou maiores.

Nome do planeta	Distância média (ua)	Período orbital (dias)	Massa mínima * (massas de Júpiter ou da Terra)	Descoberta (anos)	Raio (km)
Ups And b	0,059	4,617	0,69 Mj	1996	124 000*
Ups And c	0,83	241,5	1,98 Mj	1999	176 000*
Ups And d	2,51	1 274,6	4,13 Mj	1999	221 999*
Ups And e	5,24	3 832,5	1,06 Mj	2010	70 000*
Gl 581 e	0,030	3,149	1,9 Mt	2009	7 600*
Gl 581 b	0,041	5,368	15,7 Mt	2005	16 000*
Gl 581 c	0,073	12,932	5,7 Mt	2007	11 000*
Kepler-62 b	0,0553	5,714	9 Mt	2013	8 350
Kepler-62 c	0,092 9	12,441	4 Mt	2013	3 400
Kepler-62 d	0,120	18,164	14 Mt	2013	12 400
Kepler-62 e	0,427	122,387	1,6 Mt	2013	10 300
Kepler-62 f	0,718	267,291	2,8 Mt	2013	9 000
Trappist-1 b	0,012	1,511 1	1,02 Mt	2016	7 100
Trappist-1 c	0,016	2,422	1,16 Mt	2016	7 000
Trappist-1 d	0,022	4,050	0,30 Mt	2016	5 000
Trappist-1 e	0,030	6,099	0,77 Mt	2017	5 800
Trappist-1 f	0,039	9,206	0,93 Mt	2017	6 700
Trappist-1 g	0,047	12,354	1,15 Mt	2017	7 300
Trappist-1 h	0,062	18,768	0,33 Mt	2017	4 900

Tabela 8: Quatro representações de sistemas extrassolares com múltiplos planetas. Dados extraídos de *Extrasolar Planets Catalogue 2* (exceto a última coluna). * Estes planetas foram descobertos pelas velocidades radiais; é por isso que não há certezas dos seus tamanhos. Para planetas gigantes, com massas entre 0,5-20 Mj, é conhecido que quase todos têm um raio de 0,7-1,4 vezes o de Júpiter (50-100 mil quilómetros), com pequena correlação com as suas massas. Para planetas terrestres de GJ861, os seus raios foram calculados assumindo que a densidade do planeta é igual à densidade da Terra ($5\,520\text{ kg/m}^3$).

Nesta secção são considerados exemplos de sistemas planetários com três ou mais planetas conhecidos. A tabela 8 mostra planetas em redor das estrelas Ups Andromeda, Gliese 581, Kepler-62 e Trappist-1. Os sistemas planetários de Ups Andromeda e Gliese 581 foram descobertos com o método VR e para esses planetas conhecemos a sua massa mínima, mas não os seus tamanhos. Considera-se que os seus raios se encontram entre 50 000-100 000 km (apesar de a tabela 1 indicar um dos valores possíveis). Para Gliese 581, outros planetas (d, f, g) foram anunciados, mas posteriormente contestados por outras publicações, pelo que a sua descoberta foi removida. Isto deveu-se, provavelmente, devido a sinais marginais ou ruído de outras fontes.

Os planetas da Kepler-62 foram descobertos pelo método dos trânsitos. Devido a isso, os seus tamanhos são conhecidos. Da sua massa conhecemos apenas os seus limites superiores (massas máximas), já que são demasiado pequenos (e leves) para serem detetados pelo método das velocidades radiais. Há, no entanto, muitos planetas que foram detetados pelos dois métodos, trânsitos e velocidades radiais, pelo que sabemos as suas massas e os seus tamanhos.

Muitos dos exoplanetas estão muito perto da estrela central (por exemplo, todos os planetas de Gliese 876 têm órbitas mais próximas da estrela do que Mercúrio está do Sol). Outros possuem planetas mais longínquos, como o sistema 2M1207b (ver Fig. 19). Uma das possibilidades de visualizar estes dados consiste em construir modelos à escala do sistema planetário escolhido. Isto permitirá comparar facilmente uns com os outros e com nosso Sistema Solar.

Nome do planeta	Distância média (ua)	Período orbital (anos)	Massa (massas de Júpiter)	Raio (km)
Mercúrio	0,387 1	0,240 9	0,000 2	2 439
Vénus	0,723 3	0,615 2	0,002 6	6 052
Terra	1,000 0	1,000 0	0,003 2	6 378
Marte	1,523 7	1,880 9	0,000 3	3 397
Júpiter	5,202 6	11,863 1	1	71 492
Saturno	9,554 9	29,471 4	0,299 4	60 268
Urano	19,218 5	84,04	0,045 6	25 559
Neptuno	30,110 4	164,80	0,054 1	25 269

Tabela 9: Planetas do Sistema Solar.

Atualmente, sabemos que existem exoplanetas em redor de estrelas muito diferentes do Sol. Em 1992, os radioastrónomos anunciaram a descoberta de planetas em redor do pulsar PSR 1257 + 12. Forma necessário mais três anos para descobrir o primeiro exoplaneta em redor de uma estrela do tipo do Sol, 51 Pegasi. Depois dessa data foram detetados exoplanetas em órbita em torno de: uma estrela anã vermelha (Gliese 876, em 1998), uma estrela gigante (Iota Draconis, em 2001), uma estrela anã castanha (2M1207, em 2004), uma estrela de classe A (Fomalhaut, em 2008, ver Fig. 32), anãs brancas (WD1145-1017, em 2015, com um planeta em desintegração), sistemas binários (Kepler-16b, em 2011) entre outras.

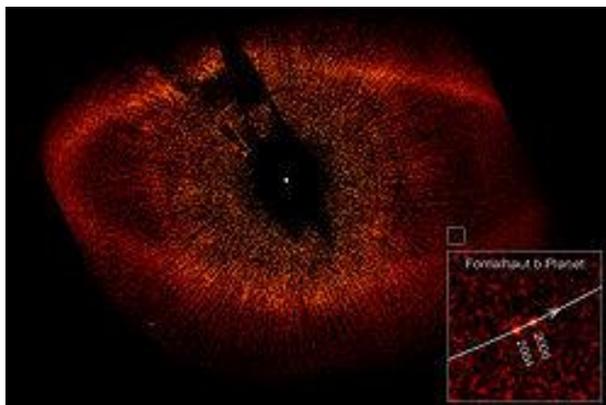


Fig. 32: Planeta Fomalhaut b dentro da nuvem de pó interplanetário de Fomalhaut numa imagem do Hubble Space Telescope, com posições em 2004 e 2006 (ver imagem pequena) (Foto: NASA).

Atividade 8: Modelos de sistemas exoplanetários

Primeiro, escolhemos a escala do modelo. Não é conveniente usar a mesma escala para diâmetros e distâncias devido ao problema das dimensões. Para distâncias, a escala considerada é: 1 ua = 1 m. Nesse caso todos os exoplanetas podem caber dentro de uma sala de aula típica, bem como os cinco primeiros planetas do nosso Sistema Solar. Para a escala de tamanho do planeta, um raio do planeta de 10 000 km corresponde a um diâmetro do modelo de 0,5 cm.

Nesse caso, o maior planeta, Júpiter, com um raio de 71 000 km, tem 7 cm de diâmetro e o menor, Mercúrio, terá 0,2 cm. Se a atividade for realizada no exterior (por exemplo, no pátio da escola), podemos construir um modelo completo com escalas semelhantes para diâmetros e distâncias. Para as estrelas anfitriãs é usada a mesma escala, um raio da estrela-anfitriã de 10 000 km corresponde a um diâmetro do modelo de 0,5 cm.

Sistema Solar	Distância (ua)	Raio (km)	Modelo das distâncias	Modelo dos diâmetros
Mercúrio	0,39	2 439	40 cm	0,1 cm
Vénus	0,72	6 052	70 cm	0,3 cm
Terra	1	6 378	1,0 m	0,3 cm
Marte	1,5	3 397	1,5 m	0,1 cm
Júpiter	5,2	71 492	5,0 m	3,0 cm
Saturno	9,55	60 268	10 m	2,5 cm
Urano	19,22	25 559	19 m	1,0 cm
Neptuno	30,11	25 269	30 m	1,0 cm

Tabela 10: Sistema Solar. A estrela anfitriã, o Sol é tipo G2V, com um diâmetro no modelo de 35 cm. A sonda habitável é indicada a verde.

Sob as condições expressas de escala, o Sistema Solar é construído (Tabela 2) ou qualquer um dos sistemas da Tabela 1, usando os raios e os valores médios de distância incluídos na tabela. Para simplificar o processo, as tabelas com a escala mencionada acima estão incluídas abaixo.

Começa com o primeiro sistema planetário descoberto em 1999 ao detetar os seus planetas pelo efeito Doppler aplicado à velocidade radial da estrela. Este método, devido ao nível de tecnologia, permite detetar exoplanetas muito grandes que estão próximos da estrela-anfitriã. Sem dúvida, o método de deteção também determina as características dos planetas localizados. Com esse método de deteção, foram localizados planetas gasosos como Júpiter ou mesmo muito maiores. Para localizar planetas capazes de sustentar a vida, foi necessário tentar detetar planetas terrestres menores, como a Terra.

Upsilon Andromedae Titawin	Distância (ua)	Diâmetro (km)	Modelo das distâncias	Modelo dos diâmetros
Ups And b / Saffar	0,059	108 000	6 cm	5,5 cm
Ups And c / Samh	0,830	200 000	83 cm	10,0 cm
Ups And d / Majriti	2,510	188 000	2,5 m	9,5 cm
Ups And e / Titawin e	5,24	140 000	5,2 m	7,0 cm

Tabela 11: A estrela-anfitriã Upsilon Andromedae é uma estrela F8V a 44 anos-luz na constelação de Andrómeda. É uma estrela binária composta por Ups And A, uma estrela muito semelhante ao Sol embora mais quente e brilhante, com um raio de $1,28 R_{Sol}$ e Ups And B que é uma pequena anã vermelha. No modelo Ups And A tem um diâmetro de 45 cm.

Os planetas gasosos são considerados incapazes de sustentar a vida no sentido em que a conhecemos, de modo que há uma tendência de estudar planetas rochosos do tipo Terra, em vez dos planetas de Júpiter, que foram os primeiros a serem descobertos.

O Gliese 581 é um dos primeiros sistemas em que foi possível detetar exoplanetas do tipo terrestre, embora que, desde 2014, alguns de seus exoplanetas tenham sido discutidos. O

método de detecção considerado neste caso foi o das velocidades radiais, mas devido à baixa massa do GL 581 de $0,31 M_{Sol}$, foi possível encontrar exoplanetas terrestres.

Gliese 581	Distância (ua)	Diâmetro (km)	Modelo das distâncias	Modelo dos diâmetros
Gliese 581 e	0,030	15 200	3 cm	0,8 cm
Gliese 581 b	0,041	32 000	4 cm	1,6 cm
Gliese 581 c	0,073	22 000	7 cm	1,1 cm

Tabela 12: A estrela-anfitriã Gliese 581 é uma anã vermelha do tipo M2.5V localizada a 20,5 anos-luz, na constelação de Balança. Tem um terço da massa do Sol e é menos luminosa e quente que ele. O seu raio é de $0,29 R_{Sol}$ que no modelo corresponde a um diâmetro de 10 cm.

Em 2009 foi lançada a missão Kepler. Este observatório espacial orbita o Sol e procura planetas extrassolares, especialmente aqueles de tamanho semelhante ao da Terra, que estão na zona habitável de sua estrela-anfitriã. Nos 9 anos que a missão durou foram detetados cerca de 3 000 exoplanetas e ainda existem milhares de candidatos aguardando por confirmação. Kepler varreu 0,25% do céu e as suas descobertas mostraram que os planetas são muito comuns na Via Láctea. Em 2018 foi lançado o satélite TESS. Ele foi projetado para identificar planetas próximos com um tamanho não superior a duas vezes ao da Terra e numa área muito maior do céu que cobrirá 85% da esfera celeste. Kepler e TESS foram projetados para explorar o céu em busca de trânsitos planetários.

Kepler 62	Distância (ua)	Diâmetro (km)	Modelo das distâncias	Modelo dos diâmetros
Kepler 62 b	0,056	33 600	5,5 cm	1,7 cm
Kepler 62 c	0,093	13 600	9 cm	0,7 cm
Kepler 62 d	0,120	48 000	12 cm	2,4 cm
Kepler 62 e	0,427	40 000	43 cm	2,0 cm
Kepler 62 f	0,718	36 000	72 cm	1,8 cm

Tabela 13: A estrela-anfitriã Kepler 62 é uma estrela do tipo F2V, na constelação de Lira, a 1 200 anos-luz. É uma estrela ligeiramente mais fria e pequena que o Sol. O seu raio é $0,64 R_{Sol}$ e no modelo corresponde a um diâmetro de 22 cm.

O Kepler-62 é um dos exemplos mais interessantes de um sistema planetário potencialmente habitável. De particular interesse são os planetas e e f, pois são os melhores candidatos a planetas sólidos que caem na zona habitável da estrela. Seus raios, 1,61 e 1,41 raios terrestres, respetivamente, coloca-os na faixa de raio do que podem ser planetas terrestres sólidos e caem dentro da zona habitável do Kepler-62: e a uma faixa de distância em que esses dois planetas poderiam ter água líquida nas suas superfícies, talvez cobrindo-os completamente. Para o Kepler-62e, localizado próximo à margem interna da zona habitável, isso exigiria uma cobertura reflexiva das nuvens que reduza a radiação que aquece a superfície. O Kepler-62f, por outro lado, está localizado na zona exterior da zona habitável, assim como Marte no nosso Sistema Solar. Lá, são necessárias quantidades significativas de dióxido de carbono para manter a superfície do planeta suficientemente quente para ter água líquida.

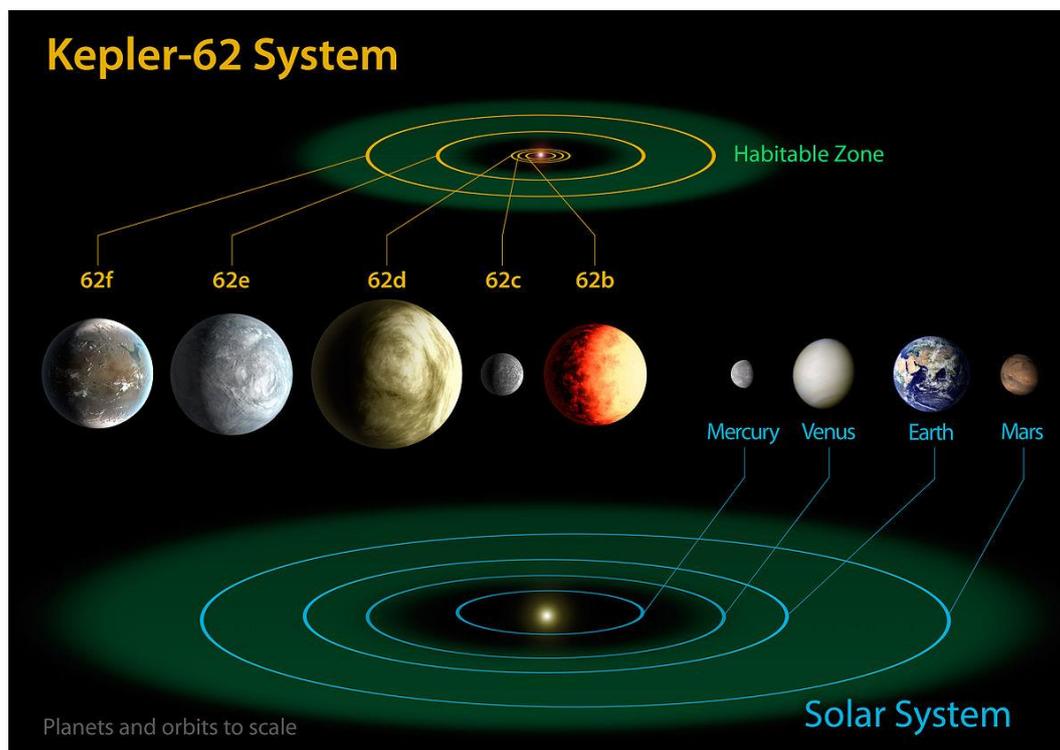


Fig. 33: O sistema Kepler-62 comparado com o Sistema Solar interno. A região verde indica a zona habitável – a área onde poderá existir vida tal como a conhecemos. Fonte NASA Ames / JPL-Caltech.

Uma anã vermelha próxima, listada como 2MASS J23062928-0502285, foi observada com trânsitos, em 2015, com o telescópio Trappist, descobrindo inicialmente cerca de três planetas de tamanhos terrestres, batizados Trappist-1b, c e d. Estudos posteriores realizados por equipas internacionais, usando os telescópios Hubble, Kepler, Spitzer e telescópios no Chile, permitiram perceber um total de sete planetas. Cinco desses planetas (b, c, e, f e g) são semelhantes em tamanho à Terra, e dois (d e h) são de tamanho intermediário entre Marte e a Terra. Três dos planetas (e, f e g) orbitam dentro da zona habitável.

Os planetas de TRAPPIST-1 orbitam muito perto da sua estrela e passam tão próximos um do outro que as interações gravitacionais são significativas e os seus períodos orbitais são quase ressonantes. Os planetas parecerão proeminentes nos céus dos seus vizinhos e, em alguns casos, várias vezes maiores o que a Lua parece da Terra. De facto, as suas massas não foram determinadas com velocidades radiais, mas com os desvios na periodicidade das suas órbitas, usando um método chamado 'variações de tempo de trânsito' (desvios no tempo de trânsito).

As massas de todas elas puderam ser obtidas com uma margem de erro muito pequena, o que permitiu determinar com precisão a densidade, a gravidade superficial e a sua composição. Os exoplanetas têm uma faixa de massa de aproximadamente 0,3 Mt a 1,16 Mt, com densidades de 0,62 a 1,02 terrestre (3,4-5,6 g/cm³). Os planetas c e e são quase totalmente rochosos, enquanto b, d, f, g e h têm uma camada volátil na forma de uma concha de água, concha de gelo ou uma atmosfera espessa. O Trappist-1d parece ter um oceano de água líquida que compreende aproximadamente 5% de sua massa; para comparação, o conteúdo de água da Terra é < 0,1%, enquanto as camadas de água do Trappist-1f e g provavelmente estão congeladas. O Trappist-

le possui uma densidade um pouco mais alta que a da Terra, indicando uma composição de rocha e ferro terrestres. Além disso, foi descoberto que a atmosfera do Trappist-1b estava acima do limite da estufa em fuga de 101 a 104 bar de vapor de água. Os planetas c, d, e e f não possuem atmosferas de hidrogénio e hélio. O planeta g também foi observado, mas não havia dados suficientes para descartar uma atmosfera de hidrogénio.

Trappist-1	Distância (ua)	Diâmetro (km)	Modelo das distâncias	Modelo dos diâmetros
Trappist-1 b	0,012	14 284	1,2 cm	1,4 cm
Trappist-1 c	0,016	13 952	1,6 cm	1,4 cm
Trappist-1 d	0,022	9 990	2,2 cm	1,0 cm
Trappist-1 e	0,030	11 595	3,0 cm	1,2 cm
Trappist-1 f	0,039	13 328	3,9 cm	1,3 cm
Trappist-1 g	0,047	14 628	4,7 cm	1,5 cm
Trappist-1 h	0,062	9 850	6,2 cm	1,0 cm

Tabela 14: A estrela -anfitriã Trappist-1 é uma estrela vermelha do tipo M8V anã localizada na constelação de Aquário a 40 anos-luz. É uma estrela ligeiramente maior que Júpiter, com um diâmetro de 168 000 km e no modelo um diâmetro 7 cm. No modelo as distâncias entre os planetas são menores que o diâmetro da estrela, o que dá a ideia de como o sistema é compacto.

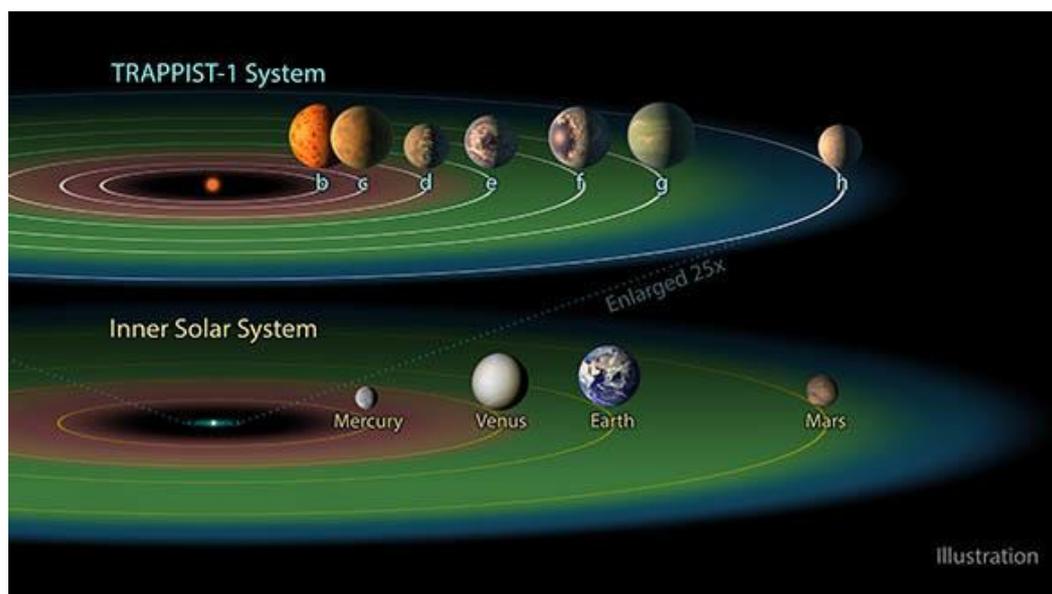


Fig. 34: O sistema Trappist-1 comparado como Sistema Solar interior. A região verde indica a zona habitável – a área onde poderá existir vida tal como a conhecemos.

Ainda existem muitas questões sem resposta acerca das propriedades e habitabilidade dos exoplanetas. Saber mais sobre eles e aprender mais sobre as suas propriedades e características motivou várias missões espaciais atuais e futuras, como as missões TESS e JWST da NASA e CHEOPS e PLATO da ESA, esta última com o lançamento em 2026 e aguardando uma expansão no número de planetas terrestres conhecidos.

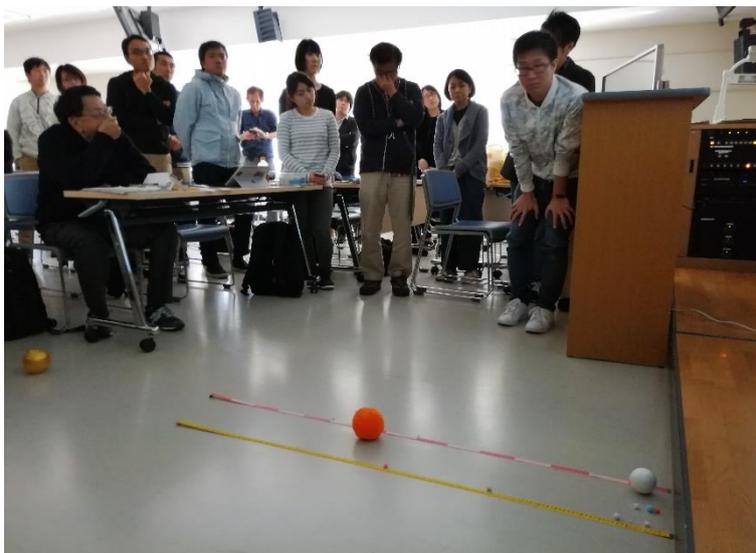


Fig. 35: Depois de todos os modelos construídos, os pontos destacados na apresentação das zonas de habitabilidade devem ser comentados. Dependendo da massa e do tipo de estrela-anfitriã, a zona de habitabilidade é mais ou menos próxima.

Bibliografia

- Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., *Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17th century*, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona, 2006.
- Gaitsch, R., *Searching for Extrasolar Planets*, Proceedings of 10th 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 10th EAAE International Summer School*, Barcelona 2006.