

# Planetes i exoplanetes

**Rosa M. Ros, Hans Deeg**

International Astronomical Union, Technical University of Catalonia (Spain),  
Instituto de Astrofísica de Canarias and University of La Laguna (Spain)

## Resum

Aquest taller es divideix en dues parts. En primer lloc es presenten activitats per ajudar a comparar els diferents planetes entre si. Es pretén donar contingut a les taules de dades perquè no quedin com fredes dades sense més. Per a això es presenten models de el sistema solar des de diferents tipus de vista: distàncies, diàmetres, densitats, gravetats superficials, etc.

En l'actualitat, diversos mètodes s'utilitzen per trobar exoplanetes, més o menys indirectament. Ha estat possible detectar uns 4000 planetes i uns 500 sistemes planetaris múltiples.

## Objectius

- Comprendre que signifiquen els valors numèrics que resumeixen les taules de dades dels planetes del Sistema Solar
- Entendre les principals característiques dels sistemes planetaris extra-solars mitjançant un paral·lelisme establert amb Júpiter i els seus satèl·lits galileans.

## El Sistema solar i les taules de dades

El Sistema Solar permet aventurar els alumnes a realitzar comparacions entre els diferents planetes el que els portés a elaborar maquetes comparant diferents aspectes. Per poder dur a terme aquesta comesa cal usar les dades de la taula 1.

Planeta	Diàmetre (km)	Distància al Sol (km)
Sol	1 392 000	
Mercuri	4 878	57.9 10 <sup>6</sup>
Venus	12 180	108.3 10 <sup>6</sup>
Terra	12 756	149.7 10 <sup>6</sup>
Mart	6 760	228.1 10 <sup>6</sup>
Júpiter	142 800	778.7 10 <sup>6</sup>
Saturn	120 000	1 430.1 10 <sup>6</sup>
Urà	50 000	2 876.5 10 <sup>6</sup>
Neptú	45 000	4 506.6 10 <sup>6</sup>

Tabla 1: Dades de los cossos del Sistema Solar

En totes les ocasions el principal objectiu del model és fer que siguin comprensibles les dades. Els milions de km no són fàcilment imaginables, en canvi si es tradueixen a distància i grandària que ells acostumin gestionar són més assequibles.

## Diverses Maquetes del sistema solar

### Maquetes de diàmetres

En un paper prou gran de color groc, es retalla un cercle que representarà el Sol. Els diferents planetes es retallessin en cartolina i es dibuixessin les seves característiques morfològiques. Finalment s'enganxaran tots ells sobre el disc solar.

A continuació figuren els resultats obtinguts amb una escala de 1 cm per cada 10.000 km: Sol 139 cm, Mercuri 0.5cm, Venus 1.2 cm, la Terra 1.3 cm, Mart 0.7 cm, Júpiter 14.3 cm, Saturn 12.0 cm, Urà 5.0 cm i Neptú 4.9 cm.

Consell: la maqueta anterior pot realitzar pintant les planetes sobre una samarreta, això sí sempre a escala. Resulta més atractiu si es pinten alguns detalls.



Fig. 2a y 2b: Exemples de samarreta que proporcionen comparacions a escala entre els diàmetres de el Sol i els planetes

### Maqueta de distàncies

Si atenem només a les distàncies entre els planetes es pot elaborar una altra maqueta que és fàcil situar en qualsevol passadís de l'escola. Només cal tallar una cartolina a tires de 10 cm d'ample, que anirem unint fins a tenir una llarga cinta de diversos metres (figura 3). A continuació, s'enganxen a la distància que els correspon el nom dels diferents planetes.

Si es fa servir una escala d'1 cm per cada 10 milions de km dels resultats obtinguts són Mercuri 6 cm, Venus 11 cm, la Terra 15 cm, Mart 23 cm, Júpiter 78 cm, Saturn 143 cm, Urà

288 cm i Neptú 450 cm.



Fig. 3: Maqueta de distàncies.

Una opció simpàtica per a aquest model consisteix a usar un rotllo de paper higiènic utilitzant els porcions assenyalades en el mateix com a unitats. Per exemple, es pot prendre com a escala 1 porció de paper per cada 20 milions de km.

### Maqueta de diàmetres i distàncies

El següent desafiament consisteix a intentar fer una maqueta que representi els cossos a escala i a la distància corresponent. El problema és que no és tan senzill com pot semblar trobar una escala que permeti representar els planetes per objectes no massa petits i que les distàncies entre ells no siguin exageradament grans, ja que en aquest cas no són representables i el model és poc útil per a els alumnes perquè no pot assimilar prou bé. A títol de suggeriment és una bona idea fer servir el pati de centre per fer el model i fer servir pilotes per als planetes ja que hi ha de qualsevol diàmetre.



Fig. 4: El Sol i els planetes de la maqueta de diàmetres i distàncies.

A tall d'exemple donem una possible solució. En un extrem del pati situem una pilota de bàsquet d'uns 25 cm de diàmetre que representa el Sol. Mercuri serà el cap d'una agulla de picar (1 mm de diàmetre) a 10 m de la Sol. El cap, una mica més gran, de una altra agulla de picar (2 mm de diàmetre) serà Venus a 19 m de la Sol, la Terra és el cap d'una altra agulla com l'anterior (2 mm) a 27 m de la Sol. Mart és un altre cap d'agulla, una mica menor (1 mm) situat a 41 m de la Sol. Normalment aquí es va acabar el pati de l'escola, si és que no es va

acabar abans. Els següents planetes caldrà situar-los en altres llocs fora de pati, però a l'ésser proper a l'escola els alumnes coneixen bé les distàncies. Una pilota de tennis de taula (2.5 cm de diàmetre) correspon a Júpiter a 140 m de la Sol. Una altra pilota de tennis de taula (2 cm de diàmetre) serà Saturn a 250 m de la Sol, una bala de vidre (1 cm de diàmetre ) representarà Urà a 500m de el Sol i una altra bala (1 cm) situada a 800m serà Neptú.

Cal remarcar que aquest sistema planetari no cap en cap escola. Però cal considerar que si reduïm les distàncies, els planetes serien més petits que el cap d'una agulla de picar i pràcticament serien impossibles de visualitzar. Per acabar podeu calcular quina és l'escala que s'ha utilitzat per elaborar aquest model.

### Maqueta al mapa de la ciutat

La idea és senzilla, fer servir l'escala d'un mapa per imaginar a la ciutat on està situada l'escola la posició dels diferents planetes si el Sol està situat a la porta de el centre escolar. A tall d'exemple es presenta el plànol de Barcelona amb diferents objectes (concretament fruites i llegums) que estarien situats en els diferents carrers per així poder imaginar millor les dimensions. Com a exercici es suggereix fer la mateixa feina amb el pla de la pròpia ciutat.

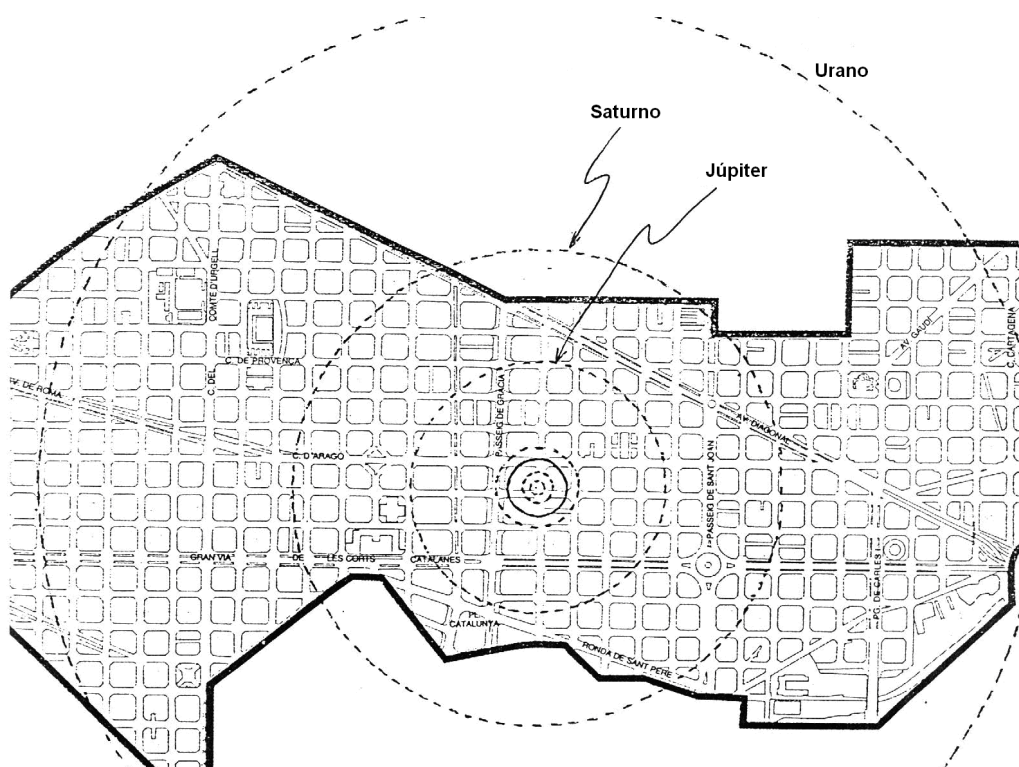


Fig. 5: Mapa de l'Eixample de Barcelona amb alguns planetes

En el pla de la figura, Mercuri és un gra de caviar, Venus i la Terra un parell de pèsols, Mart un gra de pebre, Júpiter una taronja, Saturn una mandarina i Urà i Neptú un parell de nous, i el Sol, com no hi ha cap esfera vegetal prou gran els mateixos alumnes ho van imaginar com una esfera de la mida d'un rentavaixelles. Qualsevol lector pot fer el mateix amb la seva pròpia ciutat.



Fig. 6a y 6b: Instantànies de la ciutat de Metz.

A la ciutat de Metz (França) hi ha un sistema solar disposat a través dels seus carrers i places, amb els corresponents planetes acompanyats de panells d'informació per al transeünt.

### Maqueta de distàncies-llum

En astronomia, és usual utilitzar l'any llum com a unitat de mesura. Aquesta mateixa idea pot ser il·lustrativa per a un model de el sistema solar. Només cal considerar la velocitat de la llum  $c = 300.000 \text{ km / s}$ . Per tant, la distància que correspon a 1 segon llum és de 300.000 km. Per exemple, per a la Lluna que està situada a 384.000 km, el temps que triga la llum a arribar de la Lluna a la Terra és de  $384.000 / 300.000 = 1,3$  segons.

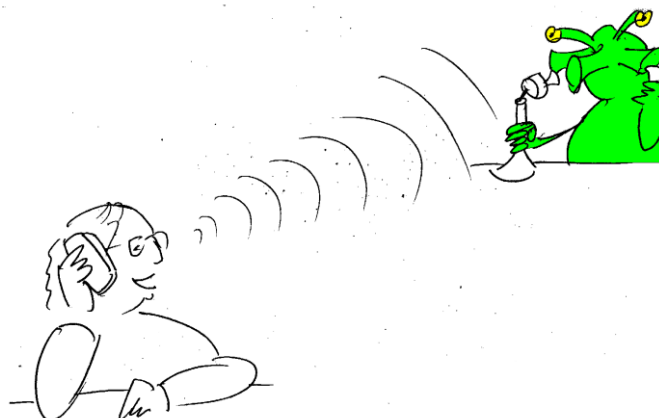


Fig. 7: Un altre exemple model

Usant aquestes unitats es sol·licités als alumnes que calculin el temps necessari perquè la llum de el Sol arribi a cada un dels planetes del Sistema Solar. (A tall de solució afegim el temps que triga la llum de Sol en arribar a Mercuri és de 3,3 minuts, a Venus 6,0 minuts, a la Terra 8,3 minuts, a Mart 12,7 minuts, a Júpiter 43 , 2 minuts, a Saturn 1,32 hores, a Urà 2,66 hores

ia Neptú 4,16 hores). Podem proposar-los que s'imaginin com seria una conversa per videoconferència entre el Sol i qualsevol planeta.

Introduïm aquí també la distància a l'estrella més propera, ja que és molt útil per a visualitzar les enormes distàncies a altres estrelles, que és la raó per què és tan difícil de detectar planetes extrasolars. La més propera a nosaltres és Alfa Centauri a una distància de 4,37 anys llum o 4.13 10<sup>13</sup> quilòmetres. Es pot demanar als estudiants que calculin la distància a aquesta estrella en qualsevol dels models de sistemes planetaris que s'han esmentat anteriorment. En el "model pati de l'escola", amb una escala d'1 cm per 56.000 quilòmetres, l'estrella seria a una distància de 7 375 quilòmetres!

### Model de mides aparents del disc solar des de cada planeta

Des d'un planeta, per exemple la Terra, el Sol es veu sota un angle  $\alpha$  (figura 8). Per a valors de  $\alpha$  molt petits, es pren  $\tan \alpha \approx \alpha$  (en radians)

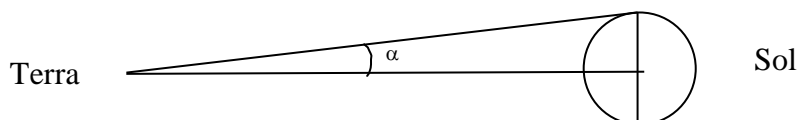


Fig. 8: Des de la Terra el Sol se veu sota un angle  $\alpha$ .

Sabent que el diàmetre solar és de  $1,4 \cdot 10^6$  km o sigui un radi de  $0,7 \cdot 10^6$  km, i que la distància Terra-Sol és  $150 \cdot 10^6$  km, se dedueix:

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

i en graus:

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

És a dir, des de la Terra, el Sol es veu de la mida 2 cops  $0,255^\circ = 0,51^\circ$ , és a dir, aproximadament, mig grau. Repetint el mateix procés per a cada planeta s'obtenen els resultats de la següent taula 2 i es pot representar la seva mida (figura 9).

Planetes	$\tan \alpha$	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°) aprox.
Mercuri	0,024	1,383	1,4
Venus	0,0129	0,743	0,7
Mart	0,006	0,352	0,4
Júpiter	0,0018	0,1031	0,1
Saturn	0,000979	0,057	0,06
Urà	0,00048	0,02786	0,03
Neptú	0,0003	0,0178	0,02

Taula 2: Resultats per als diferents planetes.



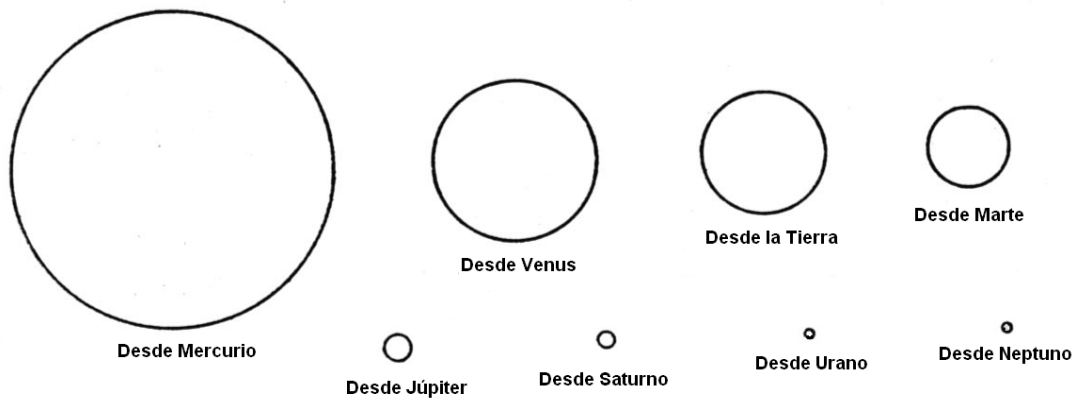


Fig. 9: El Sol vist des de cada planeta: Mercuri, Venus, la Terra, Mart, Júpiter, Saturn, Urà i Neptú.

### Model de densitats

L'objectiu d'aquest model consisteix a buscar mostres de materials que siguin fàcilment manipulables i que tinguin una densitat similar a cadascun dels cossos de el sistema solar, per així poder "sentir-los a les mans"

	Densitat (g/cm <sup>3</sup> )
Sol	1.41
Mercuri	5.41
Venus	5.25
Terra	5.52
Luna	3.33
Mart	3.9
Júpiter	1.33
Saturn	0.71
Urà	1.3
Neptú	1.7

Tabla 3: Densitats dels cossos del Sistema Solar



Fig. 10 Modelo de densitats

Minerals	Densitat	Altres materials	Densitat
Guix	2.3	Glicerina	1.3
Ortosa	2.6	Suro	0.24
Sofre	1.1-2.2	Alumini	2.7
Alita	2	Ferro	7.86
Quars	2.65	Ciment	2.7 – 3.1
Bòrax	1.7	Vidre	2.4 – 2.8
Blenda	4	Estany	7.3
Pirita	5.2	Argila	1.8 – 2.5
Hematies	5.4	Baquelita	1.25
Calcita	2.7	Fusta de roure	0.90
Galena	7.5	Fusta de pi	0.55

Tabla 4: Exemple de densitats d'alguns materials

Partint de la taula 3 de densitats dels planetes, prou comparar amb les densitats de diversos minerals (en totes les escola sol haver una col·lecció de materials) o en alguns casos utilitzar mostres d'altres materials fàcils de trobar com el vidre, ceràmica, fusta, plàstics, etc. A continuació presentem la taula 4 amb alguns exemples de densitats orientatives d'alguns materials.

En cas d'utilitzar un altre tipus de material que no figuri en aquesta taula 4, és molt fàcil calcular la seva densitat. Només cal prendre una porció d'aquest material, pesar-lo per conèixer  $m$  i introduir-lo en un recipient d'aigua i mesurar el seu volum  $V$ . La densitat  $d$  de el material serà,

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

Cal fer notar als alumnes que Saturn "suraria" en l'aigua, la seva densitat és menor que 1.

### Model de aplatament dels planetes

Per visualitzar la deformació (aplatament) dels planetes gasosos causa de la força centrífuga generada per la seva rotació construirem un senzill model.

Tal com es pot veure a la figura 11, amb un pal i unes tires de cartolina es pot construir aquest senzill model que al girar reproduïx l'aplatament que té lloc en els planetes de el sistema solar.

1. Retalleu unes tires de cartolina de 35 x 1 cm.
2. Els enganxeu a un pal cilíndric de 50 cm de llarg i 1 cm de diàmetre, procurant que per la part superior no puguin pujar o baixar, mentre que a la part inferior puguin desplaçar-se amb llibertat al llarg del pal.
3. Feu-ho girar situant-lo entre les dues mans i fent un ràpid moviment de rotació en un sentit i un altre. Veureu com la força centrífuga deforma les bandes de cartolina (figura 11) de la mateixa manera que actua sobre els planetes.





Fig. 11: Model per simular l'aplanament

### Model sobre períodes orbitals planetaris.

És ben sabut que els planetes orbiten al voltant de el Sol amb diferents velocitats i períodes orbitals (taula 5). Conegut el període i la distància mitjana a el Sol es pot deduir la velocitat orbital mitjana de la planeta al recórrer la seva òrbita. Vegem a tall d'exemple el cas de la Terra, però es pot repetir el mateix raonament per a qualsevol altre planeta.

La distància de recorregut d'una revolució orbital és  $L = 2 \pi R$ , amb la qual cosa la velocitat orbital mitjana és  $v = L / T = 2 \pi R / T$ . Per a la Terra, el període és de 365 dies, llavors  $v = 2.582.750 \text{ km} / \text{dia} = 107,740 \text{ km} / \text{h} = 29.9 \text{ km} / \text{s}$ , on la distància de la Terra a el Sol  $R = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$ , es dedueix, per a la Terra, que la seva velocitat orbital mitjana és  $v = 29.9 \text{ km} / \text{s} = 107.589 \text{ km} / \text{h}$ . És bo posar l'accent en que a més el Sol gira al voltant de el centre galàctic amb una velocitat de  $220 \text{ km} / \text{s}$  o el que és el mateix de  $800000 \text{ km} / \text{h}$ .

Planeta	Període Orbital (dies)	Distància al Sol (km)	Velocitat orbital mitja (km/s)	Velocitat orbital mitja (km/h)
Mercuri	87.97	$57.9 \cdot 10^6$	47.87	172440
Venus	224.70	$108.3 \cdot 10^6$	35.02	126072
Terra	365.26	$149.7 \cdot 10^6$	29.50	107208
Mart	686.97	$228.1 \cdot 10^6$	24.13	86688
Júpiter	4331.57	$778.7 \cdot 10^6$	13.07	47052
Saturn	10759.22	$1\,430.1 \cdot 10^6$	9.67	34884
Urà	30.799.10	$2\,876.5 \cdot 10^6$	6.84	24876
Neptú	60190.00	$4\,506.6 \cdot 10^6$	5.48	19558

Tabla 5: Dades dels cossos del Sistema Solar

El més ràpid és Mercuri i el més lent Neptú, el més allunyat. Ja els romans havien observat que Mercuri era el més ràpid de tots i per això el van identificar amb el missatger dels déus i el representaven amb ales als peus. Observat a simple vista, el desplaçament dels planetes

observables sense ajuda òptica és fàcil comprovar que Júpiter i Saturn es mouen molt més lentament sobre les constel·lacions zodiacals que ho pot fer Venus o Mart per exemple.

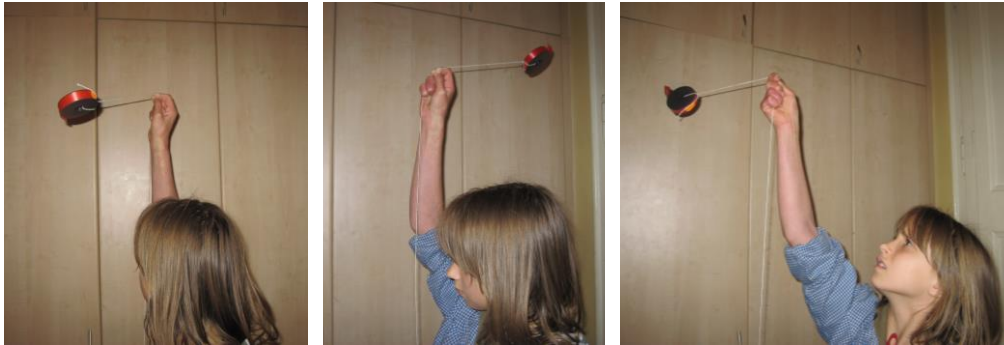


Fig. 12a, 12b y 12c: Simulant el moviment circular dels planetes.

Aquesta és una senzilla experiència de la relació entre la distància i el període orbital.

Comencem per lligar un objecte pesat, tal com una femella, a la fi d'un tros de corda. Subjectem l'extrem oposat a l'objecte pesat i fem girar l'objecte en un moviment circular per sobre dels nostres caps. A continuació, podem veure que si alliberem la corda (fent que sigui més llarga), a mesura que es fa girar l'objecte necessitarà més temps per completar un període orbital com més llarga sigui la corda. Per contra, si prenem la corda més curta, al girar trigués menys temps a donar la volta.

A continuació, podem desenvolupar un model de sistema solar amb femelles i trossos de corda de longitud proporcional als radis de les òrbites planetàries (suposant, de nou, una òrbita circular per a tots ells). No obstant això, en lloc de tallar una peça separada per a cada planeta, tallat totes les peces d'una longitud d'uns 20 cm. Després, utilitzant l'escala adequada, mesuri la distància correcta de l'objecte pesat i fer un nus a aquest punt. A continuació, la corda pot ser retinguda al lloc de el nus mentre es fa girar l'objecte pesat

Per utilitzar el model que ha de tenir una de les cordes en la ubicació del nus i donar-li la volta el cap en un pla paral·lel a terra, amb la possible velocitat mínima velocitat que el mantindrà en òrbita. Veurem que l'objecte necessita menys temps per a una rotació completa quan el radi és més petit.

### Model de gravetat superficials

La fórmula de la força gravitacional  $F = G \frac{Mm}{d^2}$  permet calcular la gravetat superficial que actua sobre la superfície de qualsevol planeta. Només cal considerar la massa unitat ( $m = 1$ ) sobre la superfície de la planeta ( $d = R$ ), obtenim  $g = \frac{GM}{R^2}$  on  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  és la constant universal. Si nosaltres substituïm la massa de la planeta per  $M = 4/3 \pi R^3 \rho$ , on  $\rho$  és la densitat i  $R$  el radi de la planeta, llavors:

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

on  $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$  és la constant de la gravitació universal, Substituint aquests dos últims pels valors que figuren a la taula 1 es pot calcular el valor de la gravetat superficial,  $g$ , per a tots els planetes.

Substituint aquestes dues últimes variables per als valors llistats a la taula 6 (després de convertir el radi en metres i la densitat en  $\text{kg} / \text{m}^3$ , amb  $1000 \text{ kg} / \text{m}^3 = 1 \text{ g} / \text{cm}^3$ ), es pot calcular el valor de la gravetat en la superfície  $g$  de tots els planetes.

Planeta	$R$ Radi equatorial (km)	$g$ Gravetat sup.	$\rho$ Densitat
Mercuri	2439	0.378	5.4
Venus	6052	0.894	5.3
Terra	6378	1.000	5.5
Mart	3397	0.379	3.9
Júpiter	71492	2.540	1.3
Saturn	60268	1.070	0.7
Urà	25559	0.800	1.2
Neptú	25269	1.200	1.7

Tabla 6: Gravetat superficial i densitats dels cossos del Sistema Solar

Vegem-ne un parell d'exemples,

$$g_{\text{mercuri}} = \frac{4}{3} \pi G \cdot 2439 \times 10^3 \text{ m} \cdot 5400 \text{ kg/m}^3 = 3.7 \text{ m/s}^2,$$

$$g_{\text{venus}} = \frac{4}{3} \pi G \cdot 6052 \times 10^3 \text{ m} \cdot 5300 \text{ kg/m}^3 = 8.9 \text{ m/s}^2.$$

De la mateixa manera, podem calcular  $g$  per a la resta dels planetes. A l'igual que en la taula 7, les gravetats superficials es donen sovint en relació amb la de la Terra, i indiquen amb la lletra  $g$

## Modelo de las básculas de bany

En aquest cas el model consisteix a preparar un conjunt de 9 bàscules de bany (8 planetes i la Lluna) perquè els estudiants, al pesar-se en elles, poden saber que és el que pesarien en cada un dels planetes.

Evidentment que cal repetir exactament el mateix procés per a cada planeta així és que només s'explicarà una de ells. La idea, essencialment, és obrir una bàscula de bany i substituir el disc dels pesos per un altre amb els nous pesos que es marquessin sobre el cercle calculant el pes equivalent ai terrestre mitjançant una simple proporció.

1. Primer cal obrir la bàscula. En la majoria de models hi ha dos molls que fixen la base. Recordeu que cal torneu a muntar de nou (figures 13a i 13b).
2. Un cop oberta cal substituir, o posar a sobre, el disc de pesos "terrestre" pel que haureu dibuixat després de fer els càlculs dels pesos equivalents en l'altre planeta.

3. A la taula següent hi ha les gravetats superficials de la Lluna i els diferents planetes del Sistema Solar. En una columna figuren en valors absoluts ( $\text{m s}^{-2}$ ) i en l'altra en valors relatius respecte a la gravetat terrestre. Aquests valors són els que cal aplicar a les unitats de pes "terrestres" de la bàscula per convertir-los en els valors corresponents a un altre planeta (només cal fer una proporció o regla de tres).
4. Finalment, cal tornar a tancar la bàscula i ja podeu comprovar el que peseu a la Lluna.

	Gravetat ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	Gravetat (T=1)
Lluna	1,62	0,16
Mercuri	3,70	0,37
Venus	8,87	0,86
Terra	9,80	1,00
Mart	3,71	0,38
Júpiter	23,12	2,36
Saturn	8,96	0,91
Urà	8,69	0,88
Neptú	11,00	1,12

Tabla 7: Gravetats superficials pera a cada cos del Sistema Solar

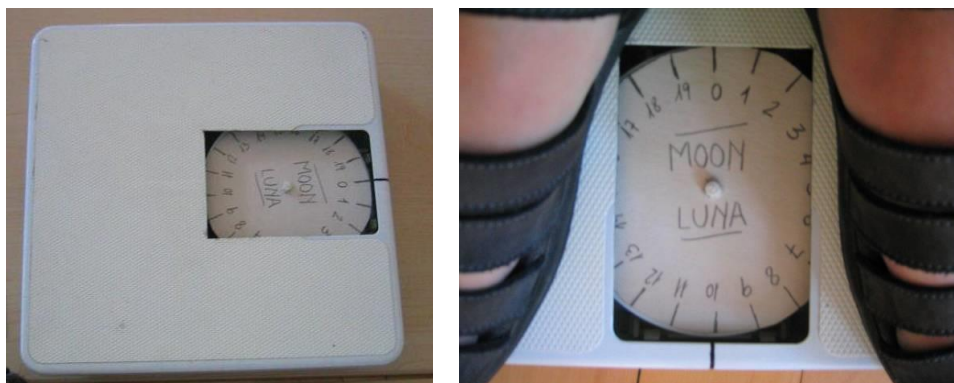


Fig.13a y 13 b:: Bàscula de bany amb el disc substituït



Fig. 14: Model del Sistema Solar amb bàscules de bany

## Models de cràters

La majoria de cràters de el Sistema Solar no tenen origen volcànic sinó que són resultat de la caiguda de fragments sòlids de l'espai sobre la superfície dels planetes i satèl·lits.

1. Primer ha de recobrir el terra amb diaris vells, per no embrutar el terra.
2. Posar dins d'una safata una capa de 2-3 cm de farina, distribuïnt amb un colador perquè la superfície quedi molt llisa.
3. Posar una capa d'uns pocs mil·límetres de cacau en pols sobre la farina amb l'ajuda d'un colador (figura 15a).
4. Des d'una altura d'uns 2 metres deixem caure el projectil: una cullerada sopera de cacau en pols. Al caure deixés marques similars als cràters d'impacte (figura 15b).
5. Es pot experimentar variant l'altura. El tipus, la forma o la massa dels projectils, etc. Es pot aconseguir fins i tot el pic central.



Fig. 15a: Simulant cràters



Fig. 15b: Cràters resultants

## Models de velocitats d'alliberament

Si la velocitat de llançament d'un coet no és molt gran, la força d'atracció del propi planeta ho fa caure de nou sobre la seva superfície. Si la velocitat de llançament és prou gran s'escapa de el camp gravitatori de la planeta. Vegem quina és la velocitat límit per sobre de la qual el coet podrà escapar, és a dir la velocitat mínima de llançament o velocitat d'escapament.

Considerant les fórmules de el moviment uniformement accelerat,

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

$$v = at + v_0$$

si substituïm l'acceleració per  $g$  i es considera la velocitat inicial  $v_0$  nul·la, hem de sobre la superfície de la planeta es verifica  $R = \frac{1}{2} gt^2$  i, com a més,  $v = gt$ . Eliminant el temps entre elles,

$$v = \sqrt{2gR}$$

on es substitueixen els valors de  $g$  i  $R$  pels que figuren a la taula 6 per calcular la velocitat d'alliberament de cada planeta.

Però també es pot deduir d'una altra manera. La velocitat d'escapament depèn de la forma del potencial gravitatori en què es troba el projectil. Per això, en la superfície d'un objecte celeste, la velocitat d'escapament depèn només de l'altura del punt de llançament, si es menyspreen les forces de fricció en l'atmosfera, si aquesta fos present (tal el cas de la Terra).

La velocitat d'escapament no depèn de la massa del projectil ni de la direcció del llançament, i la seva deducció pot ser feta en termes purament energètics.

Per calcular la velocitat d'escapament, s'usen les següents fórmules relacionades amb l'energia cinètica potencial:

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

Considerant el principi de conservació de l'energia, si establim la condició que l'objecte s'allunyi fins a una distància infinita i quedi en repòs, resulta:

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

y aïllant la velocitat:

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

on:  $v_e$  es la velocitat d'alliberament,  $G$  es la constant de gravitació universal ( $6.672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$ ),  $M$  es la massa de l'astre,  $m$  es la massa del projectil,  $R$  es el radi de l'astre (en el supòsit de forma esfèrica),  $g$  es la acceleració de la gravetat a la superfície de l'astre. A la Terra,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

A tall d'exemple, calculem les velocitats d'escapament d'alguns planetes. Per a la Terra,

$$v_{\text{terra}} = \sqrt{2gR} = (2 \cdot 9.81 \text{ m s}^{-2} \cdot 6378 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 11186 \text{ m/s} \approx 11.2 \text{ km/s.}$$

per al planeta més petit, Mercuri,

$$v_{\text{mercuri}} = 2 \cdot 3.78 \text{ m s}^{-2} \cdot 2439 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 4294 \text{ m/s} \approx 4.3 \text{ km/s.}$$

I per al planeta més gran, Júpiter,

$$v_{\text{jupiter}} = (2 \cdot 23.1 \text{ m s}^{-2} \cdot 71492 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 57471 \text{ m/s} \approx 57 \text{ km/s.}$$

Resulta evident que en Mercuri és més fàcil llançar un coet, que des de la Terra, però on és més difícil és a Júpiter on la velocitat d'escapament és d'uns 60 km / s.

(Per a poder comparar els resultats afegirem que els valors acceptats per a cada cos al Sistema Solar són els següents, Mercuri 4.3 km/s, Venus 10,3 km/s, Terra 11,2 km/s, Mart 5,0 km/s, Júpiter 59,5 km/s, Saturn 35,6 km/s, Urà 21,2 km/s i Neptú 23,6 km/s, com es veu els nostres senzills càlculs donen uns resultats acceptables)



## Model de coet amb una pastilla efervescent

A tall d'exemple de coet per poder llançar a l'aula sense cap perill proposem el que segueix que fa servir com a propulsor els gasos d'una aspirina o pastilla efervescent. Només cal retallar el model per les línies contínues i enganxar en les línies de punts d'acord amb la fotografia.

Utilitzem una càpsula de plàstic amb una tapa de pressió. Una càpsula utilitzada per emmagatzemar píndoles o aliments per a peixos. Cal comprovar que la longitud de la circumferència del cilindre central del coet pot contenir la càpsula de plàstic sense problemes. També enganxem els tres triangles com a suports de el cos del coet i afegim finalment el con a la part superior del cilindre (figures 16a, 16b, 16c, 16d, 17a, 17b, 17c, 18, 19).

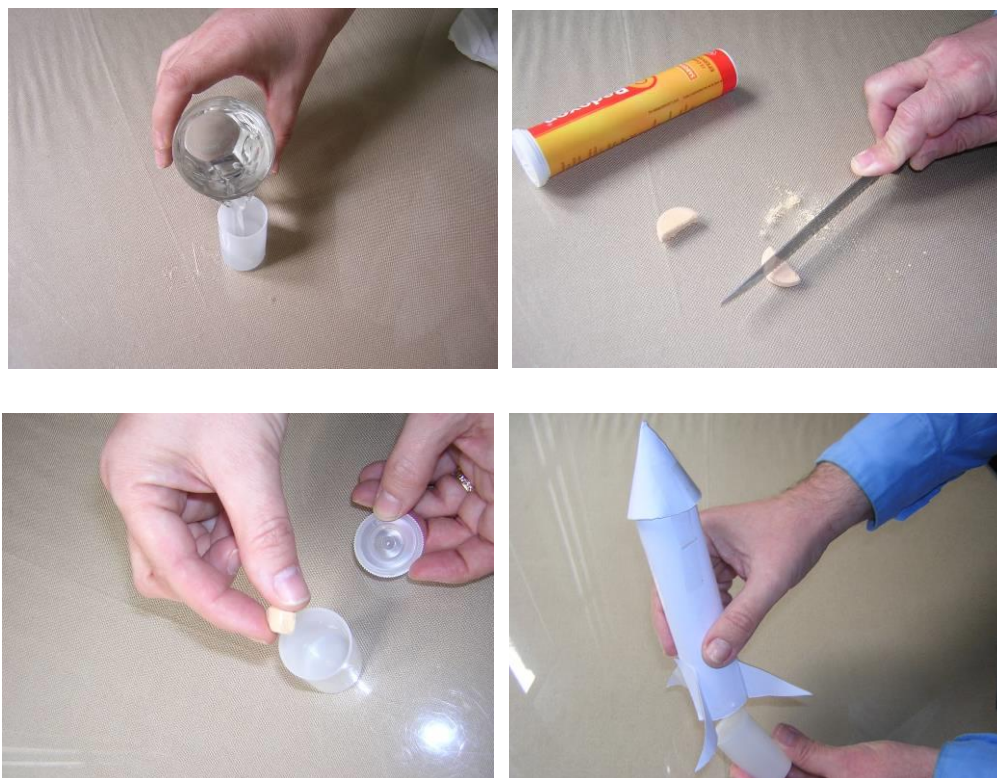


Fig. 16a, 16b, 16c y 16d: El procés en quatre imatges.

Quan s'hagi acabat el cos del coet cal realitzar el llançament. Per a això posarem aigua dins de la càpsula de pel·lícules. 1/3 de la seva altura és suficient (aproximadament 1 cm). Afegim 1/4 de l'aspirina efervescent (o una altra pastilla efervescent). Posem la tapa i el coet a sobre. Després d'aproximadament 1 minut el coet s'enlaira. Evidentment podem repetir tantes vegades com es vulgui el procés (encara resten 3/4 d'aspirina, així que a gaudir llançant coets ...).

També és possible llançar coets usant bicarbonat i vinagre

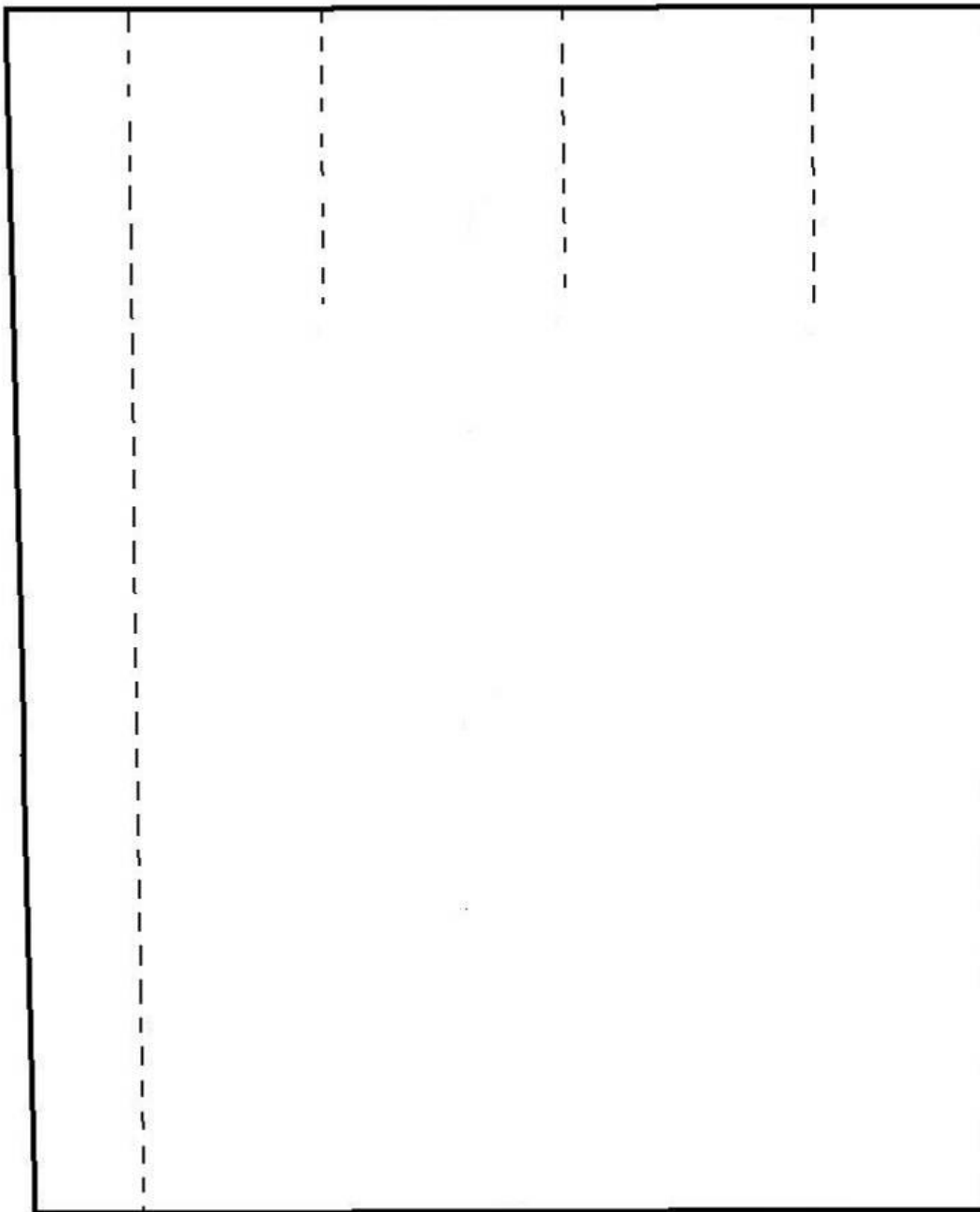


Fig. 17a: Cos del coet. Cal enganxar les aletes a la zona puntejada.

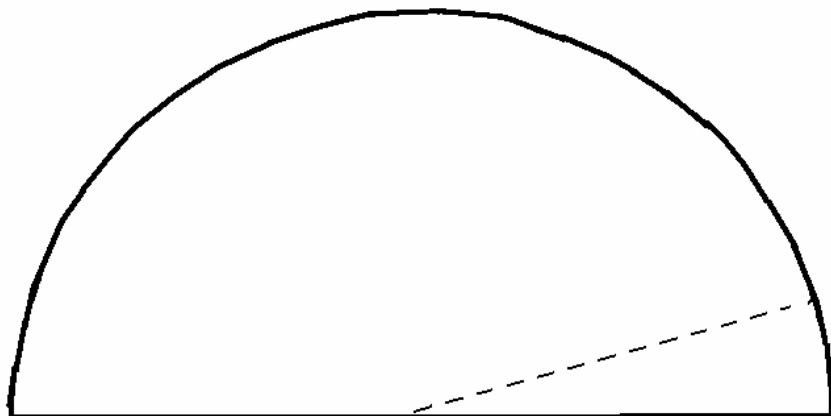


Fig.17b: Part conoidal a la zona superior del coet

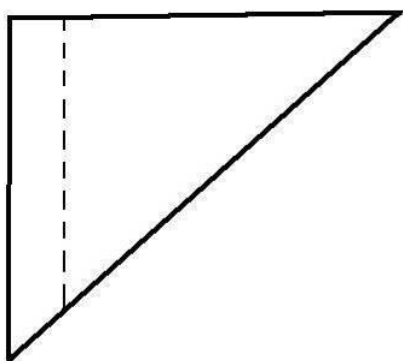


Fig. 17c: Model per les 3 aletes .

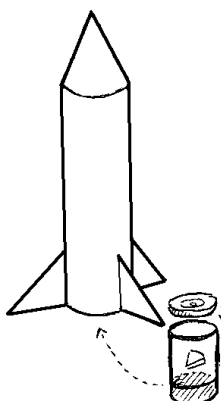


Fig. 18: Esquema simplificat

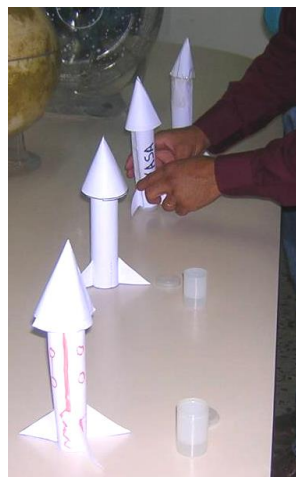


Fig. 19: Diversos coets

## Exoplanetes

Fins a l'actualitat, ha estat possible detectar uns 4000 planetes i uns 500 sistemes planetaris múltiples. Un exemple d'un dels primers planetes fotografiats directament es mostra a la figura 20.

Tots els temes d'aquest taller són temes punters i afectats de l'evolució tecnològica que permeti avançar més o menys en aquest àmbit. És possible que alguns aspectes siguin desestimats en el futur però és bo portar-los a l'escola tal com es coneixen a hora. Si posteriorment cal rectificar alguns continguts ja es farà.

Cal esmentar ara que per exemple quan Galileu en 1610, observa per primera vegada Saturn, no entén l'objecte com un planeta envoltat d'un fi anell sinó que ho interpreta com un astre amb tres cossos. Cal esperar a les observacions d'Huygens que disposa d'un telescopi millor i pot resoldre l'anell. Per aquest motiu durant uns anys la comunitat científica interpreto

erròniament l'estructura de Saturn. Exemple d'això és la pintura de Rubens que 1636-1638 que per simbolitzar a Saturn tria tres estrelles segons el recent descobriment de Galileu.

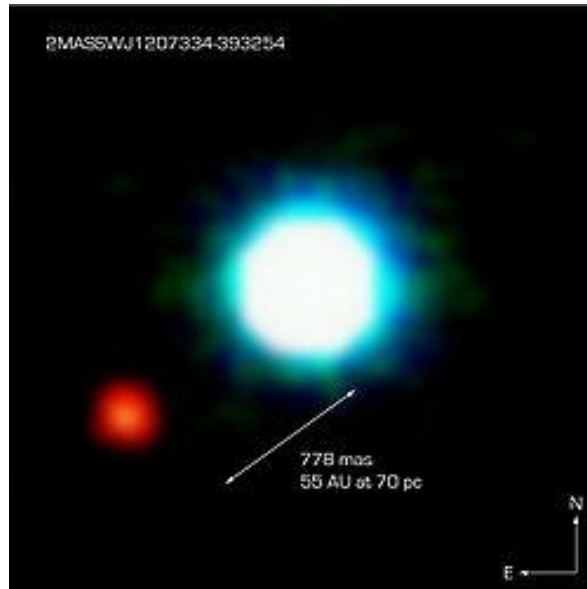


Fig. 20: El primer planeta (2M1207b) observat directament, el 16 de març de 2003 amb un dels telescopis VLT de 8m de l'ESO. Té una massa de 3-10 vegades de Júpiter i orbita a 41 UA de la seva estrella central, del tipus nana marró. El 2006, un disc de pols es va trobar al voltant de l'estrella central, proporcionant evidència de la continuïtat de la formació de planetes en aquest sistema jove (Font: ESO).



Fig. 21a y 21b: Saturn segons Rubens (1636-1638) i dibuix realitzat per Galileu a 1610

En aquesta mateixa línia és bo recordar que per exemple Ceres era considerat planeta al segle XIX (des de 1801 fins a 1850) a l'igual que els altres però després va ser classificat com asteroide. De la mateixa manera Plutó descobert el 1930 Va ser considerat planeta fins a 2006 en què va passar a ser considerat com a planeta menor a l'igual que Ceres. Així és que segurament alguns dels coneixements aquí abocaments sobre exoplanetes és possible que hauran de ser reconsiderats en el futur, però això no ens ha d'aturar per introduir aquest tema en els centres educatius.

## Nomenclatura dels exoplanetes

Es considera un planeta extrasolar o exoplaneta un planeta que orbita una estrella diferent a el Sol i que, per tant, no pertany a sistema solar. La NASA manté un catàleg (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) amb més de 4000 exoplanetes confirmats en l'any 2019. La nomenclatura dels exoplanetes és simple, i prové de la manera en estrelles binàries. Una lletra minúscula es col·loca després de el nom de l'estrella a partir de la lletra "b" per al primer planeta trobat en el sistema (per exemple: 51 Pegasi b). El següent planeta detectat en el sistema és etiquetat amb la següent lletra de l'alfabet c, d, e, f, etc (per exemple: 51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi i ó 51 Pegasi f). Així, l'ordre de les lletres no té a veure amb el període orbital dels planetes, o amb altres dels seus paràmetres. A més, l'any 2015 la Unió Astronòmica Internacional (IAU) va assignar noms als 19 primers sistemes exoplanetaris descoberts. Així, en el sistema de l'estrella Upsilon Andromedae (veure Taula 8), l'estrella principal (Ups And) té el nom alternativa de *Titawin*, i els planetes b, c i d es diran *Saffar*, *Samh* i *Makriti*. Però en l'actualitat, aquests noms no han entrat en ús ni en la comunitat d'astrònoms professionals ni dels aficionats

## Detecció de sistemes exoplanetaris

La distància a Alfa Centauri o Proxima Centauri, les estrelles més properes a nosaltres que estan només a 4,5 anys llum, és enorme en comparació amb la distància dels planetes del nostre sistema solar. De fet, Alfa Centauri és d'uns 10 000 vegades més lluny que Neptú, el nostre planeta més distant. Aquestes enormes distàncies fan la detecció de planetes al voltant d'altres estrelles impossibles fins que van ser desenvolupades sofisticades tècniques d'observació, prop de la fi de el segle passat.

La tercera estrella més brillant al cel nocturn és Alfa Centauri. Alfa Centauri és, en realitat, un sistema estel·lar triple. Consisteix en un parell binari, Alfa Centauri A i B, i una estrella nana més proper a nosaltres, anomenada Proxima Centauri. És al voltant d'aquesta tercera estrella, del tipus "nana vermella", on s'ha detectat un planeta rocós que pot tenir algunes similituds amb la Terra: Proxima b, que és com s'ha batejat a el nou exoplaneta, el més proper a la Terra que es coneix, no ha estat observat directament. Els responsables de la troballa van revelar la seva presència observant una petita anomalia en l'òrbita de la seva estrella, provocada per la influència gravitatòria de la planeta. Això ha servit per deduir la seva presència i alguna de les seves característiques. Dóna una volta al voltant del seu sol a sol 11 dies, i té una mida lleugerament superior a la Terra i probablement una superfície sòlida

Una peculiaritat d'aquest exoplaneta és la seva proximitat a la seva estrella amfitriona, Propera Centauri. Es troba a un 5% de la distància que separa la Terra de el Sol, es a dir, a uns 0.05 UA. Aquesta proximitat el convertiria en un infern si la seva estrella fos com la nostra, però que la col·loca en l'àrea d'habitabilitat en el cas d'una nana vermella. Això es deu al fet que una nana vermella com Propera Centauri, amb un 12% de la massa solar, té una brillantor de sol 0.1% del sol. Amb aquestes característiques, el nou planeta tindria una temperatura de 40 graus sota zero sense comptar amb l'efecte hivernacle d'una possible atmosfera, que podria elevar la temperatura sobre aquell món per sobre dels zero graus.

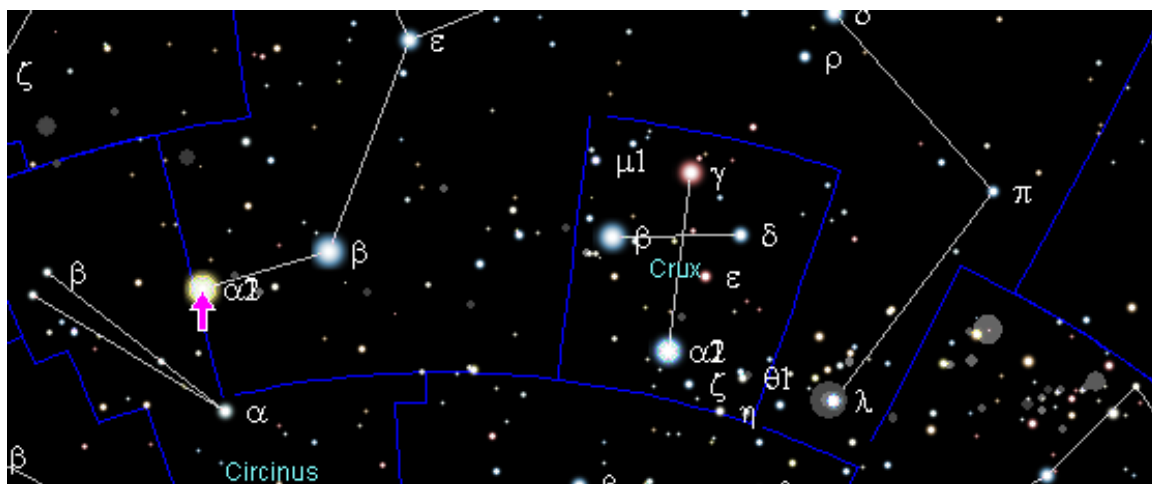


Fig. 22: Alfa centauri propera a la Creu del Sud

Un dels inconvenients per a la presència de vida en aquests sistemes planetaris al voltant d'una nana vermella és que han d'estar molt a prop de la seva estrella per tenir una temperatura a la que l'aigua pugui existir en estat líquid. Quan això succeeix, en gran part dels casos es dona un fenomen que es diu rotació sincrònica i que podem veure en la nostra pròpia Lluna. El temps de translació i el de rotació s'igualen i el planeta mostra sempre la seva mateixa cara a l'estrella. Això faria pensar en un hemisferi abrasat en què l'atmosfera s'evaporés, i un altre congelat. No obstant això, una atmosfera més densa que la de la Terra permetria matisar aquestes temperatures extremes a través de la circulació atmosfèrica i la redistribució de la calor.

## Mètode de velocitats radials

En l'actualitat, hi ha dos mètodes que estan dominant en el descobriment d'exoplanetes. Tots dos són mètodes indirectes, en què la presència d'un sistema planetari s'infereix de l'observació de l'estrella central de sistema.

El mètode de velocitat radial va ser el primer amb el qual es va trobar un exoplaneta girant al voltant d'una estrella central, amb el descobriment de 51 Pegasus b al 1995. En aquest mètode, es mesura el balanceig de l'estrella central a causa del seu moviment al voltant del baricentre de sistema estrella-planeta. Aquest moviment de l'estrella central indueix canvis molt petits en la llum de l'estrella cap al vermell o el blau (figura 22), a causa de el



desplaçament Doppler. D'aquesta manera, podem determinar la massa d'un planeta respecte a la massa de l'estrella central. A la pràctica, però, no sabem l'orientació de la majoria dels sistemes de planetes detectats amb aquest mètode i les masses dels planetes que podem extreure són masses mínimes (el que significa que les masses reals podrien ser majors).

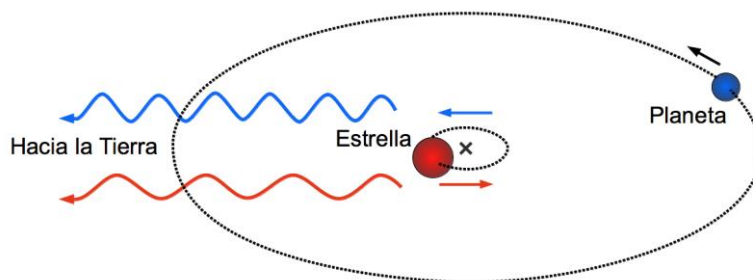


Fig. 23: Mètode de la velocitat radial per a la detecció de planetes.

## Activitat 5: L'efecte Doppler

Como se ha visto en el taller de expansion del universo el efecto Doppler es el que hace variar la longitud de onda de un sonido cuando la fuente está en movimiento. Se ha reproducido haciendo girar en un plano horizontal un reloj despertador introducido en una bolsa de tela lo atado con una cuerda. Al hacerlo girar sobre nuestras cabezas, se puede oír que cuando se acerca al espectador, la longitud de onda se acorta y el sonido es más agudo. Cuando se aleja, la longitud de onda se alarga y el sonido es más grave. El que está en el centro de giro no detecta ninguna variación.

En este caso se aprecia el efecto en las ondas luminosas, cuando una fuente se nos acerca, la longitud de onda aparente de su radiación disminuye, su luz se desplaza hacia la parte azul del espectro visible. Cuando la fuente luminosa se nos aleja la longitud de onda aparente aumenta y su luz se desplaza hacia la parte roja del espectro visible.

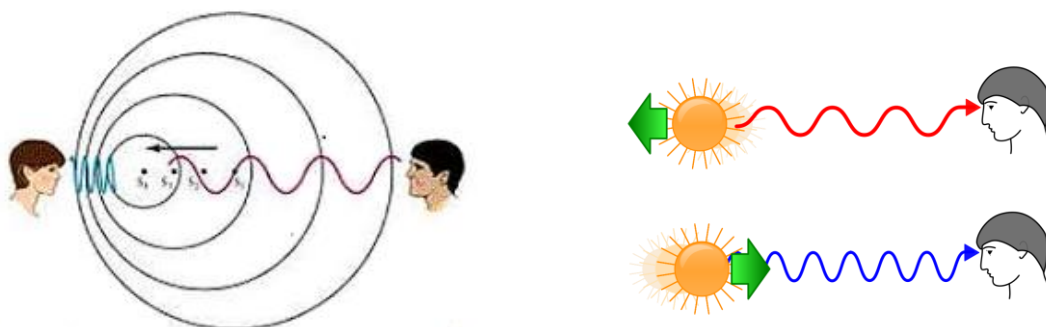


Fig. 24a: Cuando la fuente se acerca la longitud de onda disminuye y cuando la fuente se aleja la longitud de onda aumenta. Fig. 24b: Cuando la fuente se acorre al azul y cuando la fuente se aleja se corre al rojo

Este es el efecto Doppler debido al desplazamiento y es el que tienen los exoplanetas cuando se mueven en torno a la estrella anfitriona. Cuando el exoplaneta se aleja de nosotros se desplaza hacia el rojo y cuando se acerca se desplaza hacia el azul.

## Mètode de trànsits

L'altre mètode important, anomenat "mètode de trànsits" es basa en l'observació de canvis en la brillantor d'una estrella quan un dels seus planetes passa ('trànsit') davant de l'estrella, ocultant d'aquesta manera una petita part del seu disc estel·lar (figura 18). Amb el mètode de trànsits, la mida d'un planeta,  $R_p$ , es pot mesurar en relació amb la mida  $R_*$  de la seva estrella central, i es dona aproximadament per:

$$R_p / R_* = (dF / F)^{1/2}$$

on  $dF / F$  es el canvi relatiu en la brillantor observada durant el trànsit d'un planeta (per exemple,  $dF / F = 0,01$  indica una reducció d'1% de la brillantor de l'estrella durant el trànsit).

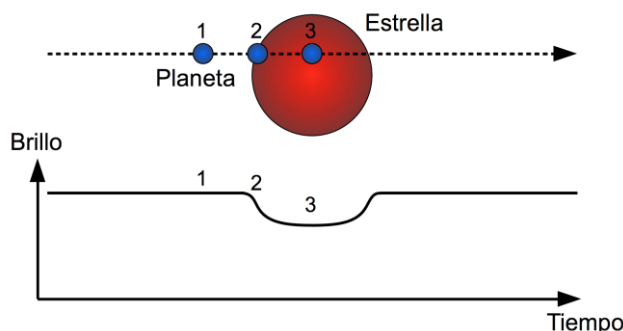


Fig. 25: Mètode de trànsit per a la detecció de planetes

## Activitat 6: Simulació de trànsit

Es pot reproduir un trànsit amb dues pilotes: un gran que simula l'estrella i una altra petita que simula l'exoplaneta girant en tron a l'estrella central o estrella amfitriona. Si l'observador està en el mateix pla de gir i aquesta observant en aquest instant, vera com el planeta passa per davant de la estrelles i en la corba de lluminositat de l'estrella s'observés una alteració (figura 26). Però és evident que si el observaodr no es troba en el mateix pla de gir, no es podrà observar cap canvi en la corba de lluminositat (figura 27).

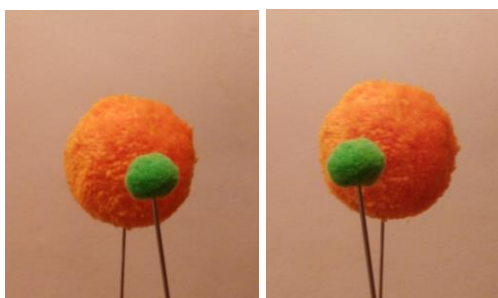


Fig. 26: L'observador en el pla de gir pot veure el trànsit de l'planeta i detectar els canvis en la corba de lluminositat .

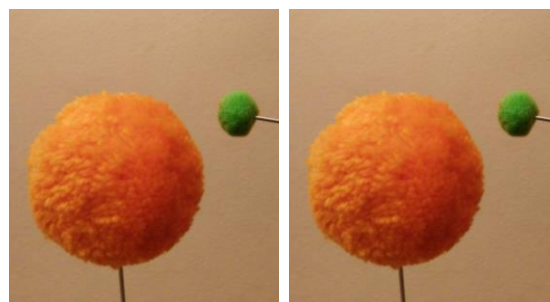


Fig. 27: L' observador fora de l'àmbit de gir, no pot visualitzar cap canvi en la corba de lluminositat.

## Mètode de lents microgravitacionals

Destaquen també altres mètodes de detecció de exoplanetes encara que són menys utilitzats. El mètode de lents microgravitacionals consisteix a observar una ampliació de la brillantor d'una estrella de fons, a causa de l'alineament d'aquesta estrella amb un sistema d'una estrella amb exoplanetes. Aquest sistema actua com a lent gravitacional i generaria una ampliació de la brillantor molt característica (línia vermella en figura 28). Perquè funcioni, ha d'existir completa alineació visual entre els tres parts (estrella de fons, l'estrella amb l'exoplaneta, i la Terra).

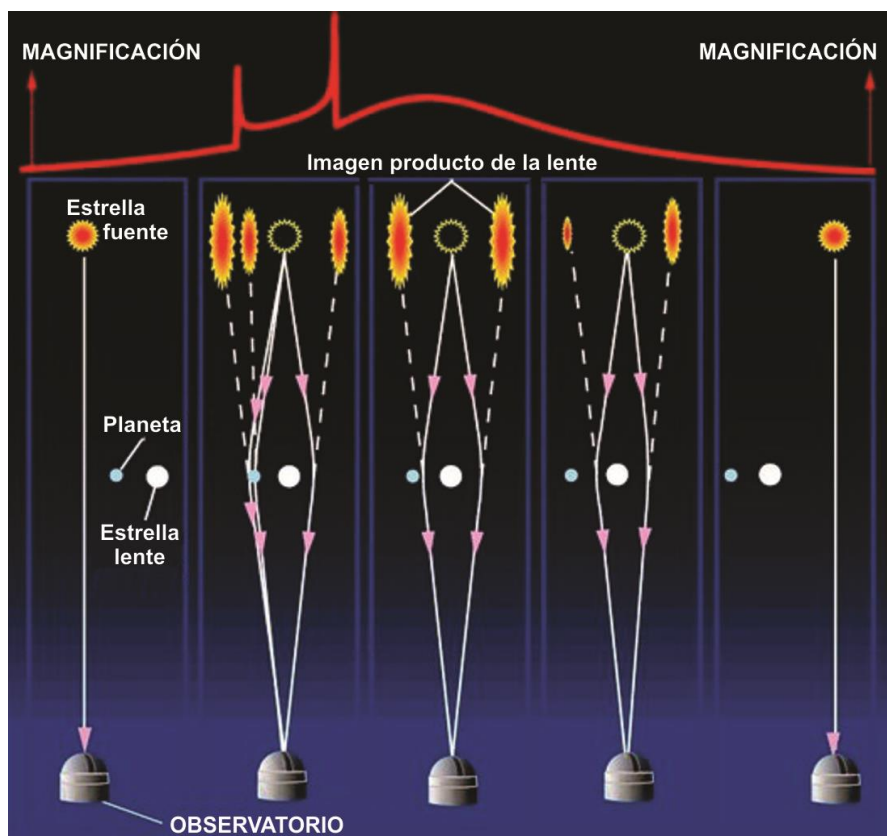


Fig. 28: Mètode de les microlents per a la detecció de planetes

## Activitat 7: Simulació de microlents

Es pot simular la detecció d'un exoplaneta en una estrella amfitriona amb un parell de peus de copa com s'ha vist al taller d'expansió de l'univers. Primer fem servir només un peu de copa i no es veu res. Després vam passar per davant amb l'altre i sorgeix un punt i després fins i tot dos.



Fig. 29a: Primer amb una sola lent . Fig. 29b: Movent la segona lent sobre la primera, apareix un punt i després 2, en tots els casos sense moure la primera lent .

## Mètode de detecció directa

I finalment, el mètode de detecció directa correspon a l'adquisició i anàlisi d'imatges de molt alta resolució de l'estrella, per tal de determinar l'existència de planetes al voltant de la mateixa. A causa de la quantitat de llum que emet un estel, aquest mètode ha estat reeixit només per a planetes que estan molt lluny de la seva estrella central i alhora que estan molt joves, així que encara emeten llum a causa de la calor generada durant la seva formació (veure també figura 30).

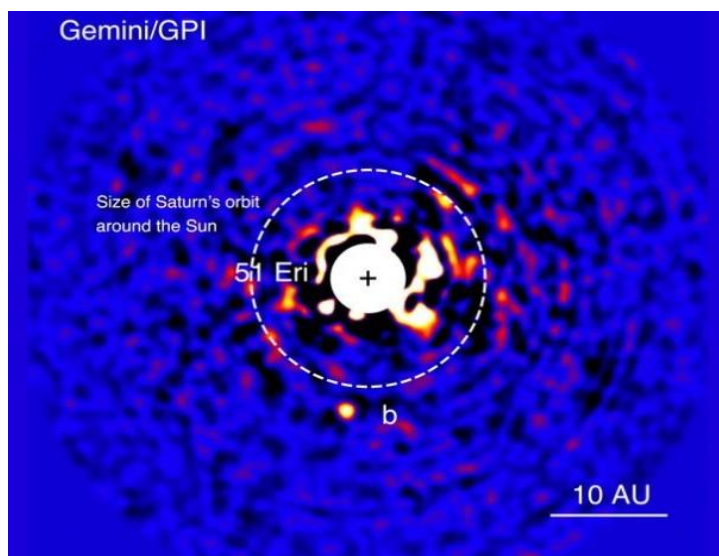


Fig. 30: Mètode de detecció directa per a la detecció de planetes

## Exemples de sistemes extrasolars

Els exoplanetes més conegudes tenen masses comparables a Júpiter, que és el planeta més gran del nostre sistema solar. És per això que sovint s'indiquen les masses i grandàries dels planetes extrasolars en unitats de masses de Júpiter  $M_J$  ( $1,90 \times 10^{27}$  kg) i radis de Júpiter  $R_J$  (71492 km). Només molt pocs planetes (al voltant de 20) se sap que tenen masses comparables a la Terra. No obstant això, hi ha més planetes (al voltant de 700, o el 20% de

tots els coneguts) amb formats comparables la Terra, de fins a 1,5 Rt (radis terrestres). S'ha demostrat que aquests planetes són els més comuns, però les tècniques actuals de detecció són més encertades en la detecció dels objectes més massius o més grans.

Nom del Planeta	Distància mitja, UA	Període orbital, dies	Massa mínima* Massa de Júpiter o Terrestre	Descobert Any	Diàmetre km
Ups And b	0,059	4,617	1,70 Mj	1996	108000*
Ups And c	0,839	241,5	13,98 Mj	1999	200000*
Ups And d	2,510	1274,6	10,25 Mj	1999	188000*
Ups And e	5,240	3832,5	1,06 Mj	2010	140000*
Gl 581 e	0,030	3,149	1,9 Mt	2009	16000*
Gl 581 b	0,041	5,368	15,7 Mt	2005	32000*
Gl 581 c	0,073	12,932	5,7 Mt	2007	22000*
Kepler-62 b	0,056	5,714	9 Mt	2013	33600
Kepler-62 c	0,093	12,441	4 Mt	2013	13600
Kepler-62 d	0,120	18,164	14 Mt	2013	48000
Kepler-62 e	0,427	122,387	1,6 Mt	2013	40000
Kepler-62 f	0,718	267,291	2,8Mt	2013	36000
Trappist-1 b	0,012	1,5111	1,02 Mt	2016	28400
Trappist-1 c	0,016	2,422	1,16 Mt	2016	28000
Trappist-1 d	0,022	4,050	0,30 Mt	2016	20000
Trappist-1 e	0,030	6,099	0,77 Mt	2017	23200
Trappist-1 f	0,039	9,206	0,93 Mt	2017	26800
Trappist-1 g	0,047	12,354	1,15 Mt	2017	29200
Trappist-1 h	0,062	18,768	0,33 Mt	2017	19600

Taula 3: Quatre sistemes extrasolars representatius amb múltiples planetes. Dades extretes de l'*Extrasolar Planets Catalog2* (excepte l'última columna). \* Aquests planetes s'han descobert per velocitats radials; per això no hi ha certesa de la seva grandària. Per als planetes gegants, amb masses de 0,5- 20 Mj, se sap que gairebé tots ells tenen un radi de 0.7-1.4 vegades del de Júpiter (50-100 mil quilòmetres), amb poca correlació amb la seva massa. Per als planetes terrestres de l'GJ861, s'ha calculat la seva ràdio suposant que la densitat del planeta és igual a la densitat de la Terra (5520 kg / m<sup>3</sup>).

En aquesta secció, considerem uns quants exemples de sistemes planetaris extrasolars que tinença tres o més planetes coneguts. La taula 1 mostra a els planetes al voltant de les estrelles Ups Andròmeda, Gliese 581, Kepler-62 i Trappist-1. Els sistemes planetaris de Ups Andròmeda i Gliese 581 van ser descoberts amb el mètode de velocitats radials i d'aquests planetes coneixem únicament els seves masses mínimes, però no a els seus mesures. És considera que a els Seus radis estan compresos entre 50000-100000 km (encara que a la taula 1 figuren un dels possibles valors). Per Gliese 581, diversos planetes altres (d, f, g) han Estat anunciats, però van ser contestats en altres publicacions; així a els Seus descobriment S'HAN retirats, Probablement va ser causat per Senyals marginals o sorolls d'altres fonts en les dades.

Els planetes de sistema Kepler-62 van ser descoberts a partir dels trànsits. Per tant, es coneixen les seves mides. De les seves masses només coneixem límits superiors (masses màxim), i són massa petits (i de pes lleuger) per a ser detectable amb el mètode de velocitats radials. No obstant això, hi ha també molts planetes que s'han detectat tant amb el trànsit i el mètode de velocitats radials, i coneixem tant les seves masses i les seves grandàries.

Hi ha alguns exoplanetes que estan molt a prop de l'estrella central (p.ex. tots els planetes de Gliese 876 tenen òrbites més properes a l'estrella que Mercuri a el Sol). Altres tenen planetes més llunyans, com el sistema de l'2M1207b (veure figura 20), amb un planeta en formació a 41 UA de distància, o 1.4 vegades la distància de Neptú. Una de les possibilitats per a visualitzar aquestes dades consisteix a construir models a escala de sistema planetari triat. Això ens permetrà comparar fàcilment els uns amb els altres i amb el nostre sistema solar.

Nom del Planeta	Distància Mitja, AU	Període Orbital, anys	Massa, Masses de Júpiter	Diàmetres, km
Mercuri	0,3871	0,2409	0,0002	4879
Venus	0,7233	0,6152	0,0026	12104
Terra	1,0000	1,0000	0,0032	12756
Mart	1,5237	1,8809	0,0003	6794
Júpiter	5,2026	11,8631	1	142984
Saturn	9,5549	29,4714	0,2994	120536
Urà	19,2185	84,04	0,0456	51118
Neptú	30,1104	164,80	0,0541	49528

Taula 4: Planetes del Sistema Solar

Actualment sabem que hi ha també exoplanetes al voltant d'estrelles molt diferents a el Sol. En 1992 els ràdio-astrònoms van anunciar el descobriment del primer exoplaneta, al voltant de l'púlsar PSR 1257 + 12. Va trigar tres anys més per descobrir el primer exoplaneta al voltant d'una estrella "normal" de tipus solar, 51 Pegasi.

Després han estat detectats exoplanetes al voltant de: nanes vermelles (p. Ex. Gliese 876 el 1998), estrelles gegants (Iota Draconis en 2001), nanes marrons (2M1207 el 2004), estrelles de tipus A (Fomalhaut en 2008, veure figura 30 ), nanes blanques (WD1145-1017 el 2015, amb un planeta que es desintegra), al voltant de sistemes binaris (Kepler-16b a 2011), entre d'altres.

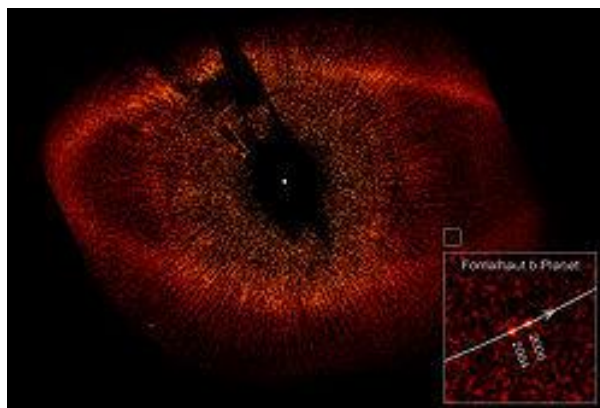


Fig. 31: Planeta Fomalhaut b dins del núvol de pols interplanetària de Fomalhaut en una imatge del Hubble Space Telescope, amb posicions en 2004 i 2006 (veure imatge petit). (Foto: NASA).



## Activitat 8: Models de sistemes exoplanetaris

Primer vam triar l'escala de el model. No és convenient fer servir la mateixa escala per diàmetres i distàncies per un problema de mides. Per a distàncies, l'escala considerada és: 1 UA = 1 m. En aquest cas tots els exoplanetes poden cabre dins d'una aula típica, així com els primers cinc planetes del nostre sistema solar. Haurà d'utilitzar com a escala de mida per al planeta, un **radi de planeta de 10000 km correspon a un diàmetre de el model de 0,5 cm**. En aquest cas, el planeta més gran, Júpiter, amb un radi de 71000 km és de 7 cm de diàmetre i el més petit, Mercuri, serà de 0,2 cm. Si l'activitat es duu a terme fora (per exemple, al pati de l'escola), podem construir un model complet amb escales anàlogues per diàmetres i distàncies. Per a les estrelles amfitriona es pren la mateixa escala, un radi de l'estrella amfitriona de 10000 km correspon a un diàmetre de el model de 0,5 cm.

En les condicions expressades d'escala es procedeix a construir el sistema solar (taula 2), o qualsevol dels sistemes de la taula 1 utilitzant els radis i els valors mitjans de distàncies inclosos en la taula esmentada. Per simplificar el procés s'inclou a continuació les taules amb l'escala esmentada. Es comparen tots els sistemes d'exoplanetes amb el nostre.

Sistema Solar	Distància	Diàmetre, km	Distància model	Diàmetre model
Mercuri	0,39 UA	4879	40 cm	0,2 cm
Venus	0,72 UA	12104	70 cm	0,6 cm
Terra	1 UA	12756	1,0 m	0,6 cm
Mart	1,5 UA	6794	1,5 m	0,3 cm
Júpiter	5,2 UA	142984	5,0 m	7 cm
Saturn	9,55 UA	120536	10 m	6 cm
Urà	19,22 UA	51118	19 m	2,5 cm
Neptú	30,11 UA	49528	30 m	2,5 cm

Taula 5: Sistema Solar. L'estrella amfitriona, el Sol, es G2V, amb un diàmetre en el modelo de 35 cm. Zona d'habitabilitat en verd.

Es comença amb el primer sistema planetari que es va descobrir el 1999 detectant els seus planetes per efecte Doppler aplicat a la seva velocitat radial. Aquest mètode, a causa del nivell de la tecnologia, permet detectar exoplanetes molt grans i propers a l'estrella amfitriona. Sens dubte el mètode de detecció també determina les característiques dels planetes localitzats. Amb aquest mètode de detecció es localitzaven planetes gasosos com Júpiter o fins i tot mes grans. Per localitzar planetes que poguessin allotjar la vida es va fer necessari tractar de detectar planetes més petits i terrestres tipus la Terra.

Ups Andromedae/Titawin	Distància	Diàmetre, km	Distància model	Diàmetre model
Ups And b / Saffar	0,059 UA	108000	6 cm	5.5 cm
Ups And c / Samh	0,830 UA	200000	83 cm	10,0 cm
Ups And d / Majriti	2,510 UA	188000	2,5 m	9,5 cm
Ups And e / Titawin e	5,240 UA	140000	5,2 m	7.0 cm

Taula 6: Estrella amfitriona Upsilon Andromedae és una estrella F8V a 44 anys de llum en la constel·lació d'Andròmeda. És un estel binari compost per Ups And A, una estrella bastant similar a el Sol, una mica més

calenta i brillant, amb un radi de 1.28 R<sub>sol</sub> i Ups And B que és una petita nana vermella. En el model Ups And A té un diàmetre de 45 cm.

Els planetes gasosos es considera que no poden albergar vida en els sentit que nosaltres la coneixem i s'està tendint a l'estudi de planetes rocoses tipus la Terra en lloc dels planetes tipus Júpiter com eren el cas dels primers que es van descobrir. Gliese 581 és un dels primers sistemes on es va aconseguir detectar exoplanetes del tipus terrestres. Tot i que des 2014 alguns dels seus exoplanetes han estat discutits. El mètode de detecció considerat en aquest cas va ser el de velocitats radials però a causa de la baixa massa de l'GL 581 de 0.31 M<sub>sol</sub> es va aconseguir trobar exoplanetes tipus terrestres.

Gliese 581	Distància	Diàmetre, km	Distància model	Diàmetre model
Gliese 581 e	0,030 UA	15200	3 cm	0.8 cm
Gliese 581 b	0,041 UA	32000	4 cm	1.6 cm
Gliese 581 c	0,073 UA	22000	7 cm	1.1 cm

Taula 7: L'estrella amfitriona Gliese 581 és una nana vermella M2.5V situada a 20,5 a.l en la constel·lació de Lliura. Té un terç de la massa de el Sol i és menys lluminosa i més freda que ell. La seva ràdio és 0,29 R<sub>sol</sub> i en el model correspon a un diàmetre de 10 cm.

El 2009 es va llançar la missió Kepler. Aquest observatori espacial orbita al voltant de el Sol i buscava planetes extrasolars, especialment aquells de mida similar a la Terra que es troben a la zona d'habitabilitat de la seva estrella amfitriona. En els 9 anys que dur la missió es van detectar uns 3000 exoplanetes i encara hi ha milers de candidats a l'espera de ser confirmats. Kepler va escombrar un 0,25 per cent de cel i les seves troballes van demostrar que els planetes són molt comuns en la Via Làctia. En 2018 es va llançar el satèl·lit TESS dissenyat per identificar planetes propers amb una mida no més gran de dues vegades el terrestre i en una zona molt més àmplia de el cel que abastarà el 85 per cent de la volta del cel. Tant Kepler com TESS han estat dissenyats per explorar el cel a la recerca de trànsits planetaris.

Kepler 62	Distància	Diàmetre, km	Distància model	Diàmetre model
Kepler 62 b	0,056 UA	33600	5,5 cm	1.7 cm
Kepler 62 c	0,093 UA	13600	9 cm	0.7 cm
Kepler 62 d	0,120 UA	48000	12 cm	2.4 cm
Kepler 62 e	0,427 UA	40000	43 cm	2.0 cm
Kepler 62 f	0,718 UA	36000	72 cm	1.8 cm

Taula 8: Estrella amfitriona Kepler 62 és una K2V, està en la constel·lació de Lyra a 1200 a.l. És un estel lleugerament més freda i més petita que el Sol. La seva ràdio és 0,64 R<sub>sol</sub> i en el model correspon a un diàmetre de 22 cm

Kepler-62 és un dels exemples més interessants d'un sistema planeta potencialment habitable. De particular interès són els planetes e i f, ja que són els millors candidats per a planetes sòlids que cauen a la zona habitable de la seva estrella. Els seus ràdios, 1,61 i 1,41 radis terrestres, respectivament, els situen en l'interval de ràdios dels que poden ser planetes terrestres sòlids i cauen dins de la zona habitable de Kepler-62: el rang de distància en la qual a l' menys per a algunes condicions atmosfèriques, aquests dos planetes podrien tenir aigua líquida en les seves superfícies, potser que els cobreixi ells per complet. Per Kepler-62e, que es troba prop de la partió interior de la zona habitable, això requeriria una cobertura de núvols

reflectant que redueix la radiació que escalfa la superfície. Kepler-62f, per contra, es troba a la zona externa de la zona habitable, a l'igual que Mart en el nostre sistema solar. Allà, quantitats significatives de diòxid de carboni es requereixen per mantenir calenta la superfície d'un planeta d'aigua suficient perquè la superfície de el líquid.

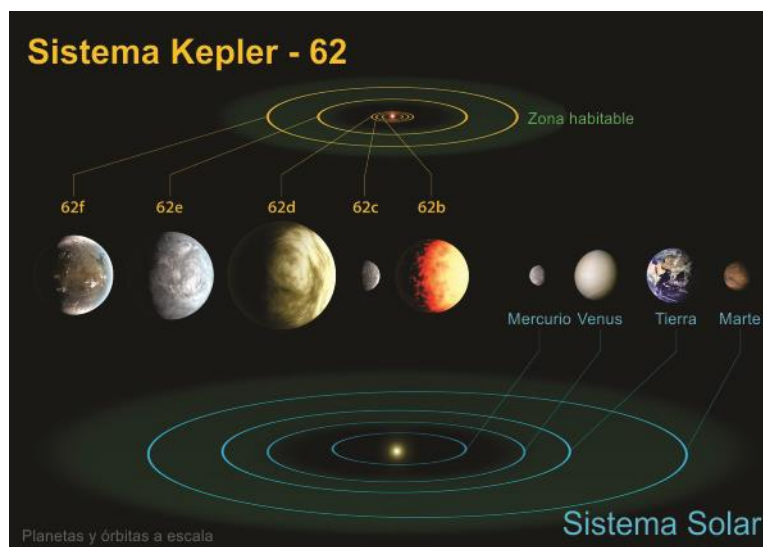


Fig. 32: El sistema Kepler-62 en comparació amb el sistema solar interior. La regió verd indica la zona habitable - la zona on la vida tal com la coneixem podria existir. Font NASA Ames / JPL-Caltech.

Una nana vermella propera, catalogada com 2MASS J23062928-0502285 va ser rastrejat per trànsits en 2015 amb el telescopi Trappist, descobrint inicialment uns tres planetes de mides terrestres, batejats Trappist-1b, c i d. Estudis posteriors realitzats per equips internacionals utilitzant els telescopis espacials Hubble, Kepler, Spitzer i el telescopi Speculoos a Xile, van permetre a conèixer millor un total de set planetes. Cinc d'aquests planetes (b, c, e, f i g) són similars en grandària a la Terra, i dos (d i h) són de grandària intermèdia entre Mart i la Terra. Tres dels planetes (e, f i g) orbiten dins de la zona habitable.

Els planetes de trappist-1 orbiten tots molt a prop de la seva estrella i passen tan a prop els uns dels altres que les interaccions gravitacionals són significatives, i els seus períodes orbitals són gairebé ressonants. Els planetes apareixerien prominents en el cel dels seus veïns, i en alguns casos, diverses vegades més grans del que la Lluna apareix des de la Terra. De fet, les seves masses no s'han determinats amb velocitats radials sinó de les desviacions en la periodicitat dels seus òrbites, usant un mètode anomenat anàlisi de 'transit timing variations' (desviacions de el temps dels trànsits).

Es van poder obtenir les masses de tots ells amb un marge d'error molt petit, el que va permetre determinar amb precisió la densitat, la gravetat superficial i la composició dels mateixos. Els exoplanetes tenen un rang en massa d'aproximadament 0,3 Mt a 1,16 Mt, amb densitats de 0,62 a 1,02 terrestres (3,4-5,6 g / cm<sup>3</sup>). Els planetes c i e són gairebé totalment rocosos, mentre que b, d, f, g i h tenen una capa de volàtils en forma de closca d'aigua, closca de gel o una atmosfera espessa. Trappist-1d sembla tenir un oceà d'aigua líquida que comprèn aproximadament el 5% de la seva massa, per comparació, el contingut d'aigua de la Terra és <0,1%, mentre que les capes d'aigua de Trappist-1 f i g probablement estiguin congelades.

Trappist-1e té una densitat lleugerament més alta que la Terra, el que indica una composició de roca terrestre i ferro. A més, es va descobrir que l'atmosfera de Trappist-1b estava per sobre de el límit de l'hivernacle desbocat de 101 a 104 bar de vapor d'aigua. Els planetes c, d, e i f no tenen atmosferes d'hidrogen-heli. També es va observar el planeta g, però no hi va haver prou dades per descartar una atmosfera d'hidrogen.

Trappist - 1	Distància UA	Diàmetre, km	Distància model	Diàmetre model
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

Taula 9: Estrella amfitriona Trappist-1 és una nana vermella de tipus M8V situada a la constel·lació d'Aquari a 40 a.l. L'estrella és una mica més gran que Júpiter, amb un diàmetre de 168000 km i en el model de 4 cm. En el model, les distàncies als planetes són menors que el diàmetre de l'estrella, dóna una idea del compacte del sistema.

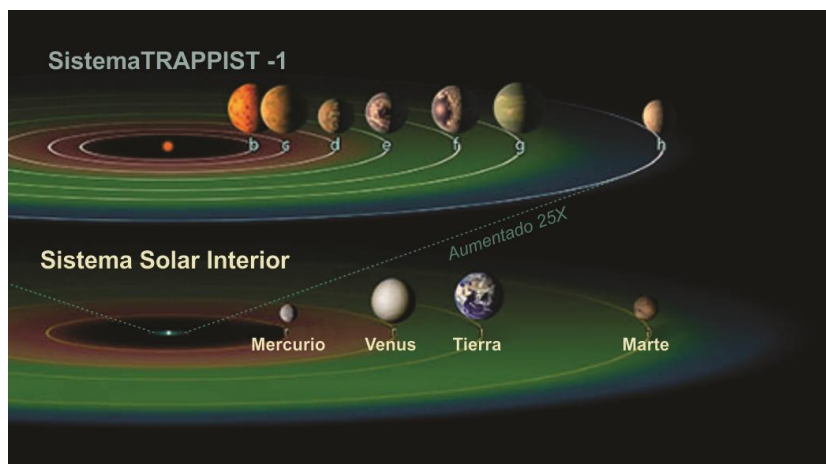


Fig. 33: El sistema Trappist- 1 en comparació amb el sistema solar interior. La regió verd indica la zona habitable - la zona on la vida tal com la coneixem podria existir.



Fig. 34: Un cop construïts tots els models cal comentar els punts destacats en la presentació de la zona d'habitabilitat. Segons la massa i el tipus d'estrella amfitriona la zona d'habitabilitat està més o menys propera.

Encara hi ha moltes preguntes sense resposta sobre les propietats i l'habitabilitat dels exoplanetes. Saber més d'ells i aprendre més sobre les seves propietats i característiques ha motivat per diverses missions espacials actuals i també futures, com les missions TESS i JWST de la NASA i Cheops i PLAT de l'ESA, aquesta última amb el llançament l'any 2026 i esperant una multiplicació de el nombre de planetes terrestres coneguts.

## **Bibliografia**

- Gaitsch, R., “*Searching for Extrasolar Planets*”, Proceedings of 10<sup>th</sup> EAAE International Summer School, Barcelona 2006.
- Haswell, C.A., *Transiting Exoplanets*. Cambridge Univ. Press. 2010
- Perryman, M., *The Exoplanet Handbook*, 2nd edition, Cambridge Univ. Press. 2018
- Ros, R.M., “*A simple rocket model*”, Proceedings of 8th EAAE International Summer School, 249, 250, Barcelona, 2004.
- Seager, S., *Exoplanets*, University of Arizona Press; 2011
- Vilks I., “*Models of extra-solar planetary systems*”, Proceedings of 10<sup>th</sup> EAAE International Summer School, Barcelona 2006.