

Planetas y exoplanetas

Rosa M. Ros, Hans Deeg, Ricardo Moreno,

International Astronomical Union, Universidad Politécnica de Cataluña
(Barcelona, España), Instituto de Astrofísica de Canarias and University of La
Laguna (Canarias, Spain), Colegio Retamar (Madrid, Spain)

Resumen

Este taller se divide en dos partes. En primer lugar se presentan actividades para ayudar a comparar los diferentes planetas entre sí. Se pretende dar contenido a las tablas de datos para que no queden como fríos datos sin más. Para ello se presentan modelos del Sistema Solar desde diferentes tipos de vista: distancias, diámetros, densidades, gravedades superficiales, etc.

En la actualidad, varios métodos se utilizan para encontrar exoplanetas, más o menos indirectamente. Ha sido posible detectar unos 4000 planetas y unos 500 sistemas planetarios múltiples.

Objetivos

- Comprender que significan los valores numéricos que resumen las tablas de datos de los planetas del Sistema Solar
- Entender las principales características de los sistemas planetarios extra-solares mediante un paralelismo establecido con Júpiter y sus satélites galileanos.

El Sistema solar y las tablas de datos

El Sistema Solar permite aventurar a los alumnos a realizar comparaciones entre los diferentes planetas lo que les llevara a elaborar maquetas comparando diferentes aspectos. Para poder llevar a cabo este cometido hay que usar los datos de la tabla 1.

Planeta	Diámetro (km)	Distancia al Sol (km)
Sol	1 392 000	
Mercurio	4 878	$57.9 \cdot 10^6$
Venus	12 180	$108.3 \cdot 10^6$
Tierra	12 756	$149.7 \cdot 10^6$
Marte	6 760	$228.1 \cdot 10^6$
Júpiter	142 800	$778.7 \cdot 10^6$
Saturno	120 000	$1\,430.1 \cdot 10^6$
Urano	50 000	$2\,876.5 \cdot 10^6$
Neptuno	45 000	$4\,506.6 \cdot 10^6$

Tabla 1: Datos de los cuerpos del Sistema Solar

En todas las ocasiones el principal objetivo del modelo es hacer que sean comprensibles los datos. Los millones de km no son fácilmente imaginables, en cambio si se traducen a distancia y tamaño que ellos suelen manejar son más asequibles.

Varias Maquetas del Sistema Solar

Actividad 1: Maquetas de diámetros

En un papel suficientemente grande de color amarillo, se recorta un círculo que representará el Sol. Los diferentes planetas se recortaran en cartulina y se dibujaran sus características morfológicas. Finalmente se pegaran todos ellos sobre el disco solar.

A continuación figuran los resultados obtenidos con una escala de 1cm por cada 10.000 km.: Sol 139 cm, Mercurio 0.5cm, Venus 1.2 cm, la Tierra 1.3 cm, Marte 0.7 cm, Júpiter 14.3 cm, Saturno 12.0 cm, Urano 5.0 cm y Neptuno 4.9 cm.

Sugerencia: la maqueta anterior puede realizarse pintando las planetas sobre una camiseta, eso sí siempre a escala. Resulta más atractivo si se pintan algunos detalles.



Fig. 2a y 2b: Ejemplos de camiseta que proporcionan comparaciones a escala entre los diámetros del Sol y los planetas

Actividad 2: Maqueta de distancias

Si atendemos solo a las distancias entre los planetas se puede elaborar otra maqueta que es fácil situar en cualquier pasillo de la escuela. Basta cortar una cartulina a tiras de 10 cm de ancho, que iremos uniendo hasta tener una larga cinta de varios metros (figura 3). A continuación, se pegan a la distancia que les corresponde el nombre de los diferentes planetas.

Si se usa una escala de 1cm para cada 10 millones de km los resultados obtenidos son

Mercurio 6 cm, Venus 11 cm, la Tierra 15 cm, Marte 23 cm, Júpiter 78 cm, Saturno 143 cm, Urano 288 cm y Neptuno 450 cm.

Fig. 3: Maqueta de distancias.

Una opción simpática para este modelo consiste en usar un rollo de papel higiénico utilizando las porciones señaladas en el mismo como unidades. Por ejemplo, se puede tomar como escala 1 porción de papel para cada 20 millones de km.

Actividad 3: Maqueta de diámetros y distancias

El siguiente desafío consiste en intentar hacer una maqueta que represente los cuerpos a escala y a la distancia correspondiente. El problema es que no es tan sencillo como puede parecer encontrar una escala que permita representar los planetas por objetos no demasiado pequeños y que las distancias entre ellos no sean exageradamente grandes, ya que en ese caso no son representables y el modelo es poco útil para los alumnos porque no puede asimilarlo suficientemente bien. A título de sugerencia es una buena idea usar el patio del centro para hacer el modelo y usar pelotas para los planetas ya que hay de cualquier diámetro.

Fig. 4: El Sol y los planetas de la maqueta de diámetros y distancias.

A modo de ejemplo damos una posible solución. En un extremo del patio situamos una pelota de baloncesto de unos 25 cm de diámetro que representa el Sol. Mercurio será la cabeza de una aguja de picar (1 mm de diámetro) situado a 10 m del Sol. La cabeza, algo mayor, de otra aguja de picar (2 mm de diámetro) será Venus a 19 m del Sol, La Tierra es la cabeza de otra aguja como la anterior (2 mm) a 27 m del Sol. Marte es otra cabeza de aguja, algo menor

(1mm) situado a 41 m del Sol. Normalmente aquí se acabo el patio de la escuela, si es que no se terminó antes. Los siguientes planetas habrá que situarlos en otros lugares fuera del patio, pero al ser próximo a la escuela los alumnos conocen bien las distancias. Una pelota de ping-pong (2.5 cm de diámetro) corresponde a Júpiter a 140 m del Sol. Otra pelota de ping-pong (2 cm de diámetro) será Saturno a 250 m del Sol, una canica de cristal (1 cm de diámetro) representará Urano a 500m del Sol y otra canica (1 cm) situada a 800m será Neptuno.

Hay que hacer hincapié en que este sistema planetario no cabe en ninguna escuela. Pero hay que considerar que si reducimos las distancias, los planetas serian más pequeños que la cabeza de una aguja de picar y prácticamente serían imposibles de visualizar. Para terminar podéis calcular cual es la escala que se ha utilizado para elaborar este modelo.

Actividad 4: Maqueta en el plano de la ciudad

La idea es sencilla, usar la escala de un mapa para imaginar en la ciudad donde esta situada la escuela la posición de los diferentes planetas si el Sol esta situado en la puerta del centro escolar. A modo de ejemplo se presenta el plano de Barcelona con diferentes objetos (concretamente frutas y legumbres) que estarían situados en las diferentes calles para así poder imaginar mejor las dimensiones. Como ejercicio se sugiere hacer el mismo trabajo con el plano de la propia ciudad.

Fig. 5: Mapa del Ensanche de Barcelona con algunos planetas

En el plano de la figura, Mercurio es un grano de caviar, Venus y la Tierra un par de guisantes, Marte un grano de pimienta, Júpiter una naranja, Saturno una mandarina y Urano y Neptuno un par de nueces, y el Sol, como no hay ninguna esfera vegetal suficientemente

grande los propios alumnos lo imaginaron como una esfera del tamaño de un lavavajillas. Cualquier lector puede hacer lo mismo con su propia ciudad.

Fig. 6a y 6b: Instantáneas de la ciudad de Metz.

En la ciudad de Metz (Francia) hay un Sistema Solar dispuesto a través de sus calles y plazas, con los correspondientes planetas acompañados de paneles de información para el transeúnte.

Actividad 5: Maqueta de distancias-luz

En astronomía, es usual usar el año luz como unidad de medida. Esta misma idea puede ser ilustrativa para un modelo del Sistema Solar. Basta considerar la velocidad de la luz $c = 300.000 \text{ km/s}$. Por lo tanto, la distancia que corresponde a 1 segundo luz es de 300.000 km. Por ejemplo, para la Luna que esta situada a 384.000 km, el tiempo que tarda la luz en llegar de la Luna a la Tierra es de $384.000/300.000 = 1,3$ segundos.

Fig. 7: Otro ejemplo de modelo

Usando estas unidades se solicitara a los alumnos que calculen el tiempo necesario para que la luz del Sol llegue a cada uno de los planetas del Sistema Solar. (A modo de solución añadimos el tiempo que tarda la luz del Sol en llegar a Mercurio es de 3,3 minutos, a Venus 6,0 minutos, a la Tierra 8,3 minutos, a Marte 12,7 minutos, a Júpiter 43,2 minutos, a Saturno

1,32 horas, a Urano 2,66 horas y a Neptuno 4,16 horas). Podemos proponerles que se imaginen como sería una conversación por video-conferencia entre el Sol y cualquier planeta.

Introducimos aquí también la distancia a la estrella más cercana, ya que es muy útil para visualizar las enormes distancias a otras estrellas, que es la razón por qué es tan difícil de detectar planetas extrasolares. La más cercana a nosotros es Alfa Centauri a una distancia de 4,37 años luz o $4.13 \cdot 10^{13}$ kilómetros. Se puede pedir a los estudiantes que calculen la distancia a esta estrella en cualquiera de los modelos de sistemas planetarios que se han mencionado anteriormente. En el "modelo patio de la escuela", con una escala de 1 cm por 56.000 kilómetros, la estrella sería a una distancia de 7 375 kilómetros!

Actividad 6: Modelo del disco solar desde cada planeta

Desde un planeta, por ejemplo la Tierra, el Sol se ve bajo un ángulo α (figura 8). Para valores de α muy pequeños, se toma $\tan \alpha \approx \alpha$ (en radianes)

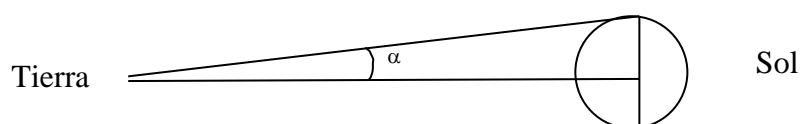


Fig. 8: Desde la Tierra el Sol se ve bajo un ángulo α .

Sabiendo que el diámetro solar es de $1,4 \cdot 10^6$ km o sea un radio de $0,7 \cdot 10^6$ km, y que la distancia Tierra-Sol es $150 \cdot 10^6$ km, se deduce:

Y en grados:

Es decir, desde la Tierra, el Sol se ve del tamaño 2 veces $0,255^\circ = 0,51^\circ$, esto es, aproximadamente, medio grado. Repitiendo el mismo proceso para cada planeta se obtienen los resultados de la siguiente tabla 2 y se puede representar su tamaño (figura 9).

Planetas	$\tan \alpha$	α (°)	α (°) aprox.
Mercurio	0,024	1,383	1,4
Venus	0,0129	0,743	0,7
Marte	0,006	0,352	0,4
Júpiter	0,0018	0,1031	0,1
Saturno	0,000979	0,057	0,06
Urano	0,00048	0,02786	0,03
Neptuno	0,0003	0,0178	0,02

Tabla 2: Resultados para los distintos planetas.

Fig. 9: El Sol visto desde cada planeta: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Actividad 7: Modelo de densidades

El objetivo de este modelo consiste en buscar muestras de materiales que sean fácilmente manipulables y que tengan una densidad similar a cada uno de los cuerpos del Sistema Solar, para así poder “sentirlos en las manos”.

	Densidad (g/cm ³)
Sol	1.41
Mercurio	5.41
Venus	5.25
Tierra	5.52
Luna	3.33
Marte	3.9
Júpiter	1.33
Saturno	0.71
Urano	1.3
Neptuno	1.7

Tabla 3: Densidades de los cuerpos del Sistema Solar



Fig. 10 Modelo de densidades

Minerales	Densidad	Otros materiales	Densidad
Yeso	2.3	Glicerina	1.3
Ortosa	2.6	Corcho	0.24
Azufre	1.1-2.2	Aluminio	2.7
Alita	2	Hierro	7.86
Cuarzo	2.65	Cemento	2.7 – 3.1
Bórax	1.7	Vidrio	2.4 – 2.8
Blenda	4	Estaño	7.3
Pirita	5.2	Arcilla	1.8 – 2.5
Hematíes	5.4	Baquelita	1.25
Calcita	2.7	Madera de roble	0.90
Galena	7.5	Madera de pino	0.55

Tabla 4: Ejemplos de densidades de algunos materiales

Partiendo de la tabla 3 de densidades de los planetas, basta comparar con las densidades de diversos minerales (en todas las escuela suele haber una colección de materiales) o en algunos casos usar muestras de otros materiales fáciles de encontrar como el vidrio, cerámica, madera, plásticos, etc. A continuación presentamos la tabla 4 con algunos ejemplos de densidades orientativas de algunos materiales.

En caso de utilizar otro tipo de material que no figure en esta tabla 4, es muy fácil calcular su densidad. Basta tomar una porción de este material, pesarlo para conocer m e introducirlo en un recipiente de agua y medir su volumen V . La densidad d del material será,

Por cierto hay que hacer notar a los alumnos que Saturno “flotaría” en el agua, su densidad es menor que 1.

Actividad 8: Modelo de achatamiento de los planetas

Para visualizar la deformación (achatamiento) de los planetas gaseosos debido a la fuerza centrífuga generada por su rotación construiremos un sencillo modelo.

Tal como se puede ver en la figura 11, con un palo y unas tiras de cartulina se puede construir este sencillo modelo que al girar reproduce el achatamiento que tiene lugar en los planetas del Sistema Solar.

1. Recortad unas tiras de cartulina de 35 x 1 cm.
2. Las sujetáis a un palo cilíndrico de 50 cm de largo y 1 cm de diámetro, procurando que por la parte superior no puedan subir o bajar, mientras que en la parte inferior puedan desplazarse con libertad a lo largo del palo.
3. Hacedlo girar situándolo entre las dos manos y haciendo un rápido movimiento de rotación en un sentido y otro. Veréis como la fuerza centrífuga deforma las bandas de cartulina (figura 11) de la misma forma que actúa sobre los planetas.



Fig. 11: Modelo para simular el achatamiento

Actividad 9: Modelo sobre periodos orbitales planetarios.

Es bien sabido que los planetas orbitan en torno al Sol con diferentes velocidades y periodos orbitales (tabla 5). Conocido el período y la distancia media al Sol se puede deducir la velocidad orbital media del planeta al recorrer su órbita. Veamos a modo de ejemplo el caso de la Tierra, pero se puede repetir el mismo razonamiento para cualquier otro planeta.

La distancia de recorrido de una revolución orbital es $L = 2 \pi R$, con lo cual la velocidad orbital media es $v = L/T = 2 \pi R / T$. Para la Tierra, el periodo es de 365 días, entonces $v = 2,582,750 \text{ km/día} = 107,740 \text{ km/h} = 29.9 \text{ km/s}$, donde la distancia de la Tierra al Sol $R = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$, se deduce, para la Tierra, que su velocidad orbital media es $v = 29.9 \text{ km/s} = 107589 \text{ km/h}$. Es bueno hacer hincapié en que además el Sol gira en torno al centro galáctico con una velocidad de 220 km/s o lo que es lo mismo de 800000 km/h .

Planeta	Período Orbital (días)	Distancia al Sol (km)	Velocidad orbital media (km/s)	Velocidad orbital media (km/h)
Mercurio	87.97	$57.9 \cdot 10^6$	47.87	172440
Venus	224.70	$108.3 \cdot 10^6$	35.02	126072
Tierra	365.26	$149.7 \cdot 10^6$	29.50	107208
Marte	686.97	$228.1 \cdot 10^6$	24.13	86688
Júpiter	4331.57	$778.7 \cdot 10^6$	13.07	47052
Saturno	10759.22	$1\,430.1 \cdot 10^6$	9.67	34884
Urano	30.799.10	$2\,876.5 \cdot 10^6$	6.84	24876
Neptuno	60190.00	$4\,506.6 \cdot 10^6$	5.48	19558

Tabla 5: Datos de los cuerpos del Sistema Solar

El más rápido es Mercurio y el más lento Neptuno, el más alejado. Ya los romanos habían observado que Mercurio era el más rápido de todos y por eso lo identificaron con el

mensajero de los dioses y lo representaban con alas en los pies. Observado a simple vista, el desplazamiento de los planetas observables sin ayuda óptica es fácil comprobar que Júpiter y Saturno se mueven mucho más lentamente sobre las constelaciones zodiacales que lo puede hacer Venus o Marte por ejemplo.

Fig. 12a, 12b y 12c: Simulando el movimiento circular de los planetas.

Esta es una sencilla experiencia de la relación entre la distancia y el periodo orbital.

Comenzamos por atar un objeto pesado, tal como una tuerca, al final de un trozo de cuerda. Sujetamos el extremo opuesto al objeto pesado y hacemos girar el objeto en un movimiento circular por encima de nuestras cabezas. A continuación, podemos ver que si liberamos la cuerda (haciendo que sea más larga), a medida que se hace girar el objeto va a necesitar más tiempo para completar un período orbital cuanto más larga sea la cuerda. Por el contrario, si tomamos la cuerda más corta, al girar tardará menos tiempo en dar la vuelta.

A continuación, podemos desarrollar un modelo del sistema solar con tuercas y trozos de cuerda de longitud proporcional a los radios de las órbitas planetarias (suponiendo, de nuevo, una órbita circular para todos ellos). Sin embargo, en lugar de cortar una pieza separada para cada planeta, cortado todas las piezas de una longitud de unos 20 cm. Luego, utilizando la escala adecuada, mida la distancia correcta del objeto pesado y hacer un nudo en este punto. A continuación, la cuerda puede ser retenida en el lugar del nudo mientras se hace girar el objeto pesado

Para utilizar el modelo que debe tener una de las cuerdas en la ubicación del nudo y darle la vuelta la cabeza en un plano paralelo al suelo, con la posible velocidad mínima velocidad que lo mantendrá en órbita. Veremos que el objeto necesita menos tiempo para una rotación completa cuando el radio es más pequeño.

Modelo de gravedades superficiales

La fórmula de la fuerza gravitacional $F = G \frac{Mm}{d^2}$ permite calcular la gravedad superficial que actúa sobre la superficie de cualquier planeta. Basta considerar la masa unidad ($m = 1$) sobre la superficie del planeta ($d = R$), obtenemos $g = G \frac{M}{R^2}$ donde $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ es la constante universal. Si nosotros sustituimos la masa del planeta por $M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$, donde ρ

es la densidad ρ y R el radio del planeta, entonces:

Sustituyendo estas dos últimas variables ρ y R para los valores listados en la tabla 6 (después de convertir el radio en metros y la densidad en kg / m^3 , con $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g} / \text{cm}^3$), se puede calcular el valor de la gravedad en la superficie g de todos los planetas.

Planeta	R Radio ecuatorial (km)	g Gravedad sup.	ρ Densidad
Mercurio	2439	0.378	5.4
Venus	6052	0.894	5.3
Tierra	6378	1.000	5.5
Marte	3397	0.379	3.9
Júpiter	71492	2.540	1.3
Saturno	60268	1.070	0.7
Urano	25559	0.800	1.2
Neptuno	25269	1.200	1.7

Tabla 6: Gravedad superficial y densidades de los cuerpos del Sistema Solar

Veamos un par de ejemplos,

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

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

Del mismo modo, podemos calcular g para el resto de los planetas. Al igual que en la tabla 7, las gravedades superficiales se dan a menudo en relación con la de la Tierra, y indican con la letra g

Actividad 10: Modelo de las básculas de baño

En este caso el modelo consiste en preparar un conjunto de 9 básculas de baño (8 planetas y la Luna) para que los estudiantes, al pesarse en ellas, pueden saber que es lo que pesarían en cada uno de los planetas.

Evidentemente que es preciso repetir exactamente el mismo proceso para cada planeta así es que solamente se explicará una de ellos. La idea, esencialmente, es abrir una báscula de baño y sustituir el disco de los pesos por otro con los nuevos pesos que se marcaran sobre el círculo calculando el peso equivalente al terrestre mediante una simple proporción.

1. Primero hay que abrir la báscula. En la mayoría de modelos hay dos muelles que fijan la base. Recordad que hay que volver a montarlo de nuevo (figuras 13a y 13b).
2. Una vez abierta hay que sustituir, o poner encima, el disco de pesos “terrestre” por el que habréis dibujado después de hacer los cálculos de los pesos equivalentes en el otro planeta.
3. En la tabla siguiente hay las gravedades superficiales de la Luna y los diferentes planetas del Sistema Solar. En una columna figuran en valores absolutos ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) y en la

otra en valores relativos respecto a la gravedad terrestre. Estos valores son los que hay que aplicar a las unidades de peso “terrestres” de la báscula para convertirlos en los valores correspondientes a otro planeta (solo hay que hacer una proporción o regla de tres).

4. Finalmente, hay que volver a cerrar la báscula y ya podéis comprobar lo que pesáis en la Luna.

	Gravedad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Gravedad (T=1)
Luna	1,62	0,16
Mercurio	3,70	0,37
Venus	8,87	0,86
Tierra	9,80	1,00
Marte	3,71	0,38
Júpiter	23,12	2,36
Saturno	8,96	0,91
Urano	8,69	0,88
Neptuno	11,00	1,12

Tabla 7: Gravedades superficiales para cada cuerpo del Sistema Solar

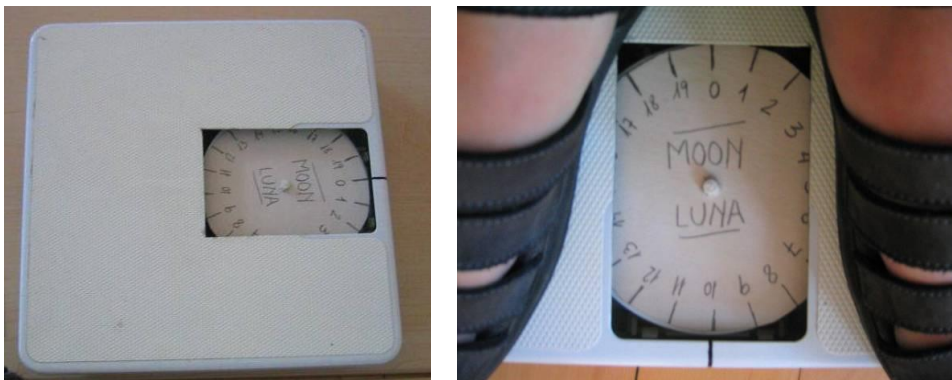


Fig.13a y 13 b: Báscula de baño con el disco substituido

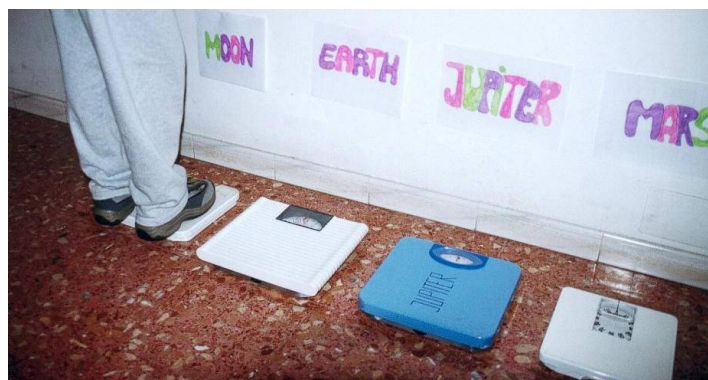


Fig. 14: Modelo del Sistema Solar con básculas de baño

Actividad 11: Modelos de cráteres

La mayoría de cráteres del Sistema Solar no tienen origen volcánico sino que son resultado de

la caída de fragmentos sólidos del espacio sobre la superficie de los planetas y satélites.

1. Primero ha que recubrir el suelo con periódicos viejos, para no ensuciar el suelo.
2. Poner dentro de una bandeja una capa de 2-3 cm de harina, distribuyéndola con un colador para que la superficie quede muy lisa.
3. Poner una capa de unos pocos milímetros de cacao en polvo sobre la harina con la ayuda de un colador (figura 15a).
4. Desde una altura de unos 2 metros dejamos caer el proyectil: una cucharada sopera de cacao en polvo. Al caer dejara marcas similares a los cráteres de impacto (figura 15b).
5. Se puede experimentar variando la altura, la masa de los proyectiles y la profundidad de la capar de harina. Se consigue reproducir varios tipos de cráteres, incluso con el pico central.



Fig. 15a: Simulando cráteres



Fig. 15b: Cráteres resultantes

Modelos de velocidades de escape

Si la velocidad de lanzamiento de un cohete no es muy grande, la fuerza de atracción del propio planeta lo hace caer de nuevo sobre su superficie. Si la velocidad de lanzamiento es suficientemente grande se escapa del campo gravitatorio del planeta. Veamos cual es la velocidad límite por encima de la cual el cohete podrá escapar, es decir la velocidad mínima de lanzamiento o velocidad de escape.

Considerando las fórmulas del movimiento uniformemente acelerado,

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

$$v = at + v_0$$

si sustituimos la aceleración por g y se considera la velocidad inicial v_0 nula, tenemos que sobre la superficie del planeta se verifica $R = \frac{1}{2} gt^2$ y, como además, $v = gt$. Eliminando el tiempo entre ellas,

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

donde se sustituyen los valores de g y R por los que figuran en la tabla 6 para calcular la velocidad de escape de cada planeta.

Pero también se puede deducir de otra forma. La velocidad de escape depende de la forma del potencial gravitatorio en que se encuentra el proyectil. Por ello, en la superficie de un objeto celeste, la velocidad de escape depende solamente de la altura del punto de lanzamiento, si se desprecian las fuerzas de fricción en la atmósfera, si esta estuviera presente (tal el caso de la Tierra)

La velocidad de escape no depende de la masa del proyectil ni de la dirección del lanzamiento, y su deducción puede ser hecha en términos puramente energéticos.

Para calcular la velocidad de escape, se usan las siguientes fórmulas relacionadas con la energía cinética potencial:

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

Considerando el principio de conservación de la energía, si establecemos la condición de que el objeto se aleje hasta una distancia infinita y quede en reposo, resulta:

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

y despejando la velocidad:

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

donde: v_e es la velocidad de escape, G es la Constante de gravitación universal ($6.672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$), M es la masa del astro, m es la masa del proyectil, R es el radio del astro (en el supuesto de forma esférica), g es la aceleración de la gravedad en la superficie del astro. En la Tierra, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

A modo de ejemplo, calculamos las velocidades de escape de algunos planetas. Para la Tierra,

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

para el menor planeta, Mercurio,

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

y para el mayor planeta, 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 evidente que en Mercurio es más fácil lanzar un cohete, que desde la Tierra, pero donde es más difícil es en Júpiter donde la velocidad de escape es de unos 60 km/s.

(Para poder comparar los resultados añadiremos que los valores aceptados para cada cuerpo el Sistema Solar son los siguientes, Mercurio 4.3 km/s, Venus 10.3 km/s, Tierra 11.2 km/s, Marte 5.0 km/s, Júpiter 59.5 km/s, Saturno 35.6 km/s, Urano 21.2 km/s y Neptuno 23.6 km/s, como se ve nuestros sencillos cálculos dan unos resultados aceptables.)

Actividad 12: Modelo de cohete con pastilla efervescente

A modo de ejemplo de cohete para poder lanzar en el aula sin ningún peligro proponemos el que sigue que usa como propulsor los gases de una aspirina o pastilla efervescente. Basta recortar el modelo por las líneas continuas y pegar en las líneas de puntos de acuerdo con la fotografía.

Utilizamos una cápsula de plástico con una tapa de presión. Una cápsula utilizada para almacenar píldoras o alimentos para peces. Es necesario comprobar que la longitud de la circunferencia del cilindro central del cohete puede contener la capsula de plástico sin problemas. También pegamos los tres triángulos como soportes del cuerpo del cohete y añadimos finalmente el cono en la parte superior del cilindro (figuras 16a, 16b, 16c, 16d, 17, 18, 19a, 19b y 19c).

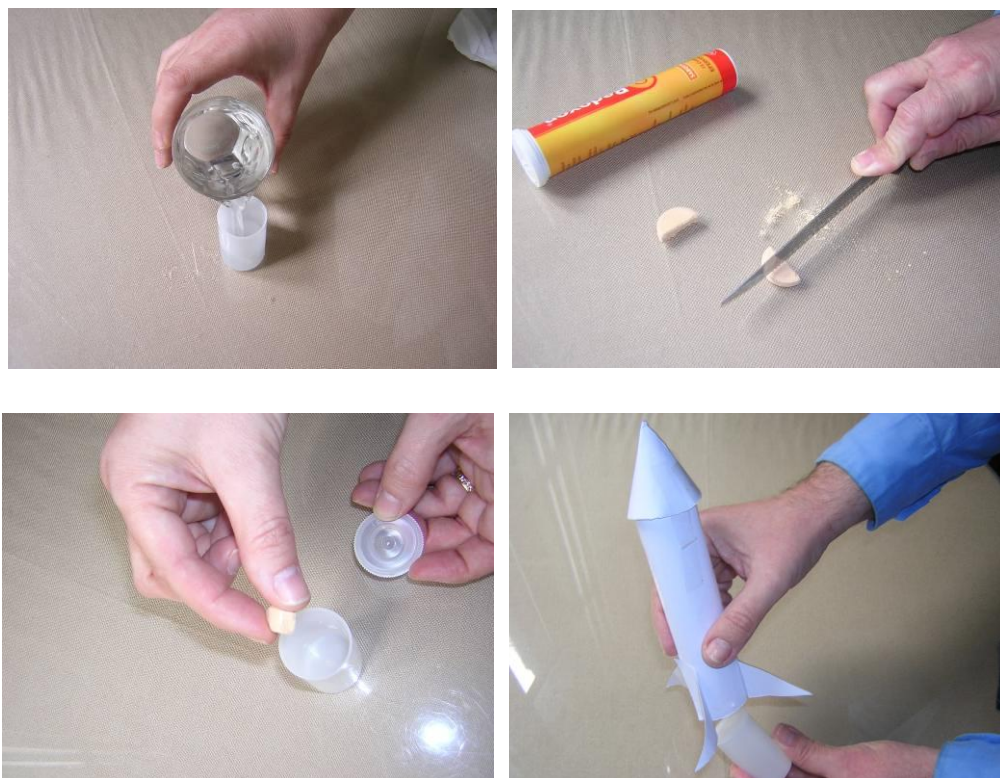


Fig. 16a, 16b, 16c y 16d: El proceso en cuatro instantáneas.

Cuando se haya terminado el cuerpo del cohete hay que realizar el lanzamiento. Para ello pondremos agua dentro de la cápsula de películas. $\frac{1}{3}$ de su altura es suficiente (aproximadamente 1 cm). Añadimos $\frac{1}{4}$ de la aspirina efervescente (u otra pastilla efervescente). Ponemos la tapa y el cohete encima. Después de aproximadamente 1 minuto el cohete despegue. Evidentemente podemos repetir tantas veces como se desee el proceso (todavía restan $\frac{3}{4}$ de aspirina, así que a disfrutar lanzando cohetes...).

También es posible lanzar cohetes usando bicarbonato y vinagre.

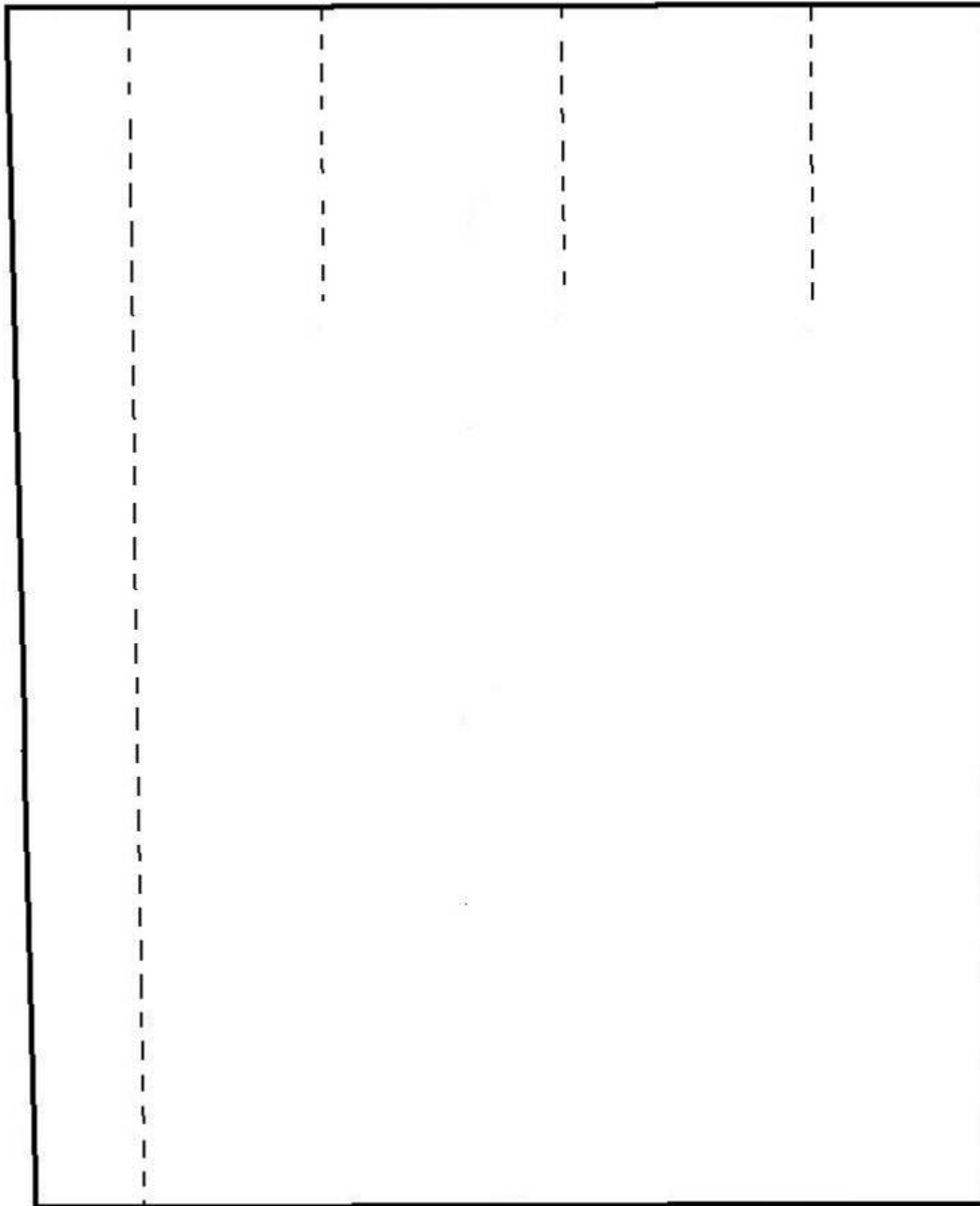


Fig. 17a: Cuerpo del cohete. Hay que pegar las aletas en la zona punteada.

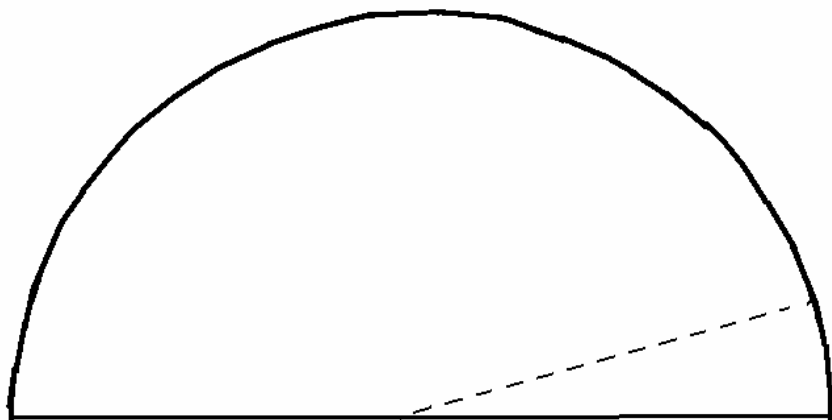


Fig.17b: Parte conoidal en la zona superior del cohete

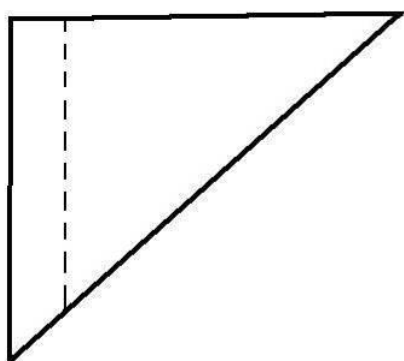


Fig. 17c: Modelo para las aletas

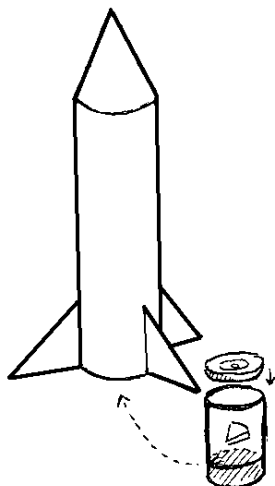


Fig. 18: Esquema simplificado

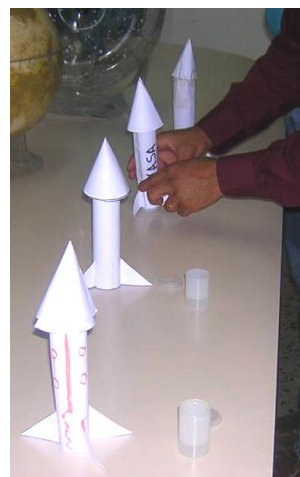


Fig. 19: Varios cohetes

Exoplanetas

Hasta la actualidad, ha sido posible detectar unos 4000 planetas y unos 500 sistemas planetarios múltiples. Un ejemplo de uno de los primeros planetas fotografiados directamente se muestra en la figura 20.

Todos los temas de este taller son temas punteros y afectados de la evolución tecnológica que permita avanzar más o menos en este ámbito. Es posible que algunos aspectos sean desestimados en el futuro pero es bueno llevarlos a la escuela tal como se conocen a hora. Si posteriormente hay que rectificar algunos contenidos ya se hará.

Es necesario citar ahora que por ejemplo cuando Galileo en 1610, observa por primera vez Saturno, no entiende el objeto como un planeta rodeado de un fino anillo sino que lo interpreta como un astro con tres cuerpos. Hay que esperar a las observaciones de Huygens que dispone de un telescopio mejor y puede resolver el anillo. Por ese motivo durante unos

años la comunidad científica interpreto erróneamente la estructura de Saturno. Ejemplo de ello es la pintura de Rubens que 1636-1638 que para simbolizar a Saturno elige tres estrellas según el reciente descubrimiento de Galileo.

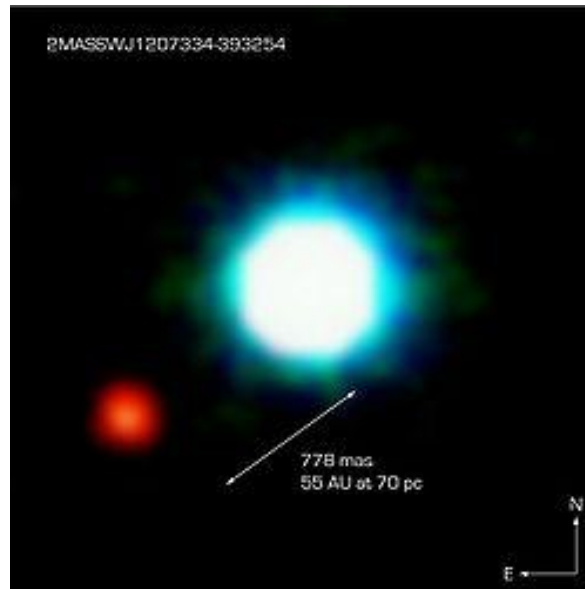


Fig. 20: El primer planeta (2M1207b) observado directamente, el 16 de marzo de 2003 con uno de los telescopios VLT de 8m de la ESO. Tiene una masa de 3-10 veces del Júpiter y orbita a 41 UA de su estrella central, del tipo enana marrón. En 2006, un disco de polvo se encontró alrededor de la estrella central, proporcionando evidencia de la continuidad de la formación de planetas en este sistema joven (Fuente: ESO).



Fig. 21a y 21b: Saturno según Rubens (1636-1638) y dibujo realizado por Galileo en 1610

En esta misma línea es bueno recordar que por ejemplo Ceres era considerado planeta en el siglo XIX (desde 1801 hasta 1850) al igual que los demás pero después fue clasificado como asteroide. De la misma manera Plutón descubierto en 1930 Fue considerado planeta hasta 2006 en que paso a ser considerado como planeta menor al igual que Ceres. Así es que seguramente algunos de los conocimientos aquí vertidos sobre exoplanetas es posible que deberán ser reconsiderados en el futuro, pero esto no nos debe detener para introducir este tema en los centros educativos.

Nomenclatura de los exoplanetas

Se considera un planeta extrasolar o exoplaneta un planeta que orbita una estrella diferente al Sol y que, por lo tanto, no pertenece al sistema solar. La NASA mantiene un catálogo (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) con más de 4000 exoplanetas confirmados en el año 2019. La nomenclatura de los exoplanetas es simple, y proviene de la usanza en estrellas binarias. Una letra minúscula se coloca después del nombre de la estrella a partir de la letra "b" para el primer planeta hallado en el sistema (por ejemplo: 51 Pegasi b). El siguiente planeta detectado en el sistema es etiquetado con la siguiente letra del alfabeto c, d, e, f, etc (por ejemplo: 51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e ó 51 Pegasi f). Así, el orden de las letras no tiene a ver con el periodo orbital de los planetas, o con otros de sus parámetros. Además, en el año 2015 la Unión Astronómica Internacional (IAU) asignó nombres a los 19 primeros sistemas exoplanetarios descubiertos. Así, en el sistema de la estrella Upsilon Andromedae (ver Tabla 8), la estrella principal (Ups And) tiene el nombre alternativa de *Titawin*, y los planetas *b*, *c* y *d* se llamarán *Saffar*, *Samh* y *Makriti*. Pero en la actualidad, estos nombres no han entrado en uso ni en la comunidad de astrónomos profesionales ni de los aficionados.

Detección de sistemas exoplanetarios

La distancia a Alfa Centauri o Próxima Centauri, las estrellas más cercanas a nosotros que están solo a 4,5 años luz, es enorme en comparación con la distancia de los planetas de nuestro sistema solar. De hecho, Alfa Centauri es de unos 10 000 veces más lejos que Neptuno, nuestro planeta más distante. Estas enormes distancias hacen la detección de planetas alrededor de otras estrellas imposibles hasta que fueron desarrolladas sofisticadas técnicas de observación, cerca del final del siglo pasado.

La tercera estrella más brillante en el cielo nocturno es Alfa Centauri. Alfa Centauri es, en realidad, un sistema estelar triple. Consiste en un par binario, Alfa Centauri A y B, y una estrella enana más cercano a nosotros, llamada Próxima Centauri. Es alrededor de esta tercera estrella, del tipo “enana roja”, donde se ha detectado un planeta rocoso que puede tener algunas similitudes con la Tierra: Próxima b, que es como se ha bautizado al nuevo exoplaneta, el más cercano a la Tierra que se conoce, no ha sido observado directamente. Los responsables del hallazgo revelaron su presencia observando una pequeña anomalía en la órbita de su estrella, provocada por la influencia gravitatoria del planeta. Esto ha servido para deducir su presencia y alguna de sus características. Da una vuelta alrededor de su sol en solo

11 días, y tiene un tamaño ligeramente superior a la Tierra y probablemente una superficie sólida.

Una peculiaridad de este exoplaneta es su cercanía a su estrella anfitriona, Próxima Centauri. Se encuentra a un 5% de la distancia que separa la Tierra del Sol, se decir, a unos 0.05UA. Esta proximidad lo convertiría en un infierno si su estrella fuese como la nuestra, pero que la coloca en el área de habitabilidad en el caso de una enana roja. Esto se debe a que una enana roja como Próxima Centauri, con un 12% de la masa solar, tiene un brillo de solo 0.1 % del sol. Con esas características, el nuevo planeta tendría una temperatura de 40 grados bajo cero sin contar con el efecto invernadero de una posible atmósfera, que podría elevar la temperatura sobre aquel mundo por encima de los cero grados.

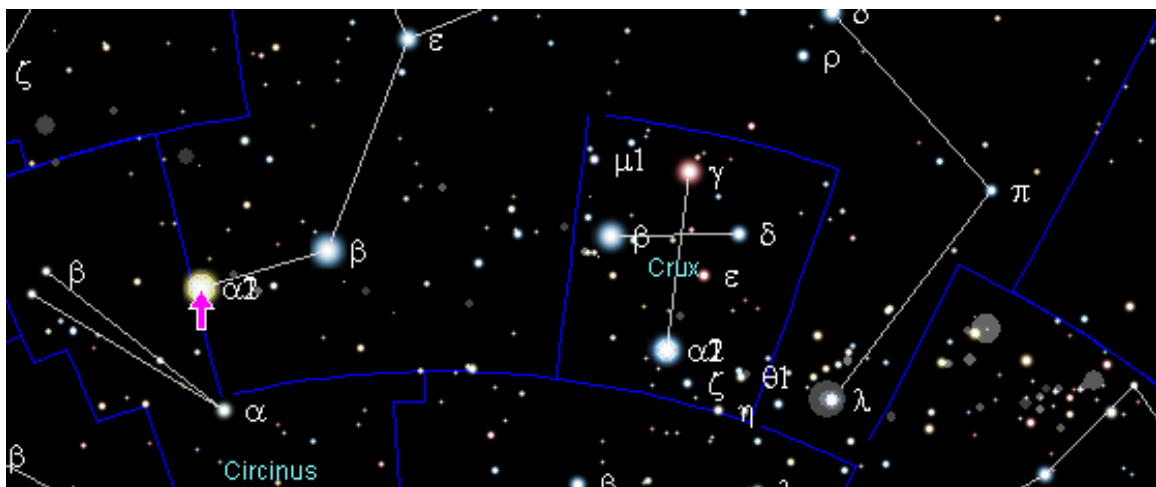


Fig. 22: Alfa centauri próxima a la Cruz del Sur

Uno de los inconvenientes para la presencia de vida en estos sistemas planetarios en torno a una enana roja es que tienen que estar muy cerca de su estrella para tener una temperatura en la que el agua pueda existir en estado líquido. Cuando eso sucede, en gran parte de los casos se da un fenómeno que se llama rotación sincrónica y que podemos ver en nuestra propia Luna. El tiempo de traslación y el de rotación se igualan y el planeta muestra siempre su misma cara a la estrella. Esto haría pensar en un hemisferio abrasado en el que la atmósfera se evapora, y otro congelado. Sin embargo, una atmósfera más densa que la de la Tierra permitiría matizar esas temperaturas extremas a través de la circulación atmosférica y la redistribución del calor.

En la actualidad, se usan varios métodos para descubrir exoplanetas. En general son métodos indirectos, en los que la presencia de un sistema planetario se infiere de la observación de la estrella central del sistema.

Método de velocidades radiales. Efecto Doppler

El método de velocidad radial fue el primero con el que se encontró un exoplaneta girando alrededor de una estrella central, 51 Pegasus b en 1995. En este método, se mide el bamboleo de la estrella central que se mueve alrededor del baricentro del sistema estrella-planeta. Este

movimiento de la estrella central produce cambios muy pequeños en la luz de la estrella hacia el rojo o el azul (figura 23), debido al efecto Doppler. De esta forma, podemos determinar la masa de un planeta respecto a la masa de la estrella central. Sin embargo, no sabemos la orientación de la mayoría de los sistemas de planetas detectados con este método y las masas de los planetas que podemos calcular son masas mínimas, es decir, las masas reales podrían ser mayores.

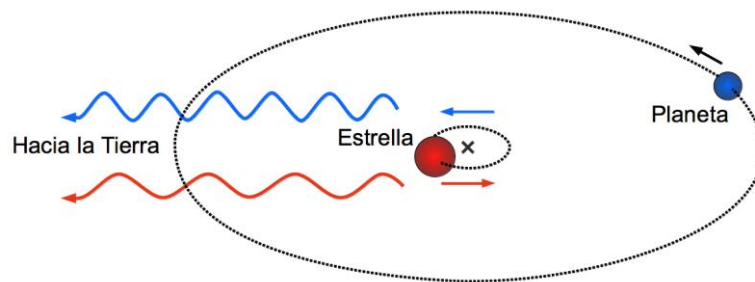


Fig. 23: Método de la velocidad radial para la detección de planetas.

El efecto Doppler es el que hace variar la longitud de onda de la luz cuando la fuente está en movimiento: cuando la fuente (sonora o luminosa) se nos aleja, la longitud de onda aumenta, y cuando se acerca, la longitud de onda disminuye. El efecto que se aprecia en las ondas luminosas es que si una fuente se nos aleja, su luz se desplaza hacia la parte roja del espectro visible. Cuando la fuente luminosa se nos acerca su luz se desplaza hacia la parte azul del espectro visible.

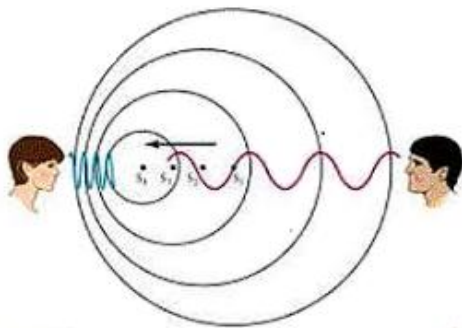


Fig. 24a: Cuando la fuente se aleja, la longitud de onda aumenta, y cuando la fuente se acerca la longitud de onda disminuye.

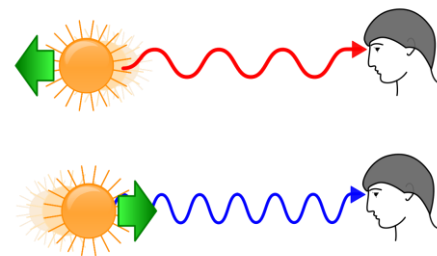


Fig. 24b: Cuando la fuente luminosa se aleja, su luz se desplaza al rojo, y cuando la fuente se acerca, se desplaza al azul.

Este es el efecto Doppler debido al desplazamiento y es el que se observa en las estrellas con planetas grandes a su alrededor. Cuando la estrella se aleja de nosotros, su luz se desplaza hacia el rojo y cuando se acerca se desplaza hacia el azul.

Actividad 13: El efecto Doppler

Se puede observar el efecto Doppler con una cubeta llena de agua. Usaremos una caja de plástico transparente en la que pondremos un par de cm de agua. La situamos sobre dos

columnas de libros de unos 15 ó 20 cm de alto sobre una mesa cubierta con un mantel blanco o unas hojas de papel blancas. Con la luz de la linterna de un movil podemos comprobar que al tocar con un dedo la superficie del agua vemos la sombra de la onda circular sobre la superficie del agua.

Una vez preparada la puesta en escena, usaremos el tapón con cadenita (que se usa para tapar los desagües en el baño). Se pone en un borde de la cubeta con agua y la cadena en el fondo, formando una línea recta. Al levantar lentamente la cadenita desde un extremo, veremos que cada vez que una bolita toca la superficie del agua, produce una onda circular, y se forman círculos de ondas cuyo centro va avanzando hacia el tapón. Se ve cómo la distancia entre las ondas hacia adelante se reduce (figura 25 flechas en azul); mientras que hacia atrás la distancia entre las ondas se incrementa (figura 25 flechas en rojo). Es decir, cuando la cadenita se acerca, la longitud de onda se reduce y el color azulea. Cuando se aleja, la longitud de onda se alarga y el color enrojece.

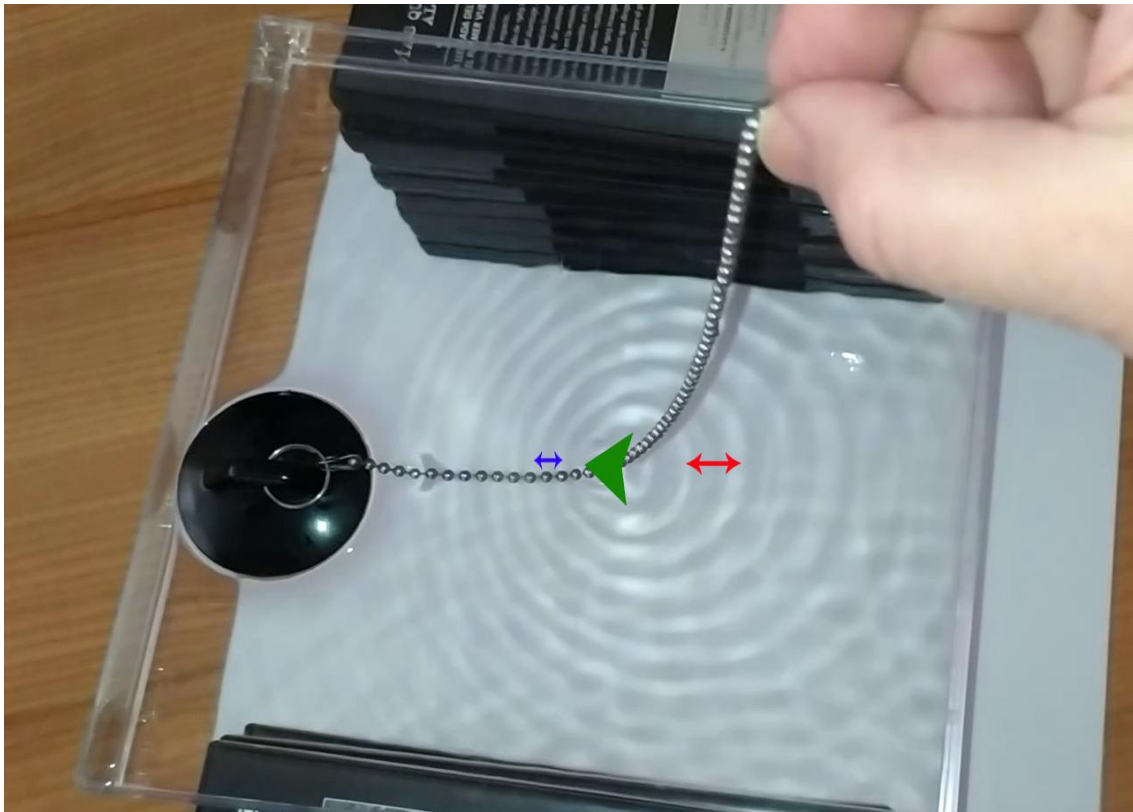


Fig. 25: Cuando la cadenita se acerca, la longitud de onda se reduce y el color se azulea. Cuando la cadenita se aleja, la longitud de onda se alarga y el color se enrojece.

Método de tránsitos

El otro método importante, llamado "método de tránsitos" se basa en la observación de cambios en el brillo de una estrella cuando uno de sus planetas pasa ('tránsito') delante de la estrella, ocultando de ese modo una pequeña parte de su disco estelar (figura 26). Con el

método de tránsitos, el tamaño de un planeta, R_p , se puede medir en relación con el tamaño R_* de su estrella central, y se da aproximadamente por:

$$R_p / R_* = \sqrt{dF / F},$$

donde dF / F es el cambio relativo en el brillo observado durante el tránsito de un planeta (por ejemplo, $dF / F = 0,01$ indica una reducción de 1% del brillo de la estrella durante el tránsito).

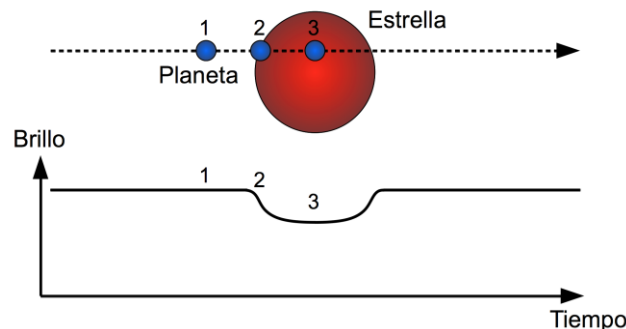


Fig. 26: Método de tránsito para la detección de planetas

Actividad 14: Simulación de tránsito

Se puede reproducir un tránsito con dos pelotas: una grande que simula la estrella y otra pequeña que simula el exoplaneta girando en trono a la estrella central o estrella anfitriona. Si el observador está en el mismo plano de giro y está observando en ese instante, verá como el planeta pasa por delante de la estrella y en la curva de luminosidad de la estrella se observará una alteración (figura 27). Pero es evidente que si el observador no se encuentra en el mismo plano de giro, no se podrá observar ningún cambio en la curva de luminosidad (figura 28).

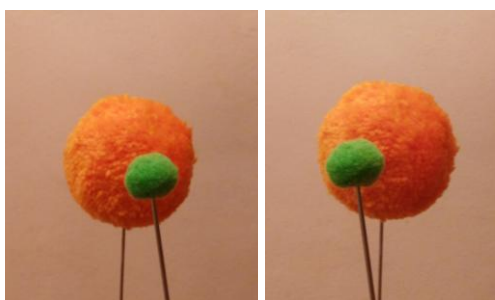


Fig. 27: Observador en el plano de giro puede ver el tránsito del planeta y detectar los cambios en la curva de luminosidad.

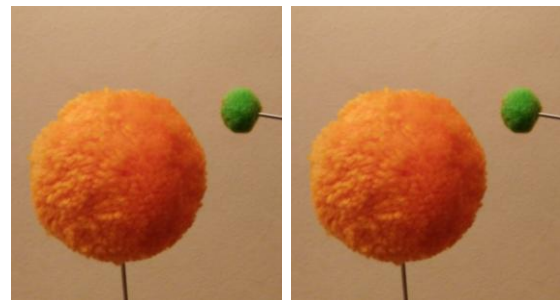


Fig. 28: Observador fuera del plano de giro, no puede visualizar ningún cambio en la curva de luminosidad.

Método de lentes microgravitacionales

Destacan también otros métodos de detección de exoplanetas aunque son menos utilizados. El método de lentes microgravitacionales consiste en observar una ampliación del brillo de una estrella de fondo, debido al alineamiento de dicha estrella con un sistema de una estrella con exoplanetas. Este sistema actúa como lente gravitacional y generaría una ampliación del brillo

muy característica (línea roja en figura 29). Para que funcione, debe existir completa alineación visual entre los tres partes (estrella de fondo, la estrella con el exoplaneta, y la Tierra).

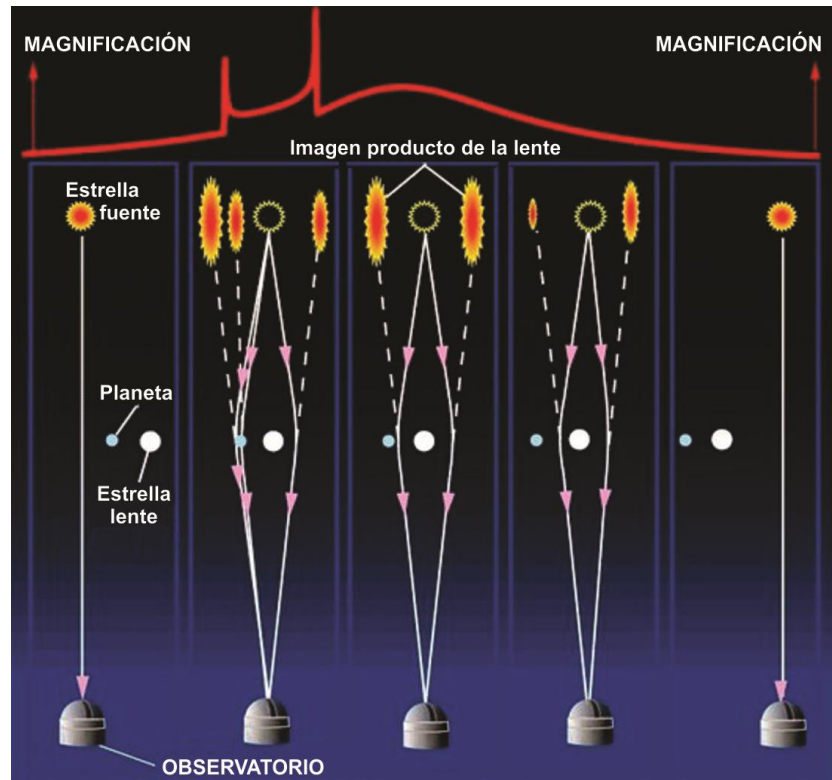


Fig. 29: Método de microlentes para la detección de planetas

Actividad 15: Simulación de microlentes

Se puede simular la detección de un exoplaneta en una estrella anfitriona con un par de pies de copa como se ha visto en el taller de expansión del universo. Primero usamos solo un pie de copa y no se ve nada. Después pasamos por delante con el otro y surge un punto y después incluso dos.



Fig. 30: Primero con una sola lente.



Fig. 31: Moviendo la segunda lente sobre la primera, aparece un punto y después dos, en todos los casos sin mover la primera lente.

Método de detección directa

Y finalmente, el método de detección directa corresponde a la adquisición y análisis de imágenes de muy alta resolución de la estrella, con el fin de determinar la existencia de planetas alrededor de la misma. Debido a la cantidad de luz que emite una estrella, este método ha sido exitoso solo para planetas que están muy lejos de su estrella central y a la vez que están muy jóvenes, así que todavía emiten luz debido al calor generado durante su formación (ver también figura 32).

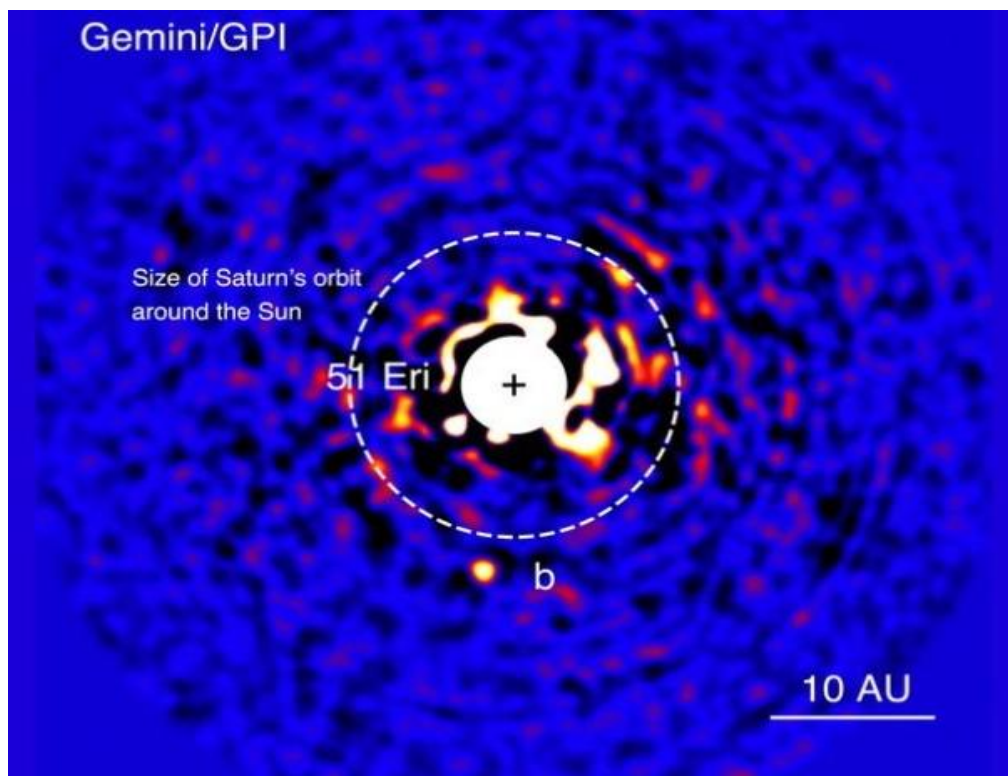


Fig. 32: Método de detección directa para la detección de planetas

Ejemplos de sistemas extrasolares

Los exoplanetas más conocidas tienen masas comparables a Júpiter, que es el planeta más grande de nuestro sistema solar. Es por esto que a menudo se indican las masas y tamaños de los planetas extrasolares en unidades de masas de Júpiter M_J ($1,90 \times 10^{27}$ kg) y radios de Júpiter R_J (71492 km). Sólo muy pocos planetas (alrededor de 20) se sabe que tienen masas comparables a la Tierra. Sin embargo, hay más planetas (alrededor de 700, o el 20% de todos los conocidos) con tamaños comparables a la Tierra, de hasta $1,5 R_t$ (radios terrestres). Se ha demostrado que estos planetas son los más comunes, pero las técnicas actuales de detección son más acertadas en la detección de los objetos más masivos o más grandes.

Nombre del Planeta	Distancia media, ua	Periodo orbital, días	Masa mínima* Masa de Júpiter o Terrestre	Descubierto Año	Diamter 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

Tabla 8: Cuatro sistemas extrasolares representativos con múltiples planetas. Datos extraídos del *Extrasolar Planets Catalog*² (excepto la última columna). * Estos planetas se han descubierto por velocidades radiales; por eso no hay certeza de su tamaño. Para los planetas gigantes, con masas de 0,5- 20 Mj, se sabe que casi todos ellos tienen un radio de 0.7-1.4 veces del de Júpiter (50-100 mil kilómetros), con poca correlación con su masa. Para los planetas terrestres del GJ861, se ha calculado su radio suponiendo que la densidad del planeta es igual a la densidad de la Tierra (5520 kg / m³).

En esta sección, consideramos algunos ejemplos de sistemas planetarios extrasolares que tienen tres o más planetas conocidos. La tabla 8 muestra los planetas alrededor de las estrellas Ups Andrómeda, Gliese 581, Kepler-62 y Trappist-1. Los sistemas planetarios de Ups Andrómeda y Gliese 581 fueron descubiertos con el método de velocidades radiales y de estos planetas conocemos únicamente sus masas mínimas, pero no sus tamaños. Se considera que sus radios están comprendidos entre 50000-100000 km (aunque en la tabla 8 figuran uno de los posibles valores). Para Gliese 581, varios planetas demás (*d*, *f*, *g*) han sido anunciados, pero fueron contestados en otras publicaciones; así sus descubrimiento se han retirados, probablemente fue causado por señales marginales o ruidos de otros fuentes en los datos.

Los planetas del sistema Kepler-62 fueron descubiertos a partir de los tránsitos. Por lo tanto, se conocen sus tamaños. De sus masas sólo conocemos límites superiores (masas máximo), y

son demasiado pequeños (y de peso ligero) para ser detectable con el método de velocidades radiales. Sin embargo, hay también muchos planetas que se han detectado tanto con el tránsito y el método de velocidades radiales, y conocemos tanto sus masas y sus tamaños.

Hay algunos exoplanetas que están muy cerca de la estrella central (p.ej. todos los planetas del Gliese 876 tienen órbitas más cercanas a la estrella que Mercurio al Sol). Otros tienen planetas más lejanos, como el sistema del 2M1207b (ver Fig. 20), con un planeta en formación a 41 UA de distancia, o 1.4 veces la distancia del Neptuno. Una de las posibilidades para visualizar estos datos consiste en construir modelos a escala del sistema planetario elegido. Esto nos permitirá comparar fácilmente unos con otros y con nuestro Sistema Solar.

Nombre del Planeta	Distancia Media, AU	Periodo Orbital, años	Masa, Masas de Júpiter	Diámetros, km
Mercurio	0,3871	0,2409	0,0002	4879
Venus	0,7233	0,6152	0,0026	12104
la Tierra	1,0000	1,0000	0,0032	12756
Marte	1,5237	1,8809	0,0003	6794
Júpiter	5,2026	11,8631	1	142984
Saturno	9,5549	29,4714	0,2994	120536
Urano	19,2185	84,04	0,0456	51118
Neptuno	30,1104	164,80	0,0541	49528

Tabla 9: Planetas del Sistema Solar

Actualmente sabemos que hay también exoplanetas alrededor de estrellas muy distintas al Sol. En 1992 los radio-astrónomos anunciaron el descubrimiento del primer exoplaneta, alrededor del púlsar PSR 1257+12. Tardó tres años más para descubrir el primer exoplaneta alrededor de una estrella "normal" de tipo solar, 51 Pegasi.

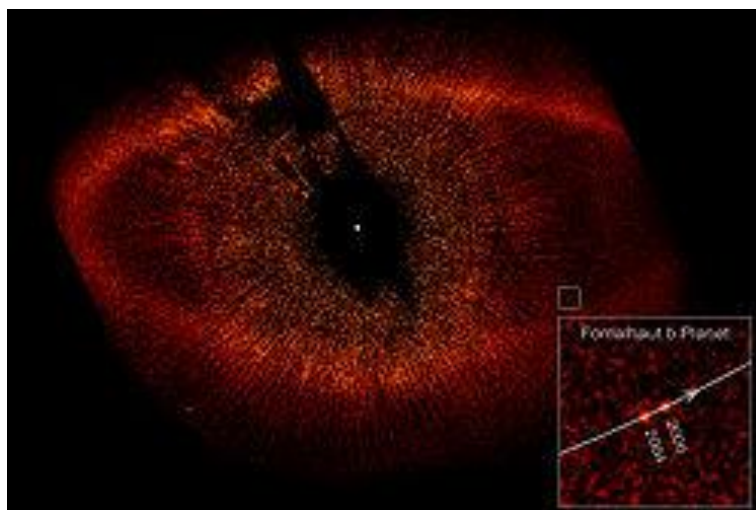


Fig. 33: Planeta Fomalhaut b dentro de la nube de polvo interplanetario de Fomalhaut en una imagen del Hubble Space Telescope, con posiciones en 2004 y 2006 (ver imagen pequeño). (Foto: NASA).

Después han sido detectados exoplanetas alrededor de: enanas rojas (p. ej. Gliese 876 en 1998), estrellas gigantes (Iota Draconis en 2001), enanas marrones (2M1207 en 2004), estrellas de tipo A (Fomalhaut en 2008, ver figura 32), enanas blancas (WD1145-1017 en 2015, con un planeta que se desintegra), alrededor de sistemas binarios (Kepler-16b en 2011), entre otros.

Actividad 16: Modelos de sistemas exoplanetarios

Primero elegimos la escala del modelo. No es conveniente usar la misma escala para diámetros y distancias por un problema de tamaños. Para distancias, la escala considerada es: **$1 \text{ UA} = 1 \text{ m}$** . En este caso todos los exoplanetas pueden caber dentro de un aula típica, así como los primeros cinco planetas de nuestro sistema solar. Deberá utilizarse como escala de tamaño para el planeta, **un radio del planeta de 10000 km corresponde a un diámetro del modelo de 0,5 cm**. En este caso, el planeta más grande, Júpiter, con un radio de 71000 km es de 7 cm de diámetro y el más pequeño, Mercurio, será de 0,2 cm. Si la actividad se lleva a cabo fuera (por ejemplo, en el patio de la escuela), podemos construir un modelo completo con escalas análogas para diámetros y distancias. Para las estrellas anfitriona se toma la misma escala, **un radio de la estrella anfitriona de 10000 km corresponde a un diámetro del modelo de 0,5 cm**.

En las condiciones expresadas de escala se procede a construir el Sistema Solar (tabla 2), o cualquiera de los sistemas de la tabla 1 utilizando los radios y los valores medios de distancias incluidos en la tabla mencionada. Para simplificar el proceso se incluye a continuación las tablas con la escala mencionada. Se comparan todos los sistemas de exoplanetas con nuestro sistema planetario.

Sistema Solar	Distancia	Diámetro, km	Distancia modelo	Diámetro modelo
Mercurio	0,39 UA	4879	40 cm	0,2 cm
Venus	0,72 UA	12104	70 cm	0,6 cm
Tierra	1 UA	12756	1,0 m	0,6 cm
Marte	1,5 UA	6794	1,5 m	0,3 cm
Júpiter	5,2 UA	142984	5,0 m	7 cm
Saturno	9,55 UA	120536	10 m	6 cm
Urano	19,22 UA	51118	19 m	2,5 cm
Neptuno	30,11 UA	49528	30 m	2,5 cm

Tabla 10: Sistema Solar. La estrella anfitriona, el Sol, es G2V, con un diámetro en el modelo de 35 cm. Zona de habitabilidad indicado en verde.

Se comienza con el primer sistema planetario que se descubrió en 1999 detectando sus planetas por efecto Doppler aplicado a su velocidad radial. Este método, debido al nivel de la tecnología, permite detectar exoplanetas muy grandes y próximos a la estrella anfitriona. Sin duda el método de detección también determina las características de los planetas localizados. Con este método de detección se localizaban planetas gaseosos como Júpiter o incluso mucho mayores. Para localizar planetas que pudiesen alojar la vida se hizo necesario tratar de detectar planetas más pequeños y terrestres tipo la Tierra.

Upsilon Andromedae Titawin	Distancia	Diámetro, km	Distancia modelo	Diámetro modelo
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

Tabla 11: Estrella anfitriona Upsilon Andromedae es una estrella F8V a 44 años de luz en la constelación de Andrómeda. Es una estrella binaria compuesta por Ups And A, una estrella bastante similar al Sol, algo más caliente y brillante, con un radio de 1.28 R_{sol} y Ups And B que es una pequeña enana roja. En el modelo Ups And A tiene un diámetro de 45 cm.

Los planetas gaseosos se considera que no pueden albergar vida en el sentido que nosotros la conocemos y se está tendiendo al estudio de planetas rocosas tipo la Tierra en lugar de los planetas tipo Júpiter como eran el caso de los primeros que se descubrieron. Gliese 581 es uno de los primeros sistemas donde se consiguió detectar exoplanetas del tipo terrestres. Aunque desde 2014 algunos de sus exoplanetas han sido discutidos. El método de detección considerado en este caso fue el de velocidades radiales pero debido a la baja masa del GL 581 de 0.31 M_{sol} se consiguió encontrar exoplanetas tipo terrestres.

Gliese 581	Distancia	Diámetro, km	Distancia modelo	Diámetro modelo
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

Tabla 12: La estrella anfitriona Gliese 581 es una enana roja M2.5V situada a 20,5 a.l en la constelación de Libra. Tiene un tercio de la masa del Sol y es menos luminosa y más fría que él. Su radio es 0,29 R_{sol} y en el modelo corresponde a un diámetro de 10 cm.

En 2009 se lanzó la misión Kepler. Este observatorio espacial orbita alrededor del Sol y buscaba planetas extrasolares, especialmente aquellos de tamaño similar a la Tierra que se encuentran en la zona de habitabilidad de su estrella anfitriona. En los 9 años que duro la misión se detectaron unos 3000 exoplanetas y todavía hay miles de candidatos a la espera de ser confirmados. Kepler barrió un 0,25 por ciento del cielo y sus hallazgos demostraron que los planetas son muy comunes en la Vía Láctea. En 2018 se lanzó el satélite TESS diseñado para identificar planetas cercanos con un tamaño no mayor de dos veces el terrestre y en una zona mucho más amplia del cielo que abarcará el 85 por ciento de la bóveda celeste. Tanto Kepler como TESS han sido diseñados para explorar el cielo en busca de tránsitos planetarios.

Kepler 62	Distancia	Diámetro, km	Distancia modelo	Diámetro modelo
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

Tabla 13: Estrella anfitriona Kepler 62 es una K2V, está en la constelación de Lyra a 1200 a.l. Es una estrella ligeramente más fría y más pequeña que el Sol. Su radio es 0,64 R_{sol} y en el modelo corresponde a un diámetro de 22 cm

Kepler-62 es uno de los ejemplos más interesantes de un sistema planeta potencialmente habitable. De particular interés son los planetas e y f, ya que son los mejores candidatos para planetas sólidos que caen en la zona habitable de su estrella. Sus radios, 1,61 y 1,41 radios terrestres, respectivamente, los sitúan en el intervalo de radios de los que pueden ser planetas terrestres sólidos y caen dentro de la zona habitable de Kepler-62: el rango de distancia en la que al menos para algunas condiciones atmosféricas, estos dos planetas podrían tener agua líquida en sus superficies, tal vez que los cubre ellos por completo. Para Kepler-62e, que se encuentra cerca del linde interior de la zona habitable, esto requeriría una cobertura de nubes reflectante que reduce la radiación que calienta la superficie. Kepler-62f, por el contrario, se encuentra en la zona externa de la zona habitable, al igual que Marte en nuestro sistema solar. Allí, cantidades significativas de dióxido de carbono se requieren para mantener caliente la superficie de un planeta de agua suficiente para que la superficie del líquido.

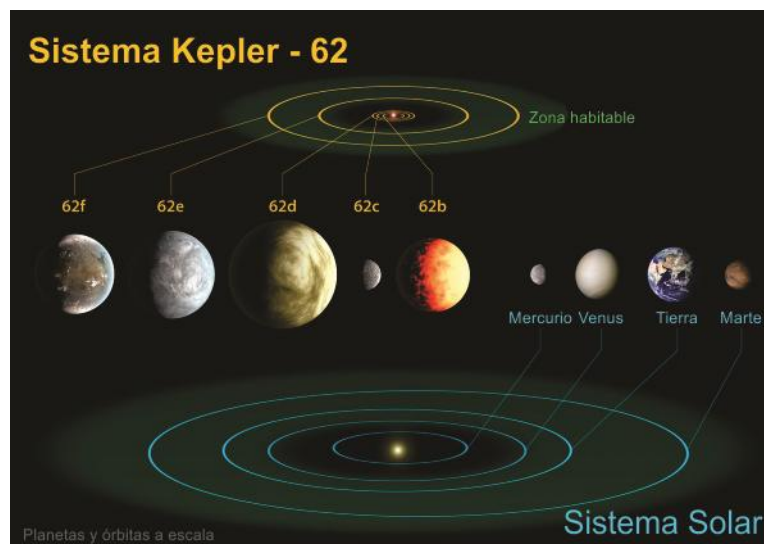


Fig. 34: El sistema Kepler-62 en comparación con el sistema solar interior. La región verde indica la zona habitable - la zona donde la vida tal como la conocemos podría existir. Fuente NASA Ames / JPL-Caltech.

Una enana roja cercana, catalogada como 2MASS J23062928-0502285 fue rastreado por tránsitos en 2015 con el telescopio Trappist, descubriendo inicialmente unos tres planetas de tamaños terrestres, bautizados Trappist-1b, c y d. Estudios posteriores realizados por equipos internacionales utilizando los telescopios espaciales Hubble, Kepler, Spitzer y el telescopio Speculoos en Chile, permitieron conocer mejor un total de siete planetas. Cinco de estos planetas (b, c, e, f y g) son similares en tamaño a la Tierra, y dos (d y h) son de tamaño intermedio entre Marte y la Tierra. Tres de los planetas (e, f y g) orbitan dentro de la zona habitable.

Los planetas de TRAPPIST-1 orbitan todos muy cerca de su estrella y pasan tan cerca unos de otros que las interacciones gravitacionales son significativas, y sus períodos orbitales son casi resonantes. Los planetas aparecerían prominentes en los cielos de sus vecinos, y en algunos casos, varias veces más grandes de lo que la Luna aparece desde la Tierra. De hecho, sus masas no se han determinados con velocidades radiales sino de las desviaciones en la

periodicidad de sus orbitas, usando un método llamado análisis de ‘transit timing variations’ (desviaciones del tiempo de los tránsitos).

Se pudieron obtener las masas de todos ellos con un margen de error muy pequeño, lo que permitió determinar con precisión la densidad, la gravedad superficial y la composición de los mismos. Los exoplanetas tienen un rango en masa de aproximadamente $0,3 M_t$ a $1,16 M_t$, con densidades de 0,62 a 1.02 terrestres ($3,4 - 5,6 \text{ g / cm}^3$). Los planetas *c* y *e* son casi totalmente rocosos, mientras que *b*, *d*, *f*, *g* y *h* tienen una capa de volátiles en forma de caparazón de agua, caparazón de hielo o una atmósfera espesa. Trappist-1*d* parece tener un océano de agua líquida que comprende aproximadamente el 5% de su masa, para comparación, el contenido de agua de la Tierra es $<0,1\%$, mientras que las capas de agua de Trappist-1*f* y *g* probablemente estén congeladas. Trappist-1*e* tiene una densidad ligeramente más alta que la Tierra, lo que indica una composición de roca terrestre y hierro. Además, se descubrió que la atmósfera de Trappist-1*b* estaba por encima del límite del invernadero desbocado de 10^1 a 10^4 bar de vapor de agua. Los planetas *c*, *d*, *e* y *f* carecen de atmósferas de hidrógeno-helio. También se observó el planeta *g*, pero no hubo datos suficientes para descartar una atmósfera de hidrógeno.

Trappist - 1	Distancia ua	Diámetro, km	Distancia modelo	Diámetro modelo
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

Tabla 14: Estrella anfitriona Trappist-1 es una enana roja de tipo M8V situada en la constelación de Acuario a 40 a.l. La estrella es algo mayor que Júpiter, con un diámetro de 168000 km y en el modelo de 4 cm. En el modelo, las distancias a los planetas son menores que el diámetro de la estrella, da una idea de lo compacto del sistema.

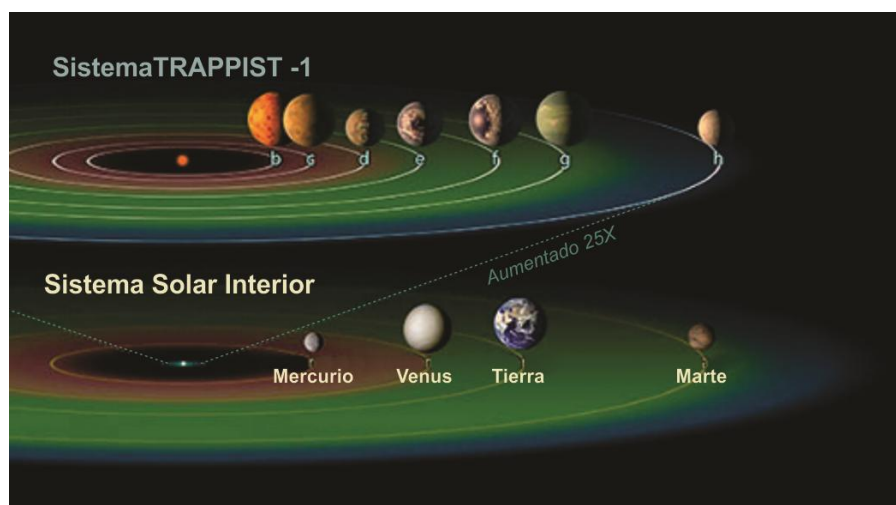


Fig. 35: El sistema Trappist- 1 en comparación con el sistema solar interior. La región verde indica la zona habitable - la zona donde la vida tal como la conocemos podría existir.

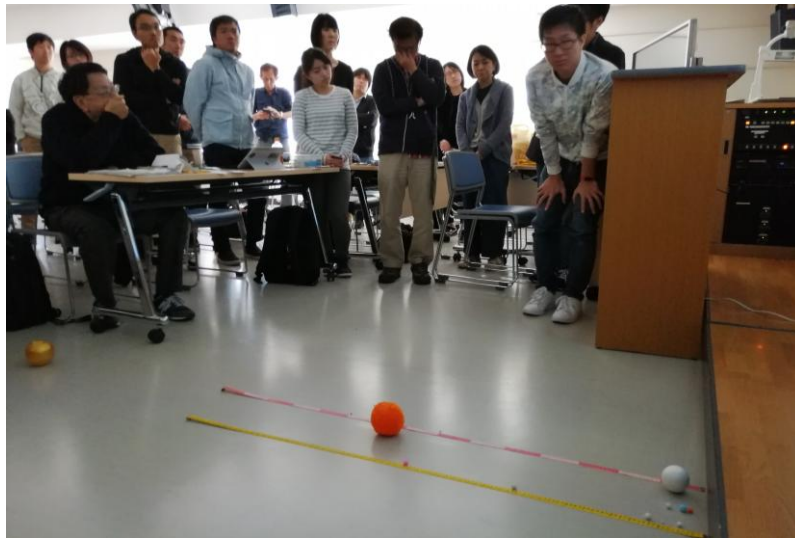


Fig. 36: Una vez contruidos todos los modelos hay que comentar los puntos destacados en la presentación de la zona de habitabilidad. Según la masa y el tipo de estrella anfitriona la zona de habitabilidad está más o menos próxima.

Todavía hay muchas preguntas sin respuesta acerca de las propiedades y la habitabilidad de los exoplanetas. Saber más de ellos y aprender más sobre sus propiedades y características ha motivado para varias misiones espaciales actuales y también futuras, como las misiones TESS y JWST de la NASA y CHEOPS y PLATO de la ESA, esta última con el lanzamiento en el año 2026 y esperando una multiplicación del número de planetas terrestres conocidos.

Bibliografía

- Gaitsch, R., “*Searching for Extrasolar Planets*”, Proceedings of 10th 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 10th EAAE International Summer School, Barcelona 2006.