

# Planetas y exoplanetas

**Rosa M. Ros, Hans Deeg**

International Astronomical Union, Universidad Politécnica de Cataluña  
(Barcelona, España), Instituto de Astrofísica de Canarias and University of La  
Laguna (Canarias, 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 2000 planetas y unos 500 sistemas planetarios múltiples. Un ejemplo de uno de los primeros planetas fotografiados directamente se muestra en la figura 1..

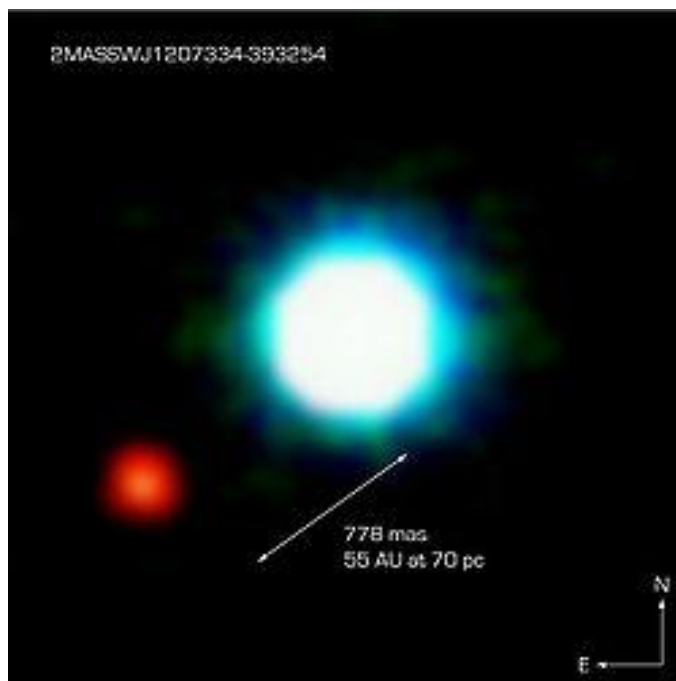


Fig. 1: El primer planeta 2M1207b observado directamente. Fotografiado el 16 de marzo de 2003. Tiene una masa de 3,3 veces la masa de Júpiter y orbita a 41 UA de la enana marrón. En 2006, un disco de polvo se encuentran alrededor de la estrella madre, proporcionando evidencia de una formación de los planetas sobre el mismo que una estrella normal (Foto: ESO).

## Objetivos

- Comprender que significan los valores numéricos que resumen las tablas de datos de los planetas del Sistema Solar
- Deducir el radio y el periodo de rotación de los satélites galileanos de Júpiter mediante el uso de un conjunto de observaciones fotográficas.
- Calcular la masa de Júpiter usando la tercera ley de Kepler.
- 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 $10^6$           |
| Venus    | 12 180        | 108.3 $10^6$          |
| Tierra   | 12 756        | 149.7 $10^6$          |
| Marte    | 6 760         | 228.1 $10^6$          |
| Júpiter  | 142 800       | 778.7 $10^6$          |
| Saturno  | 120 000       | 1 430.1 $10^6$        |
| Urano    | 50 000        | 2 876.5 $10^6$        |
| Neptuno  | 45 000        | 4 506.6 $10^6$        |

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

### 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

### 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.

### 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 acaba 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 serían 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.

### 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.

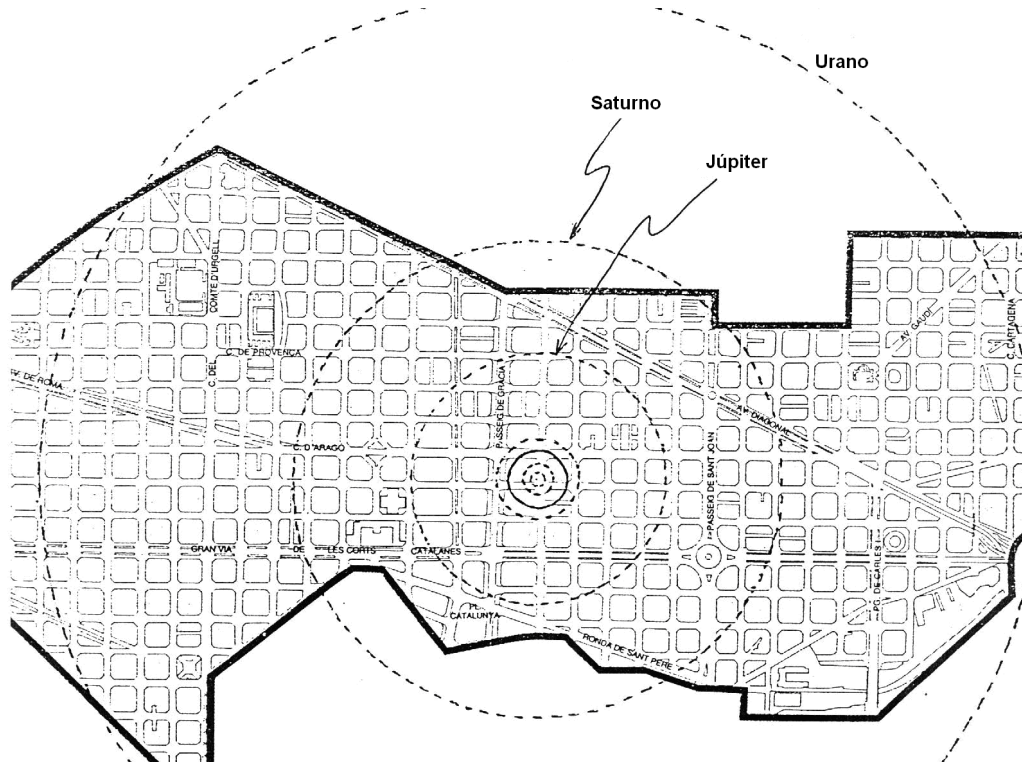


Fig. 5: Mapa del Ensanche de Barcelona con algunos planetas

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.

### 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.

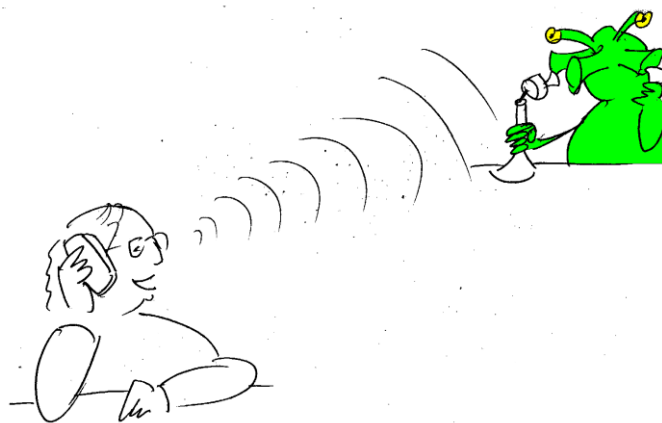


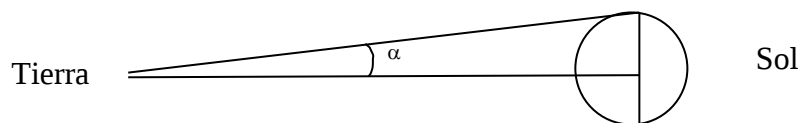
Fig. 7: Otro ejemplo de modelo

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 seria 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!

### Modelo de tamaños aparentes del disco solar desde cada planeta

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

Fig. 8: Desde la Tierra el Sol se ve bajo un ángulo  $\alpha$ .

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:

$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{0,7 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6} = 0,0045 \text{ radianes}$$

Y en grados:

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

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 | $\tan \alpha$ | $\alpha$ (°) | $\alpha$ (°) 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.

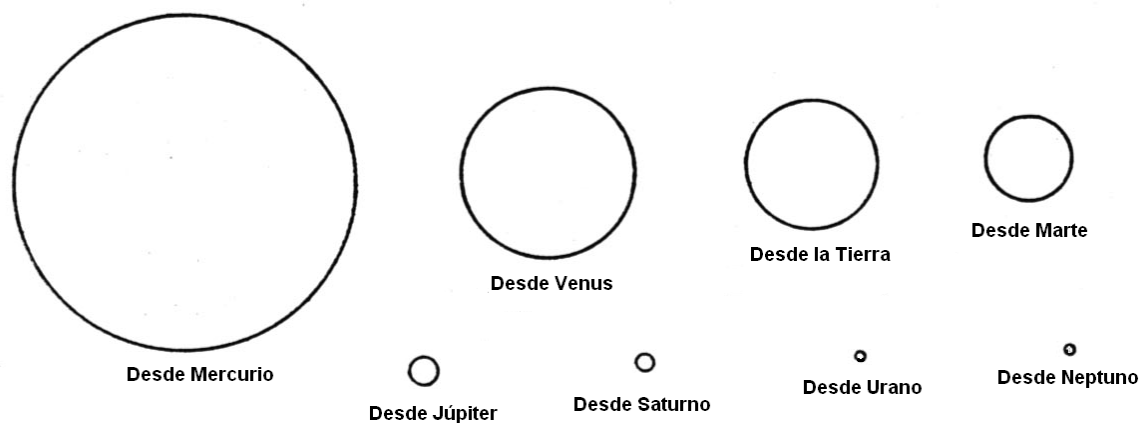


Fig. 9: El Sol visto desde cada planeta: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

## 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 <sup>3</sup> ) |
|----------|-------------------------------|
| 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,

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

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

### 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.



Fig. 11: Modelo para simular el achatamiento

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.

### 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  $220 \text{ km/s}$  o lo que es lo mismo de  $800000 \text{ km/h}$ .

| 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.

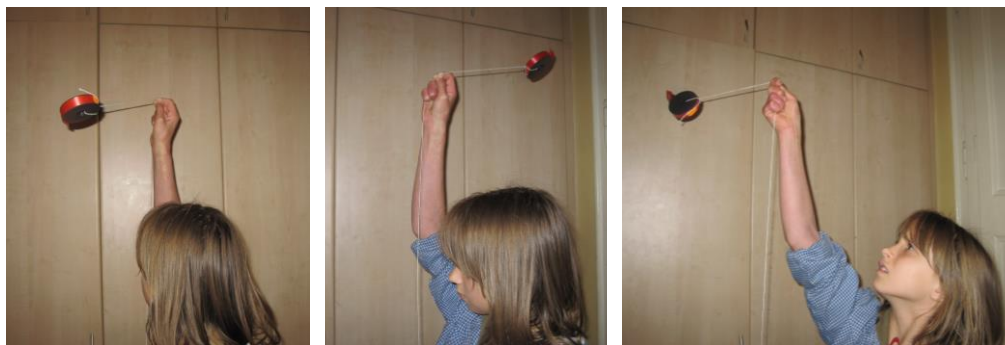


Fig. 12a, 12b y 12c: Simulando el movimiento circular de los planetas.

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  $g = \frac{GM}{R^2}$  donde  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  es la constant universal. Si nosotros sustituimos la masa del planeta por  $M = 4/3 \pi R^3 \rho$ , donde  $\rho$  es la densidad i  $R$  el radio del planeta, entonces:

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

donde  $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$  es la constante de la gravitación universal, Substituyendo estos dos últimos por los valores que figuran en la tabla 1 se puede calcular el valor de la gravedad superficial,  $g$ , para todos los planetas.

Sustituyendo estas dos últimas variables para los valores listados en la tabla 6 (después de convertir el radio en metros y la densidad en  $\text{kg} / \text{m}^3$ , 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. | $\rho$ 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

### 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 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) i 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

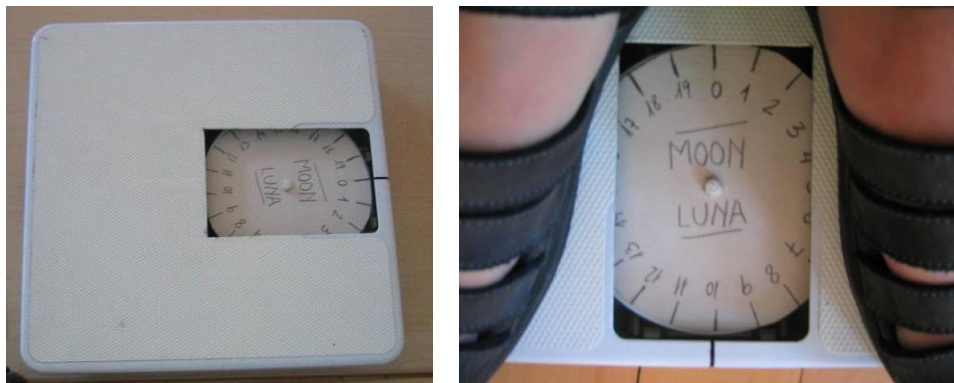


Fig.13a y 13 b:: Báscula de baño con el disco substituido



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

### 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. El tipo, la forma o la masa de los proyectiles, etc. Se puede conseguir incluso 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. A modo de ejemplo, calculamos las velocidades de

escape de algunos planetas. Para la Tierra,

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

para el menor planeta, Mercurio,

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

y para el mayor planeta, Júpiter,

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

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.)

### Modelo de cohete con una 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).



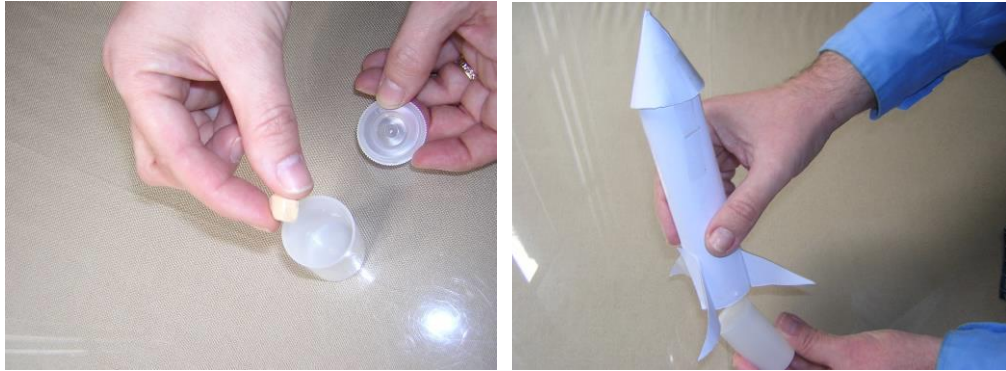


Fig. 16a, 16b, 16c y 16d: El proceso en cuatro instantáneas.

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**

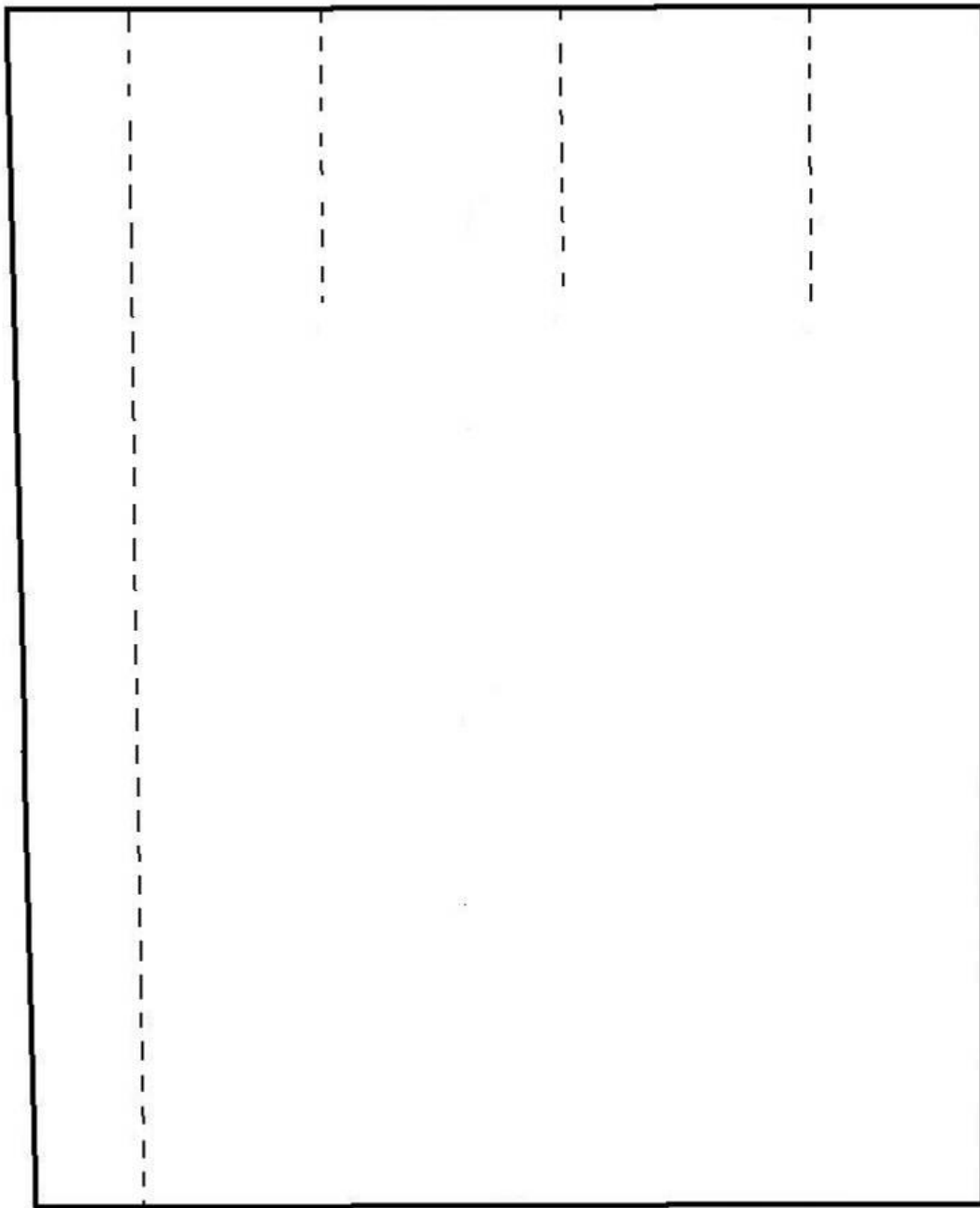


Fig. 19a: Cuerpo del cohete. Hay que pegar las aletas en la zona punteada.



Fig. 17: Varios cohetes.

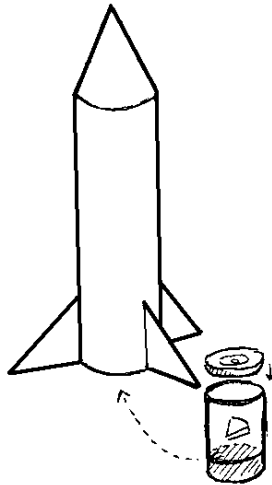


Fig. 18: Esquema simplificado

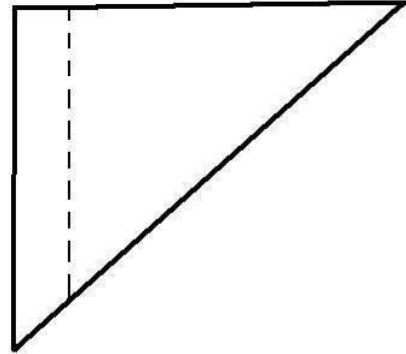


Fig. 19b: Modelo para las tres aletas

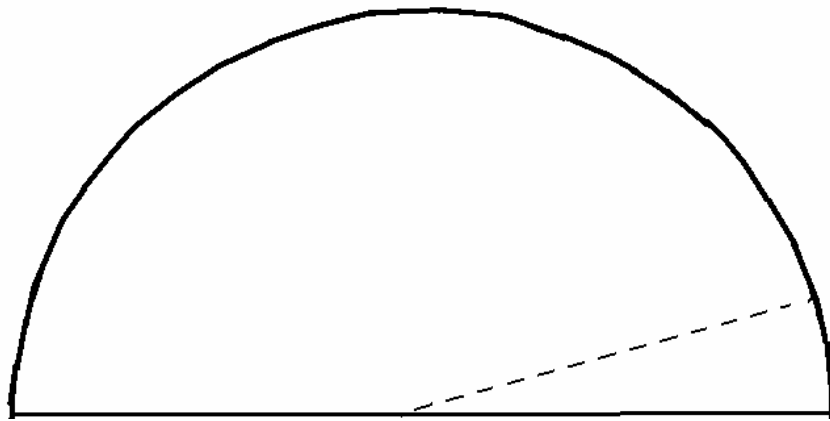


Fig.19c: Parte conoidal en la zona superior del cohete

## Modelos de sistemas exoplanetarios

Como hemos visto antes, la distancia a Alfa Centauri, la estrella más cercana a nosotros, es enorme en comparación con la distancia de los planetas de nuestro sistema solar. De hecho, Alpha 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.

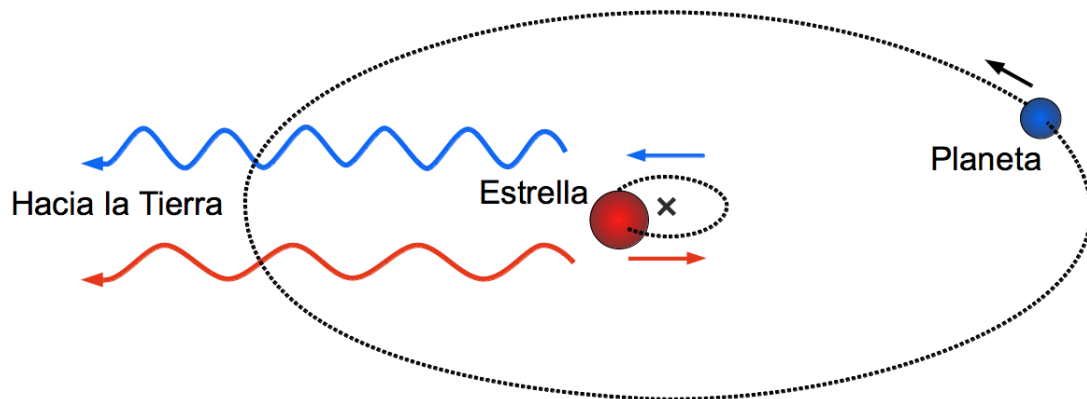


Fig. 20a: Método de la velocidad radial (RV) para la detección de planetas

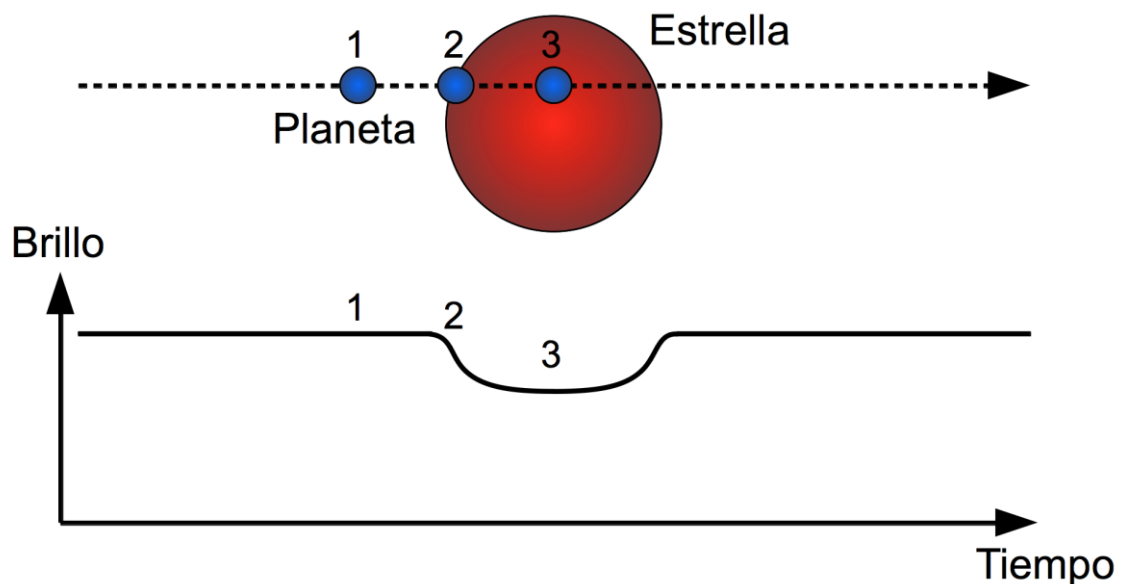


Fig. 20b: Método de tránsito para la detección de planetas

## Introducción a Exoplanetas

En la actualidad, existen dos métodos que están dominando en el descubrimiento de exoplanetas. Ambos son métodos indirectos, en los que la presencia de un sistema planetario se infiere de la observación de la estrella central del sistema.

El método de velocidad radial (RV) fue el primero con el que se encontró un exoplaneta alrededor de una estrella normal, con el descubrimiento de 51 Pegasus B en 1995. En este método, es medido el bamboleo de la estrella central debido a su movimiento alrededor del baricentro del sistema estrella-planeta. Este movimiento de la estrella central induce cambios muy pequeños en la luz de la estrella hacia el rojo o el azul (Fig. 20a), debido al desplazamiento Doppler. Con este método, podemos determinar la masa de un planeta respecto a la masa de la estrella central. En la práctica, sin embargo, no sabemos la orientación de la mayoría de los sistemas de planetas detectados con el método de RV, y las masas de los planetas que podemos extraer son masas mínimas (lo que significa que las masas

reales podrían ser más grandes). El otro método importante, llamado "método de tránsito" se basa en la observación de cambios en el brillo de una estrella cuando uno de sus planetas pasa ('tránsitos') delante de la estrella, ocultando de ese modo una pequeña parte de su disco estelar (Fig. 20b ). Con el método de tránsito,  $R_p$  tamaño de un planeta se puede medir, en relación con el tamaño de  $R_*$  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,  $dF / F = 0,01$  de una estrella llega al 1% leve durante el tránsito).

NASA (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>) mantiene en la actualidad un catalogo de objetos planetarios descubiertos fuera de nuestro Sistema Solar. En 2016, hubo más de 3000 planetas confirmados. Son llamados exoplanetas (abreviatura de planetas extrasolares). La nomenclatura de los exoplanetas es simple. La nomenclatura de los exoplanetas es simple. 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).

Los planetas 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  $M_{Jup}$  ( $1,90 \times 10^{27}$  kg) y radios de Júpiter- $R_{Jup}$  (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 600, o el 20% de todos los conocidos) con tamaños comparables a la Tierra, de hasta 1,5 RE (radios terrestres). Esperamos que estos planetas son los más comunes, pero las técnicas actuales de detección son más acertada en la detección de los objetos más masivos o más grandes.

En esta sección, consideramos algunos ejemplos de sistemas planetarios extrasolares que tienen más de tres planetas conocidos. La tabla 9 muestra los planetas alrededor de la estrella Ups Andrómeda, Gliese 581 y del sistema Kepler-62. El sistema planetario de Ups Andrómeda y Gliese 581 fueron descubiertos con el método de velocidades radiales RV y de estos planetas que conocemos sus masas mínimas, pero no a sus tamaños. Para Gliese 581, el planeta "d" se ha perdido, así su descubrimiento se ha retirado, probablemente fue causado por una señal marginal en los datos.

Los planetas del sistema Kepler-62 fueron descubiertos a partir de los tránsitos. Por lo tanto, se sabe que 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 como sus tamaños.

| Nombre del Planeta | Distancia media, ua | Periodo orbital, días | Masa mínima*<br>Masas Júpiter o Terrestes | Descubierto año | Radios km                          |
|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Ups And b          | 0,059               | 4,617                 | 0,69                                      | 1996            | 0.9 R <sub>Jup</sub> , 62 000km*   |
| Ups And c          | 0,83                | 241,52                | 1,98                                      | 1999            | 1.2 R <sub>Jup</sub> , 88 000km*   |
| Ups And d          | 2,51                | 1274,6                | 3,95                                      | 1999            | 1.5 R <sub>Jup</sub> , 110 000 km* |
| Gl 581 e           | 0,03                | 3,149                 | 0,006                                     | 2009            | 1,2 R <sub>E</sub> , 8 000 km*     |
| Gl 581 b           | 0,04                | 5,368                 | 0,049                                     | 2005            | 2,5 R <sub>E</sub> , 16 000 km*    |
| Gl 581 c           | 0,07                | 12,929                | 0,016                                     | 2007            | 1,7 R <sub>E</sub> , 11 000 km*    |
| Kepler-62 b        | 0,0553              | 5,714932              | <0,03                                     | 2013            | 1,3 R <sub>E</sub> , 8400km        |
| Kepler-62 c        | 0,0929              | 12,4417               | <0,013                                    | 2013            | 0,5 R <sub>E</sub> , 3400 km       |
| Kepler-62 d        | 0,12                | 18,16406              | <0,044                                    | 2013            | 1,9 R <sub>E</sub> , 12000 km      |
| Kepler-62 e        | 0,427               | 122,3874              | <0,113                                    | 2013            | 1,6 R <sub>E</sub> , 10000 km      |
| Kepler-62 f        | 0,718               | 267,291               | <0,11                                     | 2013            | 1,4 R <sub>E</sub> , 9000 km       |

Tabla 8: Tres sistemas extrasolares representativos con múltiples planetas. Datos extraídos del *Extrasolar Planets Catalog*<sup>2</sup> (excepto la última columna). \* Estos planetas que no se han descubierto por tránsito, se ha calculado su radio suponiendo que la densidad del planeta es igual a la densidad de Júpiter (1330 kg / m<sup>3</sup>) para los planetas gaseosos. Para planetas considerados como terrestre, el diámetro se calculó usando la densidad de la Tierra (5520 kg / m<sup>3</sup>).

Algunos exoplanetas que están muy cerca de la estrella central (Gliese 876 con una órbita más cercana a la estrella que Mercurio esta del Sol). Otros tienen planetas más lejanos (HD 8799 tiene un sistema planetario con tres planetas más o menos tan lejos como Neptuno esta del Sol). 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 | Radios, km |
|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|------------|
| Mercurio           | 0,3871              | 0,2409                | 0,0002                 | 2439       |
| Venus              | 0,7233              | 0,6152                | 0,0026                 | 6052       |
| la Tierra          | 1,0000              | 1,0000                | 0,0032                 | 6378       |
| Marte              | 1,5237              | 1,8809                | 0,0003                 | 3397       |
| Júpiter            | 5,2026              | 11,8631               | 1                      | 71492      |
| Saturno            | 9,5549              | 29,4714               | 0,2994                 | 60268      |
| Urano              | 19,2185             | 84,04                 | 0,0456                 | 25559      |
| Neptuno            | 30,1104             | 164,80                | 0,0541                 | 25269      |

Tabla 9: Planetas del Sistema Solar

Actualmente sabemos que hay exoplanetas en diferentes tipos de estrellas. En 1992 los radioastrónomos anunciaron el descubrimiento de planetas alrededor del púlsar PSR 1257 +12. En 1995 se anunció la primera detección de exoplanetas alrededor de una estrella "normal" de tipo solar, 51 Pegasi y después han sido detectados exoplanetas en órbita en torno a: una estrella enana roja (Gliese 876 en 1998), una estrella gigante ((Iota Draconis en 2001), una enana marrón estrella (2M1207 en 2004), una estrella de tipo A (Fomalhaut en 2008), un planeta se desintegra en torno a una estrella enana blanca (WD1145-1017), entre otros.

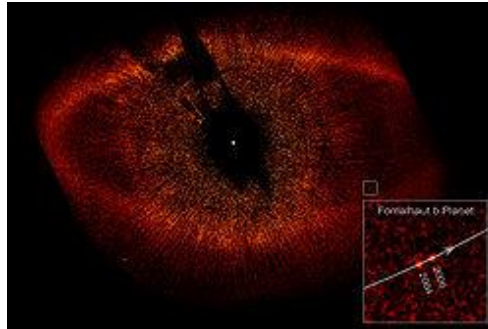


Fig. 21: Planeta Fomalhaut b dentro de la nube de polvo interplanetario de Fomalhaut en una imagen del Hubble Space Telescope (Foto: NASA).

### Determinación del diámetro de exoplanetas

Por planetas como los de Ups And, hallados por el método de velocidades radiales, no sabemos su tamaño. Aquí vamos a estimar el diámetro de un par de exoplanetas incluidos en la tabla 8.

Podemos lograr este objetivo, asumiendo que sabemos que la densidad del exoplaneta. Para nuestro estudio, consideramos que los planetas gaseosos tienen la densidad de Júpiter y que los exoplanetas terrestres tienen la misma densidad que el planeta Tierra. Por definición, la densidad de un cuerpo de masa  $m$  está dado por:  $\rho = m / V$

La masa  $m$  del exoplaneta aparece en la tabla 9, y el volumen  $V$  se puede obtener considerando el planeta como una esfera  $V = 4 \pi R^3 / 3$ . Si sustituimos esta fórmula en la anterior, se puede obtener el radio del exoplaneta,

$$R = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}$$

Sugerimos al lector calcular el diámetro de Gliese 581c (exoplaneta terrestre) suponiendo que su densidad es  $\rho = 5520 \text{ kg / m}^3$  (la densidad de la Tierra). A continuación, repetir el cálculo para un exoplaneta no terrestre, tales como el primer sistema planetario múltiple que fue descubierto alrededor de una estrella de la secuencia principal, Upsilon Andromedae. Este sistema consta de tres planetas, todos ellos similares a Júpiter: planetas b, c y d de Ups Andromeda. Hay que calcular sus diámetros asumiendo  $\rho = 1330 \text{ kg/m}^3$  (la densidad de Júpiter) y comparar los resultados con los de la tabla 8.

Usando estos resultados y la distancia promedio tomada de la tabla 8, se puede producir un modelo en la siguiente sección.

### Determinación de la masa de la estrella central

Haciendo uso de los valores de la tabla 9 y la tercera de las leyes de Kepler, se puede estimar la masa de la estrella central  $M$ . Es bien sabido que  $a^3 / P^2 = \text{const}$  y podemos demostrar que esta constante es la masa de la estrella central, expresada en masas solares. Asumiendo que el movimiento de los exoplanetas alrededor de la estrella en una órbita circular de radio  $a$ , se puede escribir:

$$m \cdot \frac{v^2}{a} = \frac{G \cdot M \cdot m}{a^2}$$

Para este movimiento circular, la velocidad  $v$  verifica,  $v^2 = G M / a$ . El periodo  $P$ , para un movimiento circular, es  $P = 2 \pi a/v$ , donde al introducir el valor de la velocidad  $v$  anterior, se deduce:

$$P^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot a^3}{G \cdot M}$$

Y, para cada exoplaneta, usando la tercera ley de Kepler se despeja,

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

Escribiendo la relación anterior para la Tierra que gira en torno al Sol, usando  $P=1$  año y  $a=1$  ua, deducimos la siguiente relación

$$1 = \frac{G \cdot M_s}{4 \cdot \pi^2}$$

Si dividimos las dos últimas igualdades, y usando la masa del Sol como unidad, obtenemos

$$\frac{a^3}{P^2} = M$$

donde sabemos que  $a$  es el radio de la órbita (en ua),  $P$  el período de revolución (en años) y podemos determinar la masa de la estrella central dada en masas solares). Esta relación nos permite determinar la masa de la estrella central en unidades de masas solares. Por ejemplo, calcular la masa de la estrella de Ups And y Gl 581 en masas solares (el resultado debe ser 1,03 y 0,03 masas solares).

### Modelo a escala de un sistema exoplanetario

Primero elegimos la escala del modelo. Para distancias, la escala apropiada es: 1 UA = 1 m. En este caso todos los exoplanetas pueden caber dentro de un aula típica, así como los primeros cinco planetas de nuestro sistema solar. Si la actividad se lleva a cabo fuera (por ejemplo, en el patio de la escuela), podemos construir un modelo completo. A escala diferente necesita ser utilizado para el tamaño del planeta, por ejemplo: 10000 kilómetros = 0,5 cm. En este caso, el planeta más grande, Júpiter, es de 7 cm de diámetro y el más pequeño (Mercurio) será de 0,2 cm de tamaño. Ahora podemos construir el Sistema Solar, o cualquiera de los sistemas de la tabla 8 utilizando los valores medios a distancia incluidos en las tablas 8 y 9, y los diámetros calculados previamente. Para las estrellas centrales, podemos calcular sus tamaños de la relación radio-masa estelar, con  $R$  y  $M$  en unidades solares,

$$R \sim 1.06 M^{0.945}$$

y usando la masa deducida del ejercicio anterior.

En los últimos años hemos aprendido que las configuraciones de los sistemas planetarios son diversas. La parte interna del Sistema Solar está poblada por los pequeños planetas rocosos, y el primero de los planetas gigantes gaseosos, Júpiter, está a 5,2 UA del Sol. Muchos de los exoplanetas, sin embargo, orbitan alrededor de sus estrellas mucho más cerca que cualquier planeta en nuestro propio Sistema Solar orbita alrededor del Sol. Otra diferencia es que muchos de estos que orbitan cercanos son grandes planetas gaseosos.

Estas diferencias se cree que son principalmente debidas a un sesgo observacional. El método de la velocidad radial es más sensible cuando los planetas están en órbitas más pequeñas y son más masivos. Además, con el método de tránsito es más probable detectar planetas en órbitas cortas que están cerca de su estrella central. Sin embargo, se puede suponer que la mayoría de los exoplanetas tienen órbitas mucho más grandes. Parece plausible que en la mayoría de los sistemas exoplanetarios, hay uno o dos planetas gigantes con órbitas similares en tamaño a las de Júpiter y Saturno. También se espera que una gran fracción de las estrellas tengan planetas similares a la Tierra en órbitas similares a nuestra Tierra. Sin embargo, su detección es muy difícil y, en consecuencia, sólo se conocen muy pocos de ellos.

## Habitabilidad de exoplanetas

Ahora consideramos la habitabilidad de los exoplanetas. La zona habitable es la región alrededor de una estrella donde un planeta con suficiente presión atmosférica puede mantener agua líquida en su superficie. Esta es una definición conservadora y se limita a la vida tal como la conocemos en la Tierra. Algunos científicos planetarios han sugerido incluir zonas equivalentes alrededor de las estrellas en las que podrían existir otros compuestos disolventes tales como amoníaco y metano en formas líquidas estables.

Los cálculos aproximados indican que la zona del sistema solar habitable, donde puede existir agua líquida (es decir, donde la temperatura varía de 0° a 100° C), oscila entre 0,7 a 2 ~ UA. El borde interior de esta zona se encuentra cerca de las órbitas de Venus y el borde exterior está cerca de la órbita de Marte (el área verde en la figura 22). Existen muchas estimaciones diferentes de la zona habitable del sistema solar (ver Wikipedia sobre Zona Habitable) sin embargo, una reciente de Kopparapu en 2013 coloca el borde interior a una distancia de 0,99 UA, justo dentro de la órbita de la Tierra. Como sabemos, sólo la Tierra está habitada, ya que Venus es demasiado caliente, con un fuerte efecto invernadero en el planeta, mientras que Marte no tiene agua de la superficie y en el mejor, podría tener algo de vida microbiana muy básico. Conocida la energía de salida de una estrella, las estimaciones de la zona habitable de nuestro sistema solar fácilmente se pueden ampliar a otros sistemas planetarios. Una lista de planetas potencialmente habitables se da en <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>. También dan una tabla donde estos planetas están ordenados por un "índice de similitud de la Tierra = ESI '.

Posiblemente el ejemplo más interesante de un sistema planeta potencialmente habitable es Kepler-62, cuyos tránsitos fueron descubiertos por la misión espacial Kepler en 2013. Este sistema contiene al menos 5 planetas, todos ellos con radios de entre 0,54 y 1,95 radios terrestres.

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. Sus posiciones en el sistema de Kepler-62, por otro lado, significa que 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 podría tener agua líquida en sus superficies, tal vez que los cubre ellos por completo. Para Kepler-62e, que se encuentra cerca de la gama

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. Si se consideran los tamaños de Marte y Kepler-62f: ¿Qué planeta tiene más probabilidades de albergar vida, y por qué?

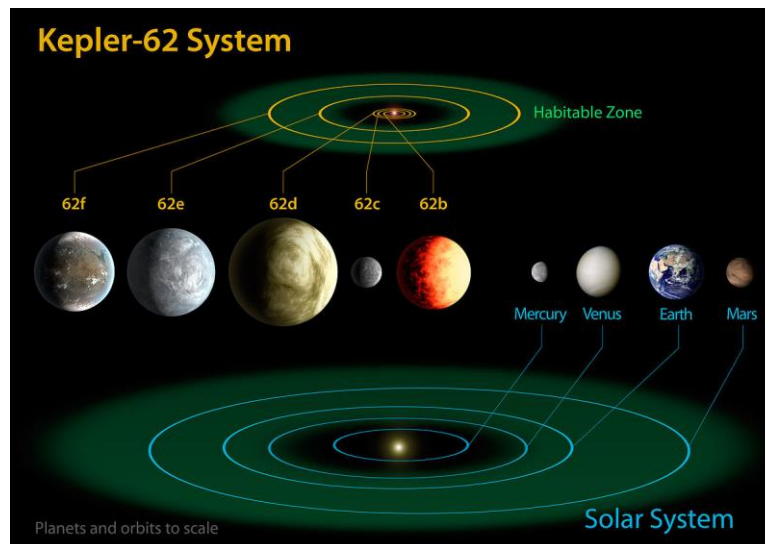


Fig. 22: El sistema Kepler-62 en comparación con el sistema solar interior. La región verde indica la zona habitable - la zona donde la vida tal como la conocemos podría existir. Fuente NASA Ames / JPL-Caltech.

Todavía hay muchas preguntas sin respuesta acerca de las propiedades 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 KEPLER y TEES de la NASA y los CHEOPS europeas y las misiones de Platón, esta última con el lanzamiento en el año 2024 .

## Bibliografía

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