



MÉTODOS DE DETECCIÓN DE EXOPLANETAS

Exoplanetas
Taller número 4.1

NOTAS PARA EL PROFESOR

Objetivo: Aprender los diferentes métodos de detección de exoplanetas: velocidad radial, tránsito y curvas de luz, microlentes y aplicar experimentalmente las curvas de luz para calcular el radio del exoplaneta.

Edad recomendada: de 12 a 18 años

Resumen de las actividades:

1. Se empieza con una actividad colaborativa para contrastar los conocimientos previos de los alumnos acerca de los exoplanetas.
2. El profesor explica los diferentes métodos de detección de exoplanetas. Se construye un detector de exoplanetas y los alumnos analizan la curva de luz. Seguidamente, se aplican los cálculos con los datos facilitados de los exoplanetas a descubrir.
3. Mediante una actividad colaborativa, los alumnos se coevaluarán de los nuevos conocimientos aprendidos.

Temporización: 2 horas

Contenidos curriculares:

1. Teorías y hechos experimentales.
2. Fases de una investigación. Diseño de un procedimiento experimental

Competencias científico-técnicas:

- ✓ Competencia 1:
Identificar y caracterizar los sistemas físicos y químicos desde la perspectiva de los modelos, para comunicar y predecir el comportamiento de los fenómenos naturales
- ✓ Competencia 4:
Identificar y resolver problemas científicos susceptibles de ser investigados en el ámbito escolar, que impliquen el diseño, la realización y la comunicación de investigaciones experimentales
- ✓ Competencia 6:
Reconocer y aplicar los procesos implicados en la elaboración y validación del conocimiento científico

Metodología didáctica:

- trabajo en grupo,
- debate,
- co-evaluación,
- aprendizaje basado en proyectos,
- uso de las tecnologías de la información y comunicación



Recursos:

- Ordenador del profesor con acceso a internet y proyector
- Ordenadores de los alumnos con acceso a internet.
- App para detectar la luz del móvil, como Sensor Kinetics para [Android](#) y [IOS](#). La aplicación es gratis. Si se desea exportar los datos Sensor Kinetics Pro, cuesta 2,40€ (2019). También está [Andro Sensors](#), que se puede configurar automáticamente para exportar datos.
- Cajas de cartón de toner pintadas de negro, linterna, tijeras, pegamento, etc.
- Acceso a la [página web del proyecto](#)

Archivos adjuntos:

- Tabla de datos de exoplanetas ficheros de <http://xtec.cat/~oschlute/EscapeEarth/data/data.rar>
- Ficheros de curvas de luz <http://xtec.cat/~oschlute/EscapeEarth/data/data.rar>

Lecturas recomendadas:

Para alumnos:

- App's para iPhone [Exoplanet](#), [Exoplanetapp](#) y para [Android](#)
- Video educativo en inglés: Exoplanets Explained <https://youtu.be/zFPnOUSdMdc>
- <https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/index.html>
- Viaje virtual <https://exoplanets.nasa.gov/eyes-on-exoplanets/>
- Estudiante de instituto calcula la probabilidad de planetas de la medida de la Tierra en los datos de Kepler:
<https://exoplanets.nasa.gov/news/1562/high-school-senior-uncovers-potential-for-hundreds-of-earth-sized-planets-in-kepler-data/>
- <https://exoplanets.nasa.gov/news/1383/eso-discovers-earth-size-planet-in-habitable-zone-of-nearest-star/>
- http://esero.es/wp-content/uploads/2018/08/Cuaderno-ESERO_Detective-de-exoplanetas_DE-SB-01_2%C2%AA-ED_DIGITAL.pdf
- <https://www.zooniverse.org/projects/nora-dot-eisner/planet-hunters-tess/classify>
- <https://www.zooniverse.org/projects/ianc2/exoplanet-explorers/about/research>
- <http://www.lapizarradeyuri.com/2010/11/25/500-exoplanetas/>
- <http://www.trappist.one/>

Para profesores:

- Base de datos de exoplanetas: <http://www.openexoplanetcatalogue.com/>
- Conferencia de la NASA sobre la búsqueda de exoplanetas (2017) <https://www.youtube.com/watch?v=jftx-DjfeeU>
- Ejercicios interactivos <https://astro.unl.edu/interactives/>
- California Planet Survey <http://www.exoplanets.org/cps.html>
- Habitable Zone Gallery <http://www.hzgallery.org/>



- Borucki, W. et al.; Kepler-4b: Hot Neptune-Like Planet of a G0 Star Near Main-Sequence Turnoff † ; 2010 <http://www.exoplanets.org/papers/kepler-4b.pdf>
 - The Planetary society <http://www.planetary.org/explore/projects/exoplanets/>
 - The Extrasolar Planets Encyclopaedia <http://exoplanet.eu/>
 - Astronomical Society of the Pacific
<http://www.astrosociety.org/education/astronomy-resource-guides/the-search-for-planets-around-other-stars/>
 - Planetary Habitability Laboratory
<http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods>
 - https://astro.unl.edu/interactives/doppler/paper/Doppler_3.pdf
 - <https://www.cfa.harvard.edu/~avanderb/tutorial/tutorial.html>
-
- **Datos de entrada para la propuesta gamificada:** Radio de la estrella o profundidad de tránsito.
 - **Datos de salida para la propuesta gamificada:** Radio del exoplaneta.



TALLER

INTRODUCCIÓN:

Tiempo: 45 minutos.

Contenido: Conectar con conocimientos previos de los alumnos

La actividad empieza con una actividad colaborativa llamada 2-4-8 o bola de nieve. En un primer momento, los alumnos trabajan en parejas para preguntarse el uno al otro una batería de preguntas para entrar en contexto. Al finalizar el cuestionario en parejas, los alumnos comentan los resultados con otra pareja, es decir en un grupo de 4, luego de 8 y se acaba con un debate en el grupo - clase.

1. ¿Qué diferencia hay entre un planeta de nuestro Sistema Solar y un exoplaneta?
2. ¿Cómo se forma un planeta?
3. ¿Qué es la migración planetaria?
4. ¿Cuántos exoplanetas crees que se han descubierto hasta hoy?
5. ¿Cuántos de estos exoplanetas crees que son habitables?
6. ¿Cómo se descubre un exoplaneta?

Durante el debate final, el profesor puede resolver alguna de las dudas, pero es interesante dejar algunas preguntas sin resolver para incentivar el interés de los alumnos.

Es el momento también para repasar los tipos de planeta de nuestro Sistema Solar (rocosos, gaseosos, helados) y plantear si los exoplanetas son del mismo tipo y si la estructura y distribución de los exosistemas estelares son parecidos o no.

Los alumnos exploran la web de la Nasa [Eyes on Exoplanets](#), que permite enfocar y moverse alrededor de la galaxia. Deberán:

- Filtrar por observatorio
- Tipo de planeta
- Descubrimientos confirmados o no

[Visita a Próxima Centauri B](#) y reflexión sobre la importancia de haber encontrado un planeta en este sistema. ¿Es el más cercano a la Tierra? ¿Es un sistema estable?

DESARROLLO

Tiempo: 60 minutos.

Contenido: Métodos de detección de exoplanetas

A partir del video educativo en inglés [Exoplanets Explained](#) (7 minutos en inglés) se explican las técnicas a partir de las cuales se han encontrado exoplanetas. Se recomienda ir parando a cada paso para ampliar la explicación y aclarar dudas.

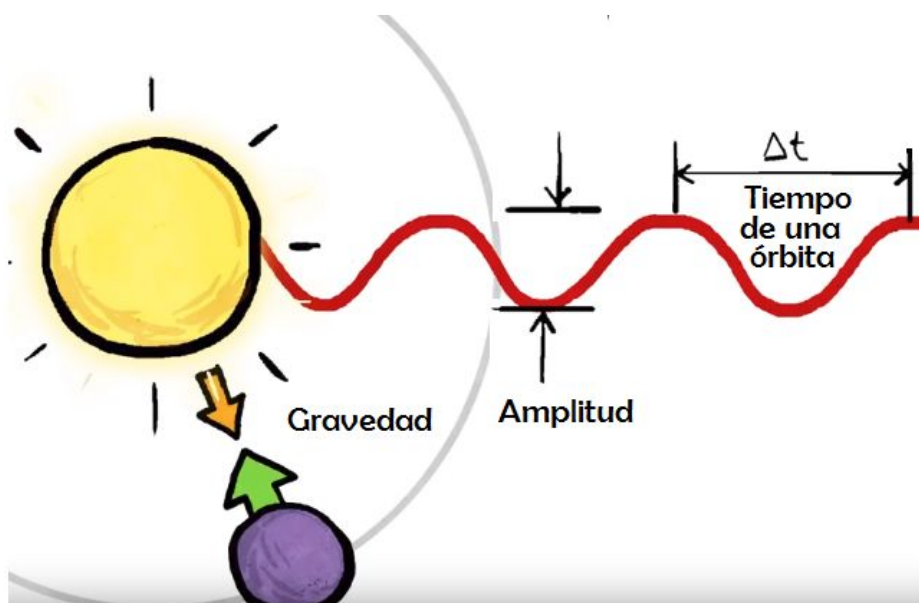
1. Velocidad radial (efecto Doppler)
2. Tránsito de planetas y Curvas de luz
3. Microlentes
4. Detección directa por imagen

1. Velocidad radial (efecto Doppler)

De la misma manera que un sonido al acercarse se oye más agudo y al alejarse más grave, la luz de un objeto que se acerca se hace más azulada y rojiza al alejarse, debido a la variación de la longitud de onda.

En la [animación interactiva](#) se puede comprobar cómo el movimiento del emisor afecta la longitud de las ondas detectadas por el observador. Se puede arrastrar el emisor con el ratón para comprobar cómo el observador detecta las ondas.

Por otro lado, cuando un planeta orbita alrededor de una estrella, ésta también se siente atraída en menor medida por el planeta, de manera que el centro de gravedad del sistema no es el mismo centro de la estrella. Este bamboleo de la estrella o movimiento cíclico se puede detectar gracias al efecto Doppler en el espectro de la estrella. De la amplitud observada se puede deducir la masa del planeta. En la simulación del apartado de Estrellas -> Espectrografía) se observa el efecto Doppler en un espectro de manera simplificada.



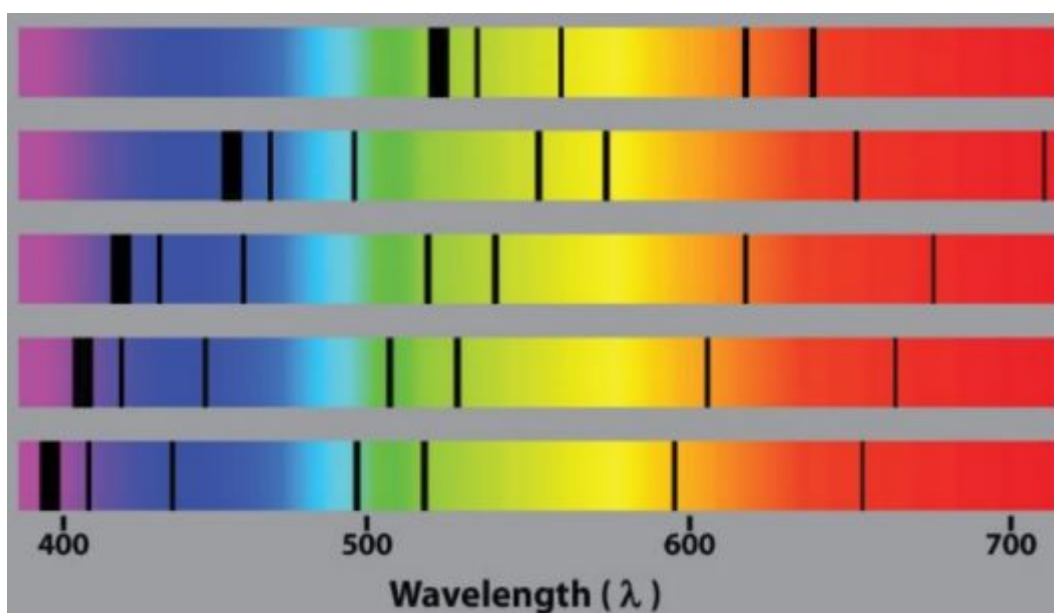
Cuanto más amplitud tenga la órbita, más masa tendrá el planeta.

De ahí que la mayoría de planetas detectados sean los llamados Júpiter calientes: Planetas de la masa de Júpiter o superior muy cerca de sus estrellas.

En la siguiente [simulación](#) se observa cómo la variación de la velocidad radial de un planeta se puede observar y depende de:

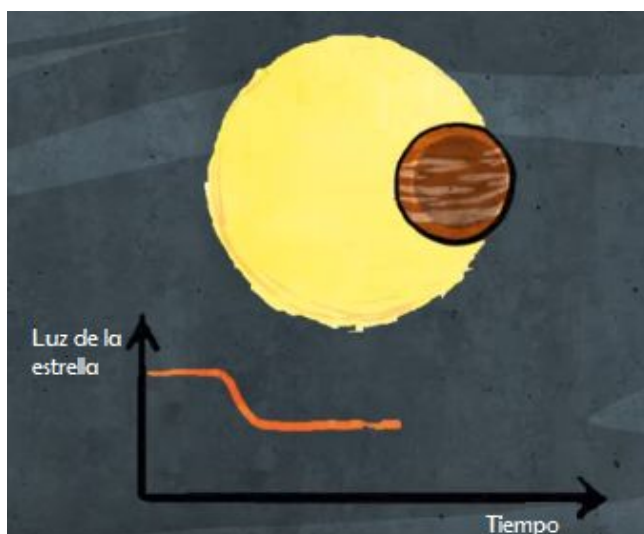
- la masa de la estrella y el planeta
- la excentricidad de la órbita
- la inclinación desde la cual se observa

Siendo el último espectro la referencia de laboratorio, se razonará con los alumnos la dirección con la que se mueven la estrellas de los demás espectros. Se pedirá a los alumnos que dibujen los espectros en la otra dirección.



2. Tránsito de planetas y curvas de luz

Al observar la luz de una estrella durante largo tiempo, se puede deducir que un planeta orbita y pasa por delante de ella si la luz disminuye periódicamente. Uno de los problemas de esta técnica es que sólo podemos detectar los exoplanetas si el plano de la órbita coincide con el de nuestro punto de vista.



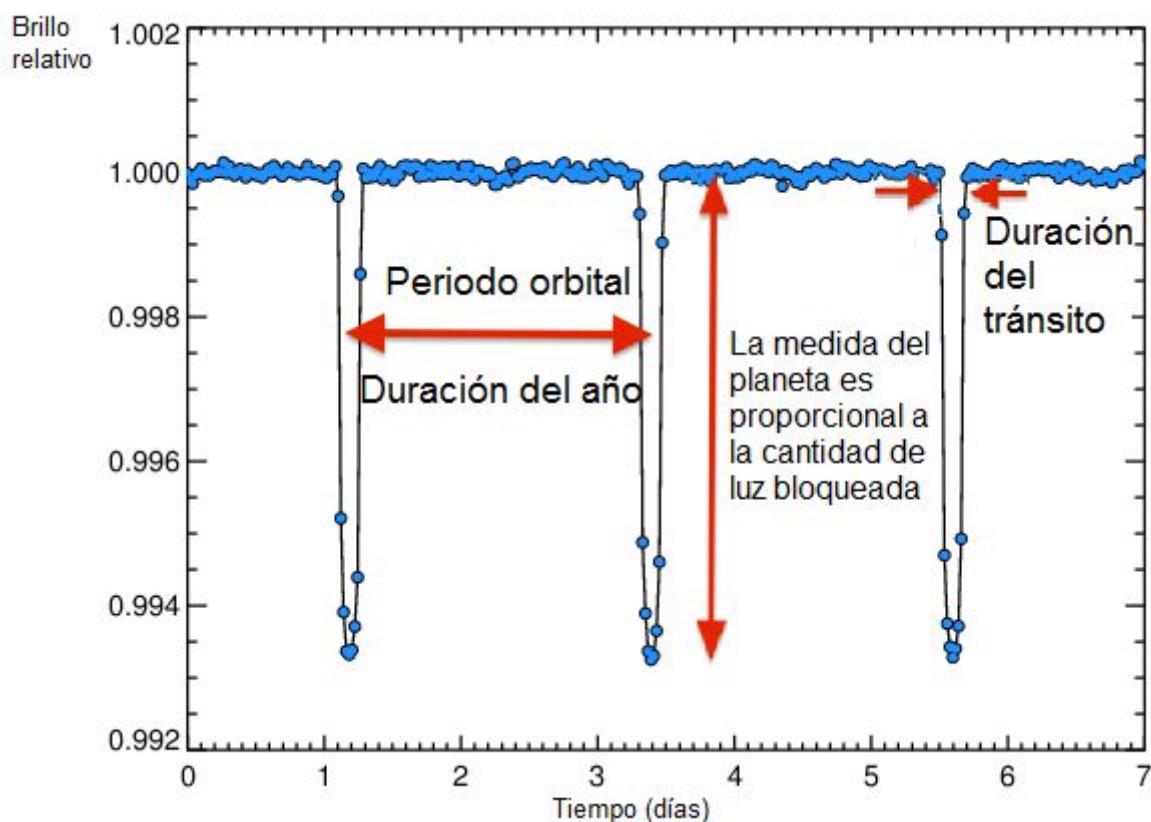
El siguiente [vídeo](#) de 6 segundos ilustra la disminución periódica de la luz.

En los siguiente enlaces se puede comprobar la forma de la curva de la luz en el caso de:

- [Un planeta](#)
- [Diferentes tamaños de planeta](#)
- [Sistema con varios planetas](#)

En la siguiente [simulación](#) podemos jugar con la masa, el radio, la excentricidad del planeta, para ver cómo afecta a la curva de luz y profundidad del tránsito.

Un buen resumen es la siguiente imagen:



Llegados a este punto los alumnos pueden responder las siguientes preguntas:

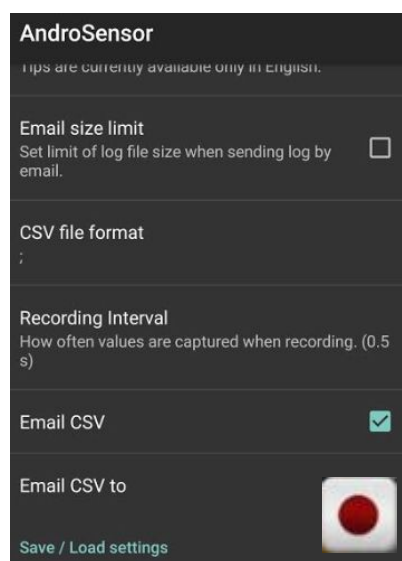
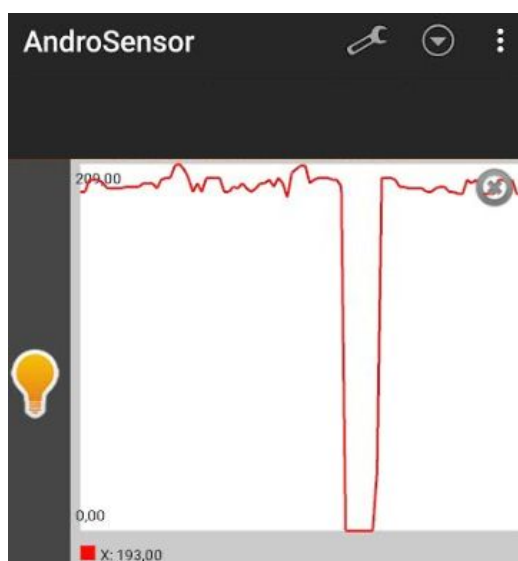
1. ¿Cómo afecta la masa de la estrella en la forma de la curva de luz?
2. ¿Cómo afecta el tamaño (radio) de un planeta en la forma de la curva de luz?
3. ¿Cómo pueden deducir los astrónomos que hay más de un planeta en el sistema?

Parámetro	Efecto en la curva de luz
Masa de la estrella	
Radio del planeta	
Masa del planeta	

Inclinación	
Otros: ...	

A continuación, aplicamos el ejercicio propuesto en la página del proyecto: <http://xtec.cat/~oschlute/EscapeEarth/> -> Fichas didácticas -> Exoplanetas -> Curvas de luz

Para ello, construiremos una caja negra con un agujero en el extremo iluminado por una linterna que hará de estrella. Por una ranura superior haremos pasar un objeto esférico pequeño que hará de planeta y observaremos por el otro extremo opuesto a la linterna. Seguimos los pasos especificados en la sección de [Recursos de Esero](#). Tomaremos los datos con la app [Sensor Kinetics](#), que existe tanto para Android y como para IOS o [Andro Sensors](#).



Para desde

grabar, el menú

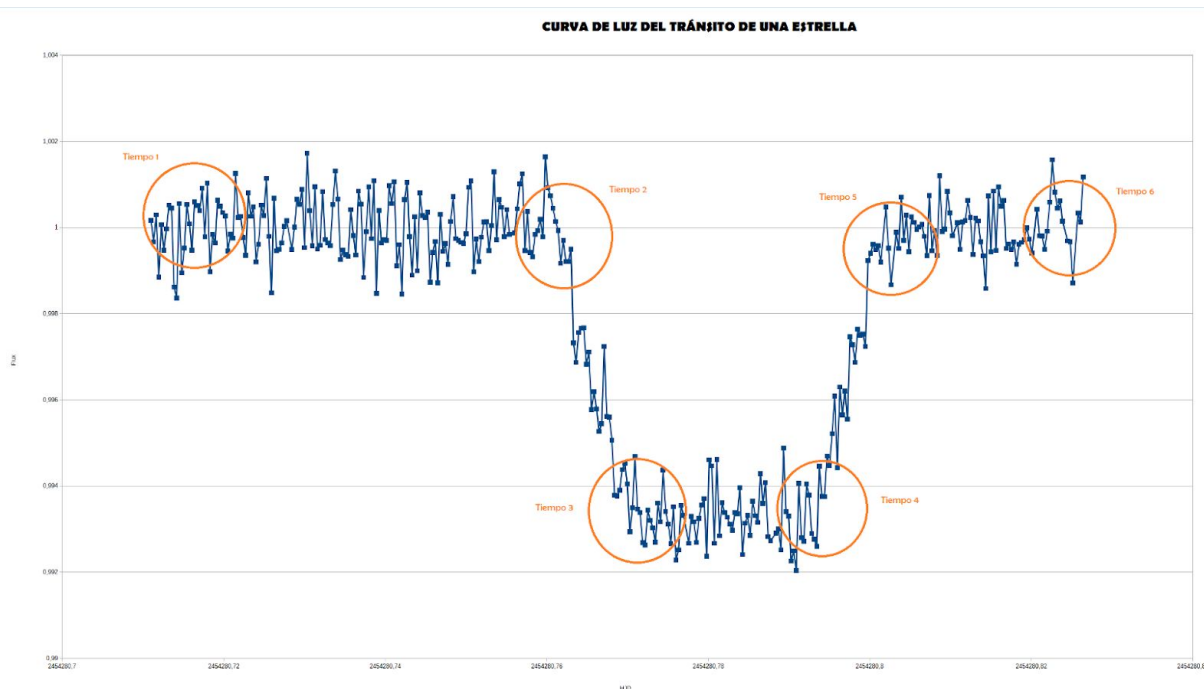
lateral izquierdo vemos el botón de grabar:

Veremos el mensaje de inicio de grabación y al parar la localización del fichero grabado. También podemos configurar la app para que nos envíe el fichero por email.

Recording has begun

Saved in SD card.
"/storage/0123-4567/AndroSensor/
Sensor_record_20190414_211640_Andr
oSensor.csv"

Comprobaremos cómo la curva de luz disminuye al paso del planeta. Escogeremos los 6 puntos marcados con un círculo de la siguiente figura:



Y los introducimos en el formulario de la web del proyecto:

Introduce los datos conocidos:

Luminosidad en Tiempo 1	<input type="text"/>
Luminosidad en Tiempo 2	<input type="text"/>
Luminosidad en Tiempo 3	<input type="text"/>
Luminosidad en Tiempo 4	<input type="text"/>
Luminosidad en Tiempo 5	<input type="text"/>
Luminosidad en Tiempo 6	<input type="text"/>

Gráfica

Si hemos utilizado la app que exporta datos, los alumnos podrán realizar una gráfica con todos los puntos en una hoja de cálculo.

El siguiente reto es realizar la curva a partir de los datos reales que se pueden encontrar en la carpeta <http://xtec.cat/~oschlute/EscapeEarth/data/data.rar>. La [tabla](#) muestra un resumen de los datos de cada planeta.

1. Los 3 primeros (GJ 43b, WASP-14b y CoRoT-1 b) presentan una curva de luz muy definida
2. Los 4 siguientes (HD 209458 b, K2-25 b, K2-18 b, GJ 9827 c) presentan curvas de luz menos definidas
3. Del resto no se han adjuntado curvas de luz

En todos los casos consta la profundidad de tránsito, que es un dato útil para continuar.

Tabla 5: Exoplanetas propuestos con sus parámetros (exoplanets.org)

Taller	2. Sistema Solar. Órbitas			3. Estrella	4. Exoplanetas. Tránsitos planetarios							Extra	
Planeta	Masa de la estrella M_{\odot}	Periodo orbital días	a: Semieje mayor de la órbita u.a.	Tipo espectral de la estrella	Radio de la estrella R_{\odot}	Masa del planeta M_J	Radio del planeta R_J	Profundidad de tránsito	Temperatura de la estrella K	Densidad g/cm^3	Inclinación de la órbita	Excentricidad	
GJ 436 b	0.452	2,644	0.029	M	0.464	0.073	0.377	<u>0.00696</u>	3350	1.69	86,36°	0.16	
<u>WASP-14b</u>	1.31	2,244	0.037	F	1.310	7.69	1.281	<u>0.0102</u>	6480	4.66	84,32°	0.09	
<u>CoRoT-1 b</u>	0.95	1,509	0.0253	G	1.110	1.03	1,490	<u>0.01927</u>	5950	0.380	85,10°	0	
<u>HD 209458 b</u>	1,131	3,525	0.0472	F	1,155	0.690	1,359	0.014607	6065	0.338	86,710°	0	
<u>K2-25 b</u>	0.294	3,485	0.02991	M	0.295	0.036	0.306	0.01134	3180	---	88,3°	0.27	
<u>K2-18 b</u>	0.359	32.94	0.1429	binaria eclipsante	0.411	0.0253	0.217	0.002804	3457	7.9	89,59°	0	
<u>GJ 9827 c</u>	0.614	3,648	0.03942	K	0.613	0.0076	0.1159	0.000361	4269	6.4	88,05°	---	
<u>Kepler-62f</u>	0.690	267.29	0.718	G	0.640	0.088 no confirmada	0.1257	0.000420	4925	---	89,9°	0.0944	
<u>Kepler-186 c</u>	0.478	7.267	0.0574	M	0.472	0.0064	0.111	---	3788	---	---	0.003	
<u>TRAPPIST-1b</u>	0.089	1,511	0.0115	M	0.121	0.00320	0.1027	0.007277	2516	3.98	89,56°	0	
<u>TRAPPIST-1c</u>	0.089	2.422	0.01576	M	0.121	0.00364	0.1003	0.00694	2516	4.87	89,7°	---	
<u>TRAPPIST-1e</u>	0.089	6.099	0.02917	M	0.121	0.00243	0.0834	0.004802	2516	5.65	89,736	0	
<u>TRAPPIST-1h</u>	0.089	18,768	0.0617	M	0.121	0.00104	0.0708	0.00346	2516	3.97	89,796°	0	
<u>LHS 1140 b</u>	0.146	24,737	0.0875	M	0.186	0.0212	0.131	0.00501	3130	12.5	89,912	0	

A continuación, si disponemos de las curvas de luz reales, seguimos con la siguiente pestaña de la web, que nos permitirá calcular el radio del planeta, dato que necesitaremos más adelante.

<http://xtec.cat/~oschlute/EscapeEarth/> -> Fichas didácticas -> Exoplanetas -> Tránsitos planetarios

Introducimos los datos conocidos:

Brillo máximo	<input type="text"/>
Brillo mínimo	<input type="text"/>
Profundidad de tránsito (si no se dispone del brillo)	<input type="text"/>
Radio de la estrella (en relación al Sol)	<input type="text"/>

Calcular radio del planeta

El radio del planeta se calcula a través de la fórmula siguiente, que se puede hacer aplicar a los alumnos en paralelo al cálculo de la página web:

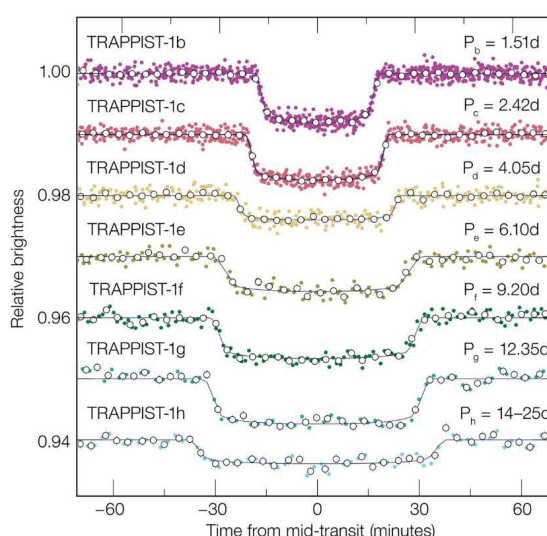
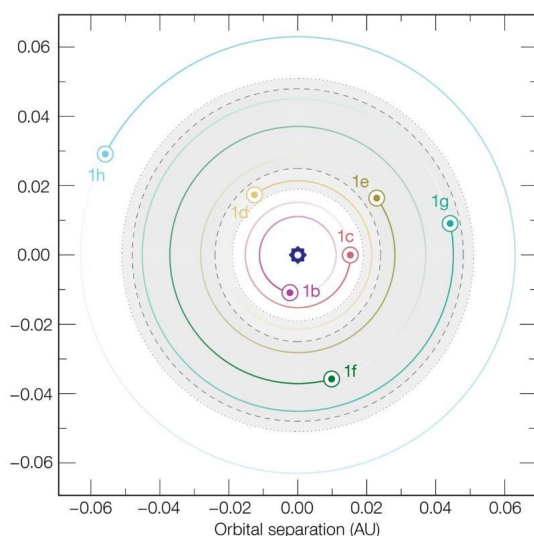
$$R_p^2 = \frac{\text{brillo máximo} - \text{brillo mínimo}}{\text{brillo máximo}} \times R_e^2$$

En caso de no disponer de las curvas de luz, pero sí de la profundidad de tránsito, podemos aplicar la misma fórmula, ya que la profundidad de tránsito es la relación:

$$\frac{\text{brillo máximo} - \text{brillo mínimo}}{\text{brillo máximo}}$$

El programa prioriza si la profundidad está informada

En caso de sistemas con varios planetas, las curvas de luz son más difíciles de analizar. Por ejemplo, el sistema TRAPPIST-1 con 7 planetas no muestra 7 curvas de luz diferenciadas, sino que se solapan unas con otras:



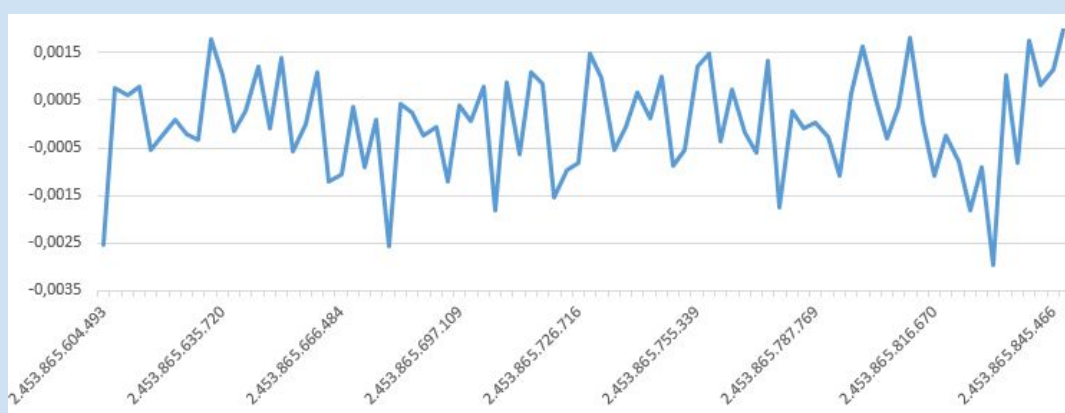
AVANZADO

Para ilustrar cómo es la curva de luz en un sistema con varios planetas, bajamos los datos del archivo de Exoplanetas de la Nasa:

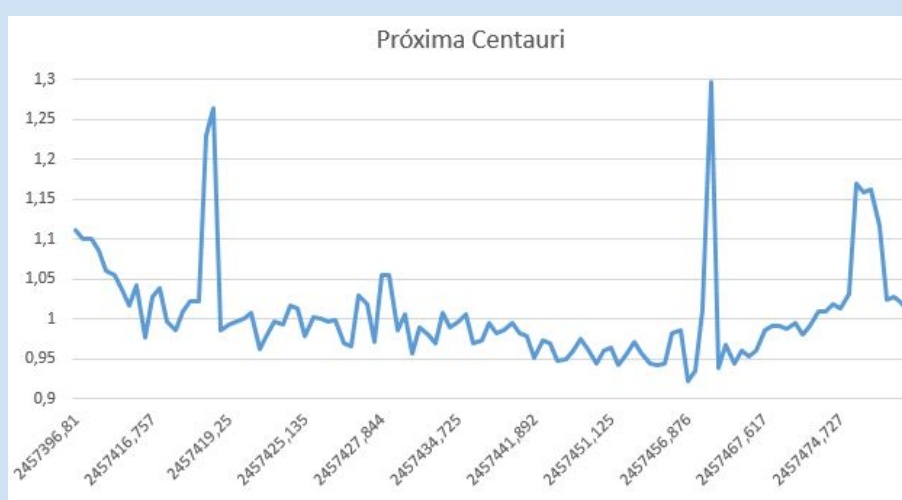
https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/bulk_data_download/

Previamente a bajar algún fichero, necesitamos ejecutar el script [wget](#), que debemos instalar en la carpeta de sistema. Escogemos el fichero de fotometría [wget PHOTOMETRIC.bat](#), y obtendremos las curvas de luz de más de 400 estrellas (150MB).

Por ejemplo, la variabilidad de la curva de luz que se obtiene del fichero [UID_0074995_PLC_002.tbl](#) y hace referencia a la estrella Gliese 581, indica que es un sistema multiplanetario. Se puede comprobar en el catálogo <http://exoplanet.hanno-rein.de>



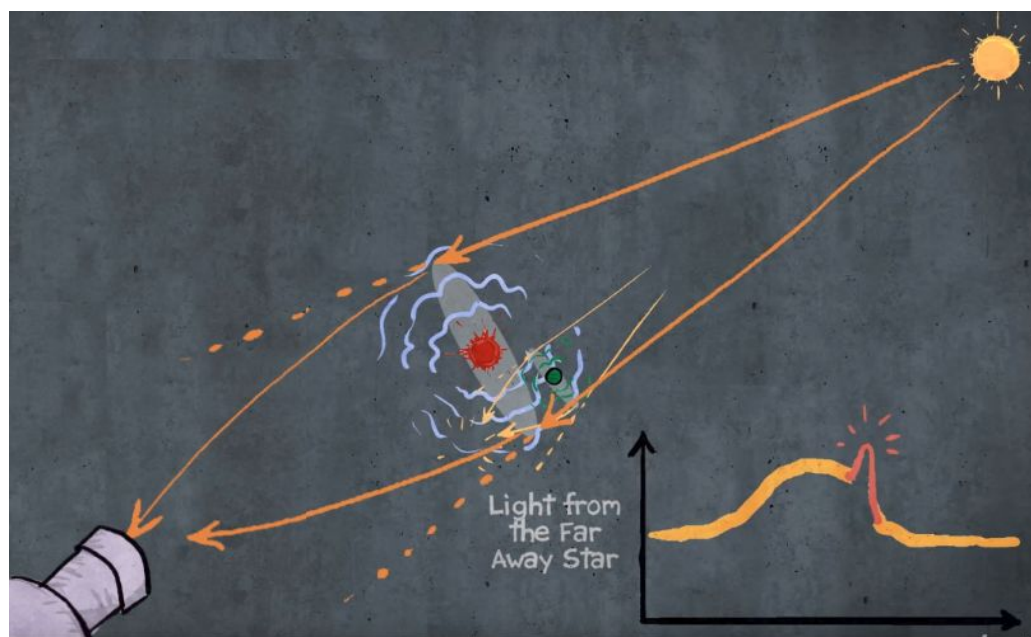
Otro caso complejo es el de Próxima Centauri, una estrella variable y compartiendo movimiento con un sistema doble de estrellas. ([UID_0070890_PLC_003.tbl](#))



- * [Cómo crear gráficos en Excel](#)
- * [Cómo crear gráficos en Open Office](#)
- * [Cómo importar ficheros csv](#)

3. Microlentes

El siguiente método confirma la teoría de la relatividad general de Einstein, que define la curvatura del espacio-tiempo. Cuando una estrella emite su luz, el viaje que realizan los fotones hasta nosotros puede ser desviado por la gravedad de una estrella que esté en el camino. El fenómeno actúa como una lente. Si la estrella que está en el camino tiene un planeta, la curva de luz se distorsiona doblemente.

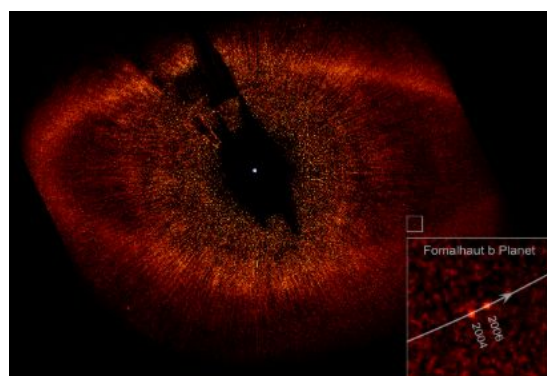


4. Detección directa por imagen

La detección directa de un exoplaneta es muy difícil, sobretodo si los planetas son pequeños o están muy cerca de su estrella. De hecho, el primer exoplaneta fotografiado, [Dagon](#) de la estrella Fomalhaut, fue visto porque tiene un anillo muy brillante. Por otra parte, existe un [debate](#) entre astrónomos sobre si una antigua estrella puede ser considerada un planeta, como es el caso del objeto que orbita alrededor de la enana marrón 2M1207. Como tarea, se puede pedir a los alumnos que busquen su imagen por internet y el año de su descubrimiento.



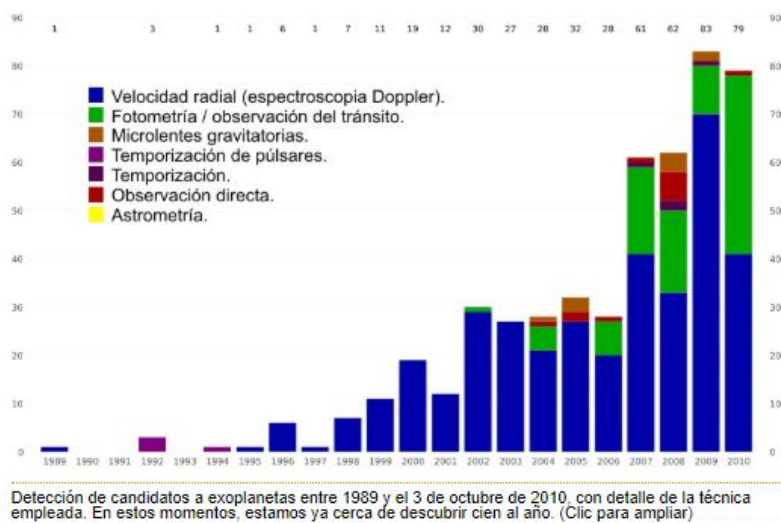
Estrella 2M1207 con su objeto en órbita



Estrella Fomalhaut con su planeta

Deberes

1. Colaborar con el proyecto colaborativo de detección de exoplanetas en [zooniverse](https://www.zooniverse.org/).
2. Opcional: visitar el perfil de Facebook de <https://www.facebook.com/TRAPPIST1Official>
3. Realizar un gráfico estadístico de los exoplanetas encontrados dependiendo de su método de detección. Para ello, se recomienda visitar la web <http://exoplanet.eu/diagrams/>. Si en 2010 la clasificación era la siguiente. ¿Continúa siendo la proporción la misma? Se puede utilizar la herramienta [DataGifMaker](https://data.gcf.com/), muy visual e intuitiva.



<http://www.lapizarradeyuri.com/2010/11/25/500-exoplanetas/>

PARA SABER MÁS



La siguiente [simulación](#) permite introducir el concepto de error en las observaciones de las curvas de luz en un sistema binario.



Mediante Phyton, se pueden bajar curvas de luz de Kepler & TESS en el siguiente [paquete](#)

CONCLUSIÓN:

Tiempo: 15 minutos

Contenido: Resumen de lo aprendido

Se pide a un alumno de cada equipo que ejerza de “embajador” y vaya a otro equipo a explicar lo aprendido. El equipo receptor deberá evaluar si los siguientes conceptos quedan claros:

- Métodos de detección de exoplanetas: enumeración y descripción
- Curva de luz: qué mide y cómo
- Cómo se obtiene el radio del planeta conociendo el radio de la estrella.



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)