

## Las órbitas de las lunas de Júpiter

Departamento de Física Moderna.  
Universidad de Cantabria

Julio 23, 2009

### Resumen

Se determina la masa del planeta Júpiter a partir de la reconstrucción de las órbitas de sus cuatro lunas.

### Equipo

Este experimento utiliza un ordenador Windows, el programa CLEA *La revolución de las lunas de Júpiter*, y una calculadora científica. (Tenga en cuenta que el equipo mencionado anteriormente puede proporcionar una calculadora.)

### Antecedentes históricos

Los astrónomos no pueden medir directamente muchas de las magnitudes que estudian, como las masas y distancias de los planetas y sus lunas. Sin embargo, podemos deducir algunas propiedades de los cuerpos celestes a partir de sus movimientos, a pesar de que no podemos medirlos directamente. Nicolaus Copernicus, en 1543, hizo la hipótesis de que los planetas giran en órbitas circulares alrededor del sol. Tycho Brahe (1546-1601) observó cuidadosamente la ubicación de los planetas y 777 estrellas durante más de un período de 20 años usando un sextante y una brújula. Estas observaciones fueron utilizadas por Johannes Kepler, un estudiante de Brahe, para deducir tres leyes empíricas matemáticas que rigen la órbita de un objeto alrededor de otro. La Tercera Ley de Kepler es la que se aplica en este laboratorio. Para una luna en órbita alrededor de un objeto (planeta) mucho más masivo, se establece lo siguiente:

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

en donde M es la masa del planeta en unidades de la masa del sol. "a" es la longitud del semi-eje mayor en unidades de la distancia media Tierra-Sol (1 UA: Unidad Astronómica). Si la órbita es circular, como se asume en este laboratorio, el semi-eje mayor es igual al radio de la órbita. "p" es el período de la órbita en años-Tierra. El período es la

cantidad de tiempo requerido por la luna para recorrer la órbita alrededor del planeta una vez.

En 1609, se inventó el telescopio, lo que permitió la observación de objetos celestes no visibles a simple vista. Galileo usó un telescopio para descubrir que Júpiter tenía cuatro lunas que orbitan alrededor de ella e hizo estudios exhaustivos de este sistema, que resultaron especialmente notables ya que el sistema de Júpiter es una versión en miniatura del sistema solar. Estudiar un sistema de este tipo podría abrir un camino para entender las propuestas de resolución del sistema solar en su conjunto. De hecho, el sistema de Júpiter proporcionó una clara evidencia de que el modelo heliocéntrico de Copérnico del sistema solar era físicamente posible. Desafortunadamente para Galileo, la Inquisición estuvo en desacuerdo con sus conclusiones, fue juzgado y obligado a retractarse.

Introducción

Vamos a observar las cuatro lunas de Júpiter que Galileo vio a través de su telescopio, conocidas hoy como las lunas de Galileo. Se llaman Io, Europa, Ganímedes y Calixto, enumeradas en orden creciente de su distancia a Júpiter.

Si tú miraras hacia Júpiter a través de un pequeño telescopio, podrías ver lo siguiente

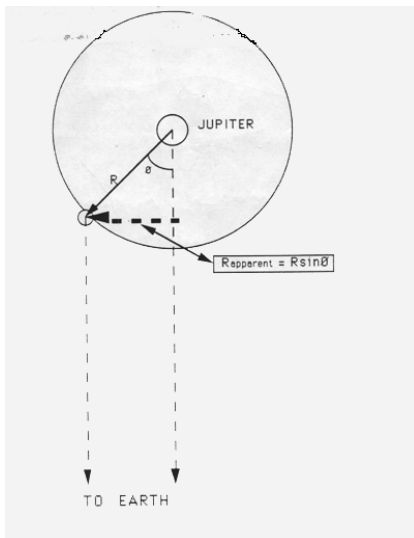


Figura 2. Vista desde arriba del plano de la órbita

$R_{\text{apparent}} = R \text{ sen } \theta$  muestra la distancia aparente entre la luna y Júpiter que se vería desde la Tierra.



Figura 1. Júpiter y sus lunas a través de un pequeño telescopio.

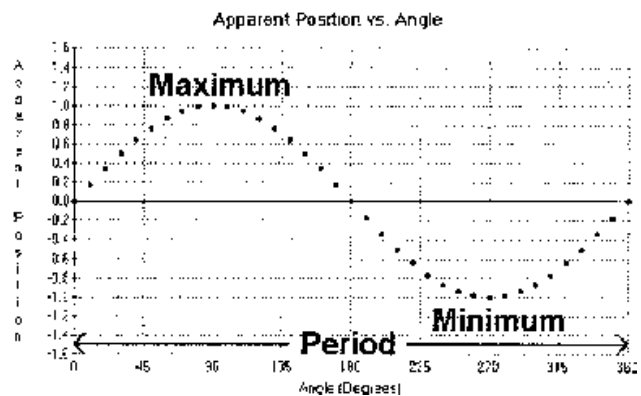


Figura 3. Grafica de la posición aparente de la luna

Las lunas parecen estar alineadas, porque estamos viendo el borde de la órbita en el plano orbital de las mismas. Si miramos, como hizo Galileo, durante una sucesión de noches claras, veríamos las lunas avanzar hacia adelante y hacia atrás, más o menos a lo largo de una línea recta. Aunque, en realidad, las lunas se mueven en órbitas circulares alrededor de Júpiter, sólo puede verse la distancia perpendicular de la luna a la línea de visión entre la Tierra y Júpiter. Si pudieras ver Júpiter desde "arriba" (véase la figura 2), verías las lunas viajar en aparentes círculos.

Como puedes ver en la Figura 3, la distancia perpendicular de la luna  $R_{\text{apparent}}$  debe ser una curva sinusoidal si la dibujas frente al tiempo. Mediante la adquisición de suficientes medidas de la posición de una luna, se puede realizar un ajuste de los datos experimentales a una curva sinusoidal y determinar el radio de la órbita (la amplitud de la curva sinusoidal) y el período de la órbita (el período de la curva sinusoidal). Una vez determinados el radio y el período de la órbita de la luna y expresados en las unidades apropiadas, se puede determinar la masa de Júpiter utilizando la Tercera Ley de Kepler.

La masa de Júpiter se determinará utilizando las mediciones de las posiciones de cada una de las cuatro lunas en un periodo de tiempo adecuado. Habrá errores de medición asociados con cada luna y, por tanto, la masa de Júpiter puede variar según qué datos se utilicen. Se dará como resultado un valor promedio con su error.

La aparente posición de la luna varía sinusoidalmente con el ángulo  $\theta$  a medida que orbita alrededor de Júpiter. En la figura 3,  $R_{\text{apparent}}$  se expresa en unidades del radio de la órbita de la luna y el ángulo se mide en grados.

Este programa simula el funcionamiento de un telescopio controlado automáticamente con una cámara CCD (charge-coupled device) que proporciona una imagen de vídeo a la pantalla de un ordenador. También permite mediciones adecuadas que se pueden hacer desde una consola de ordenador, así como el ajuste de la amplificación del telescopio. La simulación por ordenador es realista en todos los aspectos importantes, y su uso dará una buena comprensión de cómo los astrónomos recopilan datos y controlan sus telescopios. En lugar de utilizar un telescopio de observación y un largo periodo temporal de observación, la simulación por ordenador muestra las lunas tal como aparecerían si se mira a través de un telescopio durante el periodo de tiempo establecido.

Estrategia global

Este es el plan global de actuación para este ejercicio de laboratorio.

- Arranca el programa y utilizarlo para familiarizarte con el sistema de Júpiter.
- Establece períodos de sesiones de observación.
- Mide las posiciones de las lunas de Júpiter en las sucesivas noches claras.
- Traza un gráfico de las observaciones que has realizado de cada luna, con kaleidagraph (o similar).
- Ajusta, con este programa una curva seno a cada gráfico.
- Determina el período y el semieje mayor de la órbita de cada luna a partir de su correspondiente gráfico y, a continuación, convierte los valores obtenidos a las unidades adecuadas (años y UA, respectivamente).
- Calcula la masa de Júpiter a partir de las observaciones realizadas de cada luna, y luego determina el valor medio de la masa de Júpiter.

Antes de empezar

Ahora es un momento ideal para divertirse un poco con el programa mientras visualizas lo que vas a hacer y por qué. Arranca el "laboratorio Lunas de Júpiter", a continuación, selecciona *Log in* en el menú *File*. Escribe tu nombre (s) y número de mesa en el cuadro de diálogo que aparece y selecciona *Aceptar*. Ahora selecciona *File* → *Run*, Cuando aparezca la siguiente ventana, simplemente selecciona *Aceptar* para aceptar los valores predeterminados para la fecha y hora de inicio, se cambiarán después, una vez que hayas manejado el programa y las propuestas de resolución del sistema de Júpiter. Ahora, aparece la ventana mostrada abajo, mostrando Júpiter tal como aparecería en un telescopio. Júpiter aparece en el centro de la pantalla, mientras que pequeños puntos que representan las lunas se encuentran a ambos lados del planeta. A veces, una de ellas se esconde detrás de Júpiter y, a veces, aparece en la parte delantera del planeta y es difícil de ver. Puede mostrar la pantalla en cuatro niveles de ampliación haciendo clic en los botones 100X, 200X, 300X y 400X. La pantalla también muestra la fecha, la hora universal (el tiempo en Greenwich, Inglaterra), la fecha del calendario juliano (un contador de días utilizado por los astrónomos, el

decimal es una expresión del tiempo), y el intervalo entre las observaciones.



Para hacer algo que no puedes hacer con el verdadero cielo, selecciona *File* → *Features* → *Animation* y, a continuación, haga clic en el botón *Cont.* (Continua) en la pantalla principal. Mira las lunas moverse adelante y atrás conforme avanza el tiempo. Con esta animación, es bastante fácil de ver que lo que hacen las lunas realmente es un círculo en torno al planeta mientras que lo que nosotros vemos es el borde de esas órbitas. Para reforzarlo, para el movimiento seleccionando *Cont.* de nuevo, seleccionar *File* > *Features* > *Top view*, y empezar de nuevo el movimiento (*Cont.*). Tenga en cuenta que bajo el menú *Features*, también puede elegir *ID color* y evitar confundir las cuatro lunas.

Cuando hayas comprendido los movimientos de las lunas de Júpiter y por qué aparecen en la forma en que lo hacen, ya estás listo para iniciar el laboratorio. En cualquier momento, puedes seleccionar *Help* en la esquina superior derecha de la pantalla principal para ver las pantallas de ayuda en una amplia variedad de temas.

Apaga la función de animación antes de pasar a la siguiente sección.

### Procedimiento

Recogida de datos

Si ya has iniciado la sesión como se ha descrito anteriormente, detén el movimiento de las lunas (si aún no lo ha hecho) y selecciona *Run* otra vez. La fecha de inicio y la hora aparecerán en la ventana y pueden modificarse. Las cuatro lunas tienen periodos de rotación diferentes de modo que el intervalo de tiempo en cada paso puede ser adecuado para una luna pero no para otra. Así, para cada luna debe elegirse el intervalo de tiempo. Para ello, seleccionar *File* → *Timing* → *Observation Steps (Hrs)*.

Rellena una tabla como la siguiente en tu cuaderno de laboratorio.

Tabla	n°	_____
Año		_____
Mes		_____
Día		_____
Zona horaria		_____
Número de Observaciones		_____
Intervalo entre observaciones		_____

Para medir la posición de una luna, colocar el puntero sobre la luna y presionar el botón izquierdo del ratón. La esquina inferior derecha de la pantalla mostrará el nombre de la luna (por ejemplo, II. Europa), las coordenadas X e Y de su posición en píxeles en la pantalla, y su coordenada X en diámetros de Júpiter (DJ) al Este (E) o al Oeste (W) del centro del planeta. Este es el dato fundamental para nuestros propósitos. Tenga en cuenta que, si el nombre de la luna no aparece, es posible que no haya hecho clic exactamente sobre la luna, de modo que debe corregir la posición del ratón. Para medir con precisión la posición de cada luna, cambie a la mayor ampliación de que dispone que mantenga la luna dentro de la pantalla.

Pulsando *Next* se avanza el tiempo un intervalo dado por *Observation Step*. Obtener para cada luna los datos que sean necesarios para conseguir una rotación completa.

Columna 1: Fecha

Columna 2: Tiempo Universal (UT)

Columna 3: Día - conteo de días (por ejemplo, 1.0, 1.5, 2.0, ...), Incluyendo los días nublados.

Columnas 4-7: Registro de la posición de cada luna bajo la columna de esa luna. Asegúrese de anotar la distancia y dirección, por ejemplo, 2.75 W.

Análisis de Datos

Ahora debe analizar los datos. Representando la posición frente al tiempo, usarás los datos para obtener una gráfica similar a la de abajo. (Los datos mostrados son para una luna imaginaria llamada CLEA, y no una de las lunas en el ejercicio de laboratorio.)

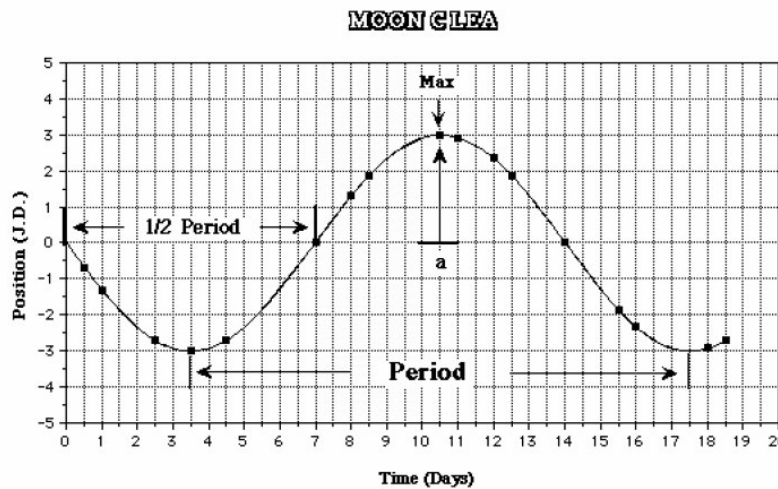


Gráfico de ejemplo para la luna CLEA:  
 $p=14$  días = 0.0383 años  
 $a=3$  D.J. = 0.0286 UA

Sabemos lo siguiente: (1) las órbitas de las lunas son regulares, es decir, la velocidad no cambia de un periodo, y (2) el radio de la órbita de cada luna no cambia de un período al siguiente. La curva sinusoidal, por lo tanto, también debe ser regular. Debe pasar por todos los puntos, y no tener una altura máxima, ni una distancia pico- pico variable.

Tomando como ejemplo la luna imaginaria CLEA, podemos determinar el radio y el período de la órbita. El tiempo entre dos máximos es el período. El tiempo entre los puntos de corte contiguos en el eje X es igual a la mitad del período, porque éste es el tiempo que tarda en llegar desde la parte frontal de Júpiter a la parte de atrás de Júpiter, o el que tarda en recorrer la mitad de la órbita. Para algunas lunas, no puedes obtener los datos de sus posiciones durante un período completo. Pero puedes encontrar el tiempo entre dos cortes consecutivos con el eje X y determinar el período, aunque la luna no haya recorrido una órbita completa.

El radio de una órbita es igual a la máxima posición hacia el

Este o hacia el Oeste, es decir, la distancia aparente más grande del planeta. Recuerda que las órbitas de la luna son casi circulares, pero como vemos solo el borde de las órbitas, solo podemos determinar el radio cuando la luna está en su máxima posición hacia el Este o hacia el Oeste.

Cuando hayas completado el número de sesiones de observación con éxito (por lo general 18, sin contar las noches nubladas), ya estás listo para analizar los datos.

#### Ajuste de los datos a curvas sinusoidales.

Cuando se han obtenido los cuatro gráficos y grabado todos los datos pertinentes puede cerrar el programa y comenzar a responder las preguntas en la página siguiente de la guía.

#### Masa de Júpiter

Ahora tienes toda la información que necesitas para utilizar la Tercera Ley de Kepler para encontrar la masa de Júpiter. Pero ten en cuenta que los valores obtenidos a partir de los gráficos tienen unidades de días para el periodo, y JD para el radio de la órbita. Para poder utilizar la Tercera Ley de Kepler, es necesario convertir el periodo en años y el radio de la órbita en UA dividiendo por el número de DJ que hay en una UA (1050). Calcula la masa de Júpiter a partir de datos de cada una de las cuatro lunas. Si uno de los valores difiere significativamente de los otros tres, busca una fuente de error. Dar la masa de Júpiter con su error.

#### Cuestiones y discusión

1. Expresa la masa de Júpiter en unidades de la masa de la Tierra.
2. Hay lunas más allá de la órbita de Calisto. ¿Tendrán mayor o menor periodo que Calisto? ¿Por qué?
3. ¿Qué causa más error en la determinación de la masa de Júpiter un error de 10% en el periodo o 10 % en el radio de la órbita? ¿Por qué?
4. La órbita de la luna de la Tierra tiene un periodo de 27.3 días y un radio de  $2.56 \times 10^{-3}$  AU ( $3.84 \times 10^5$  km. ¿Cuál es la masa de la Tierra? ¿Cuáles son sus unidades?