

FLEXIONANDO MUSCULOS Y LUNAS

Ejercicio modificado del Manual de Actividades del JPL

Nivel Sugerido: Escuela Media

Descripción: ¿Qué fuerza es responsable por la tremenda actividad volcánica de la luna de Júpiter Io? ¿Cómo es que la ‘batalla’ gravitacional entre Júpiter y sus lunas produce calor dentro de las lunas, y cómo son los interiores de las lunas Io y Europa como resultado?

Objetivos: Los estudiantes calculan la diferencia en gravedad a través de Io, y luego modelan el calentamiento dinámico (un proceso llamado ‘flexionamiento por mareas’) comprimiendo repetidamente una pelota de goma. Los estudiantes después discuten la estructura interna de Io y Europa.

Vocabulario: volcán, tectónica de placas, gravedad, órbita, elipse, flexionamiento por mareas, fricción, esfericidad.

Materiales: Cada grupo necesitará dos pelotas de goma flexibles (ver Notas para el Maestro), tijeras o cortante, cronómetro o reloj, y dos termómetros.

Introducción:

La luna de Júpiter Io es el objeto volcánicamente más activo del sistema solar. En la Tierra, los volcanes se encuentran principalmente en los bordes colisionales de las placas de la corteza. Sin embargo, por lo que sabemos, Io no tiene placas tectónicas (placas en movimiento). ¿Cuál es la causa de la actividad volcánica en Io? La respuesta es gravedad. Gravedad es una fuerza de atracción entre todos los objetos del Universo. La ecuación para calcular la fuerza gravedad entre dos objetos es:

$$F = Gm_1 m_2 / R^2$$

En esta ecuación, F es la fuerza de gravedad, G es la constante gravitacional (6.67×10^{-8} cm³/g seg²), m_1 es la masa de un objeto (como una luna), m_2 es la masa de un segundo objeto (como otra luna o un planeta), y R es la distancia entre los dos objetos.

¡Son un montón de números! Sin embargo, para comparar la atracción gravitatoria entre dos lunas cuando están a diferentes distancias una de otra, podemos ignorar G, m_1 y m_2 , porque no cambian (¡las lunas no se vuelven más grandes o pequeñas!). Cuando hacemos ésto, vemos que la fuerza de gravedad entre dos objetos es simplemente proporcional (μ) a $1/R^2$. Dicho de otra forma, la gravedad es una fuerza que decae con la distancia al cuadrado. Cuando dos valores como la gravedad son proporcionales en alguna forma, si un número cambia, entonces el otro cambiará en un factor conocido. Si duplicamos la distancia entre dos objetos (2R), la fuerza gravitatoria cambia en un factor $1/(2)^2$, o 1/4, i.e., cuando los objetos están dos veces más lejanos, la atracción entre ellos se reduce a 1/4. Si reducimos la distancia a la mitad (1/2R), la fuerza gravitatoria cambia en un factor de $1/(1/2)^2$, o 4.

Ahora que sabes cómo trabaja la gravedad, examinemos de cerca a Io. Primero, Io ocupa una órbita muy cercana al planeta más grande del sistema solar, Júpiter. Como está tan cerca, la atracción de Júpiter es significativamente mayor del lado de Io que enfrenta a Júpiter que del lado opuesto. Esta diferencia en la gravedad entre un lado de una luna y el otro se llama gradiente gravitatorio. Un ejemplo de gradiente gravitatorio que te será familiar son las mareas oceánicas en la Tierra. La formación de una marea alta es causada por la atracción gravitatoria del agua en el lado de la Tierra que enfrenta a la Luna. La marea alta en el lado opuesto de la Tierra se debe a que ese lado

es atraído por la Luna más débilmente la parte central de la Tierra. En los planetas o satélites sin océanos actúan las mismas fuerzas, pero causan deformación en el cuerpo sólido.

Segundo, la órbita de Io alrededor de Júpiter es una elipse, lo que significa que la distancia a Júpiter cambia durante una órbita. Cuando Io está cercano a Júpiter, la gravedad del planeta trata de atraer y darle a Io la forma de un huevo. Cuando está más alejado de Júpiter, Io se relaja a una forma más esférica. Finalmente, Júpiter tiene otras grandes lunas que ejercen su influencia gravitatoria en Io, estirándolo todavía en otras direcciones. ¡Esto es como un juego de 'tirar a la sogá' gigante, con Io metido en el medio!

El ascenso y descenso de la superficie de Io es causado por la misma fuerza (gravedad) que hace que suban y bajen las mareas en los océanos de la Tierra, y por eso lo llamamos 'flexionamiento por mareas'. El flexionamiento de la roca sólida dentro de una luna produce mucha fricción y calor. De hecho, suficiente calor como para fundir la roca en magma y producir volcanes activos en Io. El flexionamiento por mareas también afecta a Europa, la siguiente luna a partir de Io, aunque la cantidad de energía producida es mucho menor porque su distancia a Júpiter es mayor (la menor atracción gravitatoria produce menos flexionamiento). Aún así, puede producirse suficiente calor en Europa como para derretir parcialmente el hielo en profundidad, ¡lo que pudo haber creado un océano subterráneo! (ver "El Rompecabezas de la Geología de Europa").

Actividad 1: El Gradiente Gravitatorio de Io

Sabiendo cómo se relaciona la gravedad con la distancia entre dos puntos, podemos calcular el gradiente gravitatorio relativo a través de Io comparando la atracción gravitatoria de Júpiter en el centro de Io con la atracción en los lados cercanos y lejanos del satélite. Querrás dibujar un diagrama que muestre las distancias involucradas:

Radio de Júpiter= 71.000 km

Distancia media de la superficie de Júpiter al centro de Io= 421.600 km

Radio de Io= 1.815 km

Fuerza gravitatoria de Júpiter en el centro de Io

Distancia del centro de Júpiter al centro de Io= 492.600 km

$R = 492.600 \text{ km} / 492.600 \text{ km} = 1$

$F \propto 1/R^2$

$F \propto 1/(1)^2$

$F \propto 1$, or 100% de la fuerza de atracción de Júpiter

Ahora calculemos la fuerza de la gravedad de Júpiter en el lado de Io que enfrenta al planeta. El radio de Io es 1.815 km, así que tenemos que restar este valor de la distancia entre Júpiter e Io. Aunque no hemos acercado Io a Júpiter, este cambio en el valor de R nos permitirá calcular el cambio proporcional en F, o la fuerza de gravedad en el lado cercano de Io.

Fuerza gravitatoria de Júpiter en el lado cercano de Io

Distancia de Júpiter al lado cercano de Io= 492.600 km - 1.815 km = 490.785 km

Cambio en la distancia= 490.785 km / 492.600 km = 0.996

$F \propto 1/R^2$

$F \propto 1/(0.996)^2$

$F \propto 1.008$, o 100.8% de la atracción gravitatoria de Júpiter en el centro de Io

Preguntas:

1. Calcula la fuerza gravitatoria relativa (%) de Júpiter en el lado de Io opuesto al planeta .
2. ¿Cuál es la diferencia (en %) en la atracción gravitatoria de Júpiter entre los lados cercano y lejano de Io?

Los valores que obtengas pueden no parecerse muy impresionantes, pero recuerda que la masa de Júpiter es mucho mayor que la de Io. En cuestión de atraer y estirar, aún un pequeño gradiente gravitacional resulta ser muy significativo. Recuerda también que no hemos considerado los efectos de la excéntrica órbita de Io, o la influencia de las otras lunas de Júpiter. ¡El flexionamiento de mareas en las lunas Jovianas es un fenómeno complejo que recién comenzamos a entender!

Actividad 2: ¡Grandes Bolas de Fuego!

¿Qué sucede cuando la gravedad produce flexionamiento en las rocas? ¿De dónde viene el calor en realidad? En esta actividad vamos a modelar los efectos del flexionamiento por mareas en un cuerpo sólido.

Procedimiento

Toma dos pelotas de goma (u otras pelotas flexibles) y corta un orificio en cada una, sólo lo suficientemente grande como para insertar un termómetro. Mide la temperatura inicial/en reposo de una de las pelotas. Registra esta temperatura en la tabla. Haz que alguien sostenga la primer pelota pero sin exprimirla. Al mismo tiempo, haz que otra persona simule el flexinamiento gravitacional en Io comprimiendo y relajando alternativamente la segunda pelota por unos 5 minutos (¡o hasta que se canse!). Tan pronto como finalicen, inserta un termómetro en cada pelota, la que fue exprimida y la que no, y registra estas temperaturas en la tabla de datos.

Registra las temperaturas inicial y final, y luego calcula y registra el cambio de temperatura.

Finalmente, anota el tiempo total de flexionamiento (que debería ser 5 minutos a menos que se hayan detenido antes).

Temperatura inicial	
Temperatura final de la pelota que NO fue exprimida	
Temperatura final de la pelota que fue exprimida	
Cambio de temperatura de la pelota NO exprimida	
Cambio de temperatura de la pelota exprimida	
Diferencia de temperatura entre ambas pelotas	
Tiempo total de flexionamiento	

Preguntas de Repaso:

1. ¿Por qué mediste la temperatura de una pelota que fue sostenida pero no exprimida?
2. ¿Qué tan rápido se calentó la pelota exprimida? (cálculalo en grados por minuto)
3. ¿Hasta qué punto puedes calentar las pelotas sosteniéndolas o exprimiéndolas?
4. ¿Cada cuánto es 'flexionada' la luna de Júpiter Io?
5. ¿Cuáles son otras formas de calentar a un planeta o una luna?
6. ¿Cómo podrían los científicos obtener una medición directa del calentamiento por flexionamiento por mareas en Io o Europa?

Notas para el Maestro

Respuestas a las preguntas sobre gravedad:

1. Fuerza gravitatoria de Júpiter en el lado lejano de Io

- Distancia entre Júpiter y el lado lejano de Io = $492.600 \text{ km} - 1.815 \text{ km} = 494.415 \text{ km}$
- Cambio en la distancia = $494.415 \text{ km} / 492.600 \text{ km} = 1.004$
- $F \propto 1/R^2$
- $F \propto 1/(1.004)^2$
- $F \propto 0.992$, o 99.2% de la atracción gravitatoria de Júpiter en el centro de Io

2. La diferencia en la atracción gravitatoria de Júpiter entre los lados lejano y cercano de Io es de un 1.6%.

¡Grandes Bolas de Fuego!

Selección de las pelotas. Las mejores pelotas de goma para esta actividad están hechas de una espuma espesa, completamente sólida, pero 'exprimible'. Necesitará pre-evaluar las pelotas que elija para ver si pueden ser calentadas en cantidades medibles.

Respuestas a las Preguntas de Repaso:

1. Medir la temperatura de la pelota que fue sostenida pero no exprimida sirve de 'control'. Calor de tu mano puede contribuir al calentamiento de la pelota.
2. La tasa de calentamiento puede variar. Resultados típicos para pelotas de espuma sólida son de 0.5°C (1°F) por minuto.
3. Se podría calentar la pelota que se sostiene (pero no se exprime) a la temperatura corporal, 37°C (98.6°F). En teoría podrías calentar la pelota exprimiéndola hasta que se funda y fluya de su mano. Por supuesto, para ello tendrías que exprimir la pelota MUY rápido y por MUCHO tiempo, ¡y tu mano se quemaría en el proceso!
4. Una vez por cada órbita alrededor de Júpiter, que son aproximadamente 1.77 días terrestres.
5. Energía solar; impactos de meteoritos; decaimiento radiactivo del interior.
6. Los científicos deberían medir precisamente el diámetro de cada luna a lo largo de una órbita completa para ver los cambios. Un rayo láser que rebota en la superficie (similar al eco que usan los murciélagos, excepto usando un láser en lugar de ondas de sonido) podría medir con precisión los cambios en la superficie de la luna.

Demostración Física Usando Estudiantes

Otra forma de mostrar los efectos del flexionamiento por mareas es seleccionar pequeños grupos de estudiantes para que representen las dinámicas estructuras internas de Io y Europa. Querrá que sus "lunas de estudiantes" orbiten un punto central (Júpiter) y respondan a la tremenda gravedad en diferentes posiciones y distancias.

Grupo Io

Núcleo de Io: super-caliente y activo

Interior fundido de Io: varios estudiantes parados alrededor del núcleo, mirando hacia afuera, los brazos sujetos pero relativamente móviles.

Volcanes de azufre: respondiendo a los escapes de azufre fundido que emanan.

¡El flexionamiento por mareas es tan dramático que el interior fundido constantemente crea nueva actividad volcánica!

Grupo Europa

Núcleo de Europa: dinámico, caliente, bajo presión.

Manto rocoso de Europa: varios estudiantes parados alrededor del núcleo, mirando hacia afuera, los brazos entrelazados relativamente inmóviles.

Hielo profundo/Océano de Europa: primero como hielo, en forma similar al manto rocoso, brazos entrelazados relativamente sueltos.

Hielo superficial de Europa: varios estudiantes con las manos hacia afuera, fríos, mostrando una superficie helada.

El flexionamiento de mareas comprime y descomprime al grupo entero. Mientras la estructura (hielo superficial o profundo y roca) sea sólida, el flexionamiento es un efecto relativamente pequeño. Si suficiente calor emana a través de la roca para sostener derretimiento del hielo profundo, creando un océano, entonces el océano se moverá en el interior causando una distorsión más pronunciada de la forma de Europa .