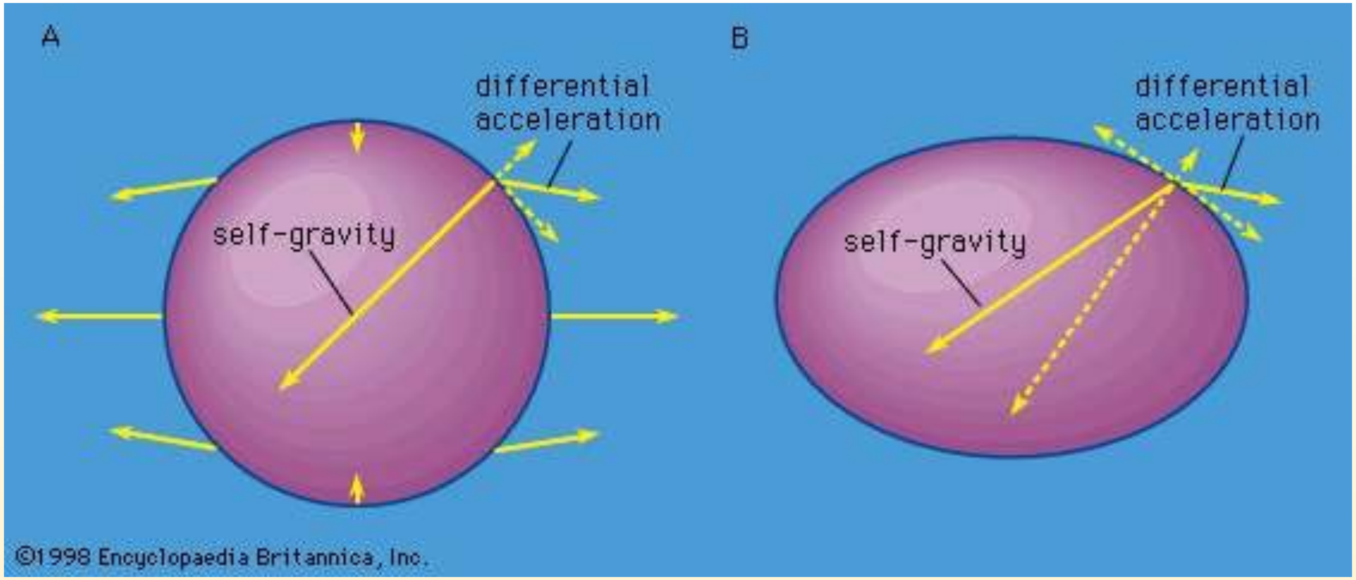
20 - ¿Qué son las mareas?

Definición General:

Una marea es una distorsión en la forma de un cuerpo inducida por la atracción gravitacional de otro objeto cercano.



Específicamente en la Tierra, el término marea también se usa para describir el aumento y la caída del nivel del mar causados principalmente por los efectos combinados de las fuerzas gravitacionales ejercidas por la Luna y el Sol.

Esto es un poco engañoso ya que centrarse en el nivel del mar está ignorando el hecho de que las mareas también afectan la corteza terrestre sólida. Además, el aumento y la caída observables del nivel del mar están fuertemente influenciados por la topografía de la costa, las corrientes oceánicas y la distribución de los continentes en la Tierra.

Por ahora investigaremos las mareas según la definición e ignoraremos los efectos de la topografía y las corrientes oceánicas que conducen a ciclos de mareas más complejos en la Tierra.

Atracción gravitacional de la Luna

La base teórica para el cálculo de los efectos de las mareas causados por la Luna y el Sol es la misma.

Para simplificar, primero examinaremos el efecto de la Luna.

Ignoraremos la rotación de la Tierra en nuestros modelos, ya que la rotación de la Tierra no tiene influencia sobre la existencia de las bultos de las mareas.

$$\boxed{\vec{F}_1 = G \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{\left|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\right|^3} = -\vec{F}_2} \qquad (1)$$

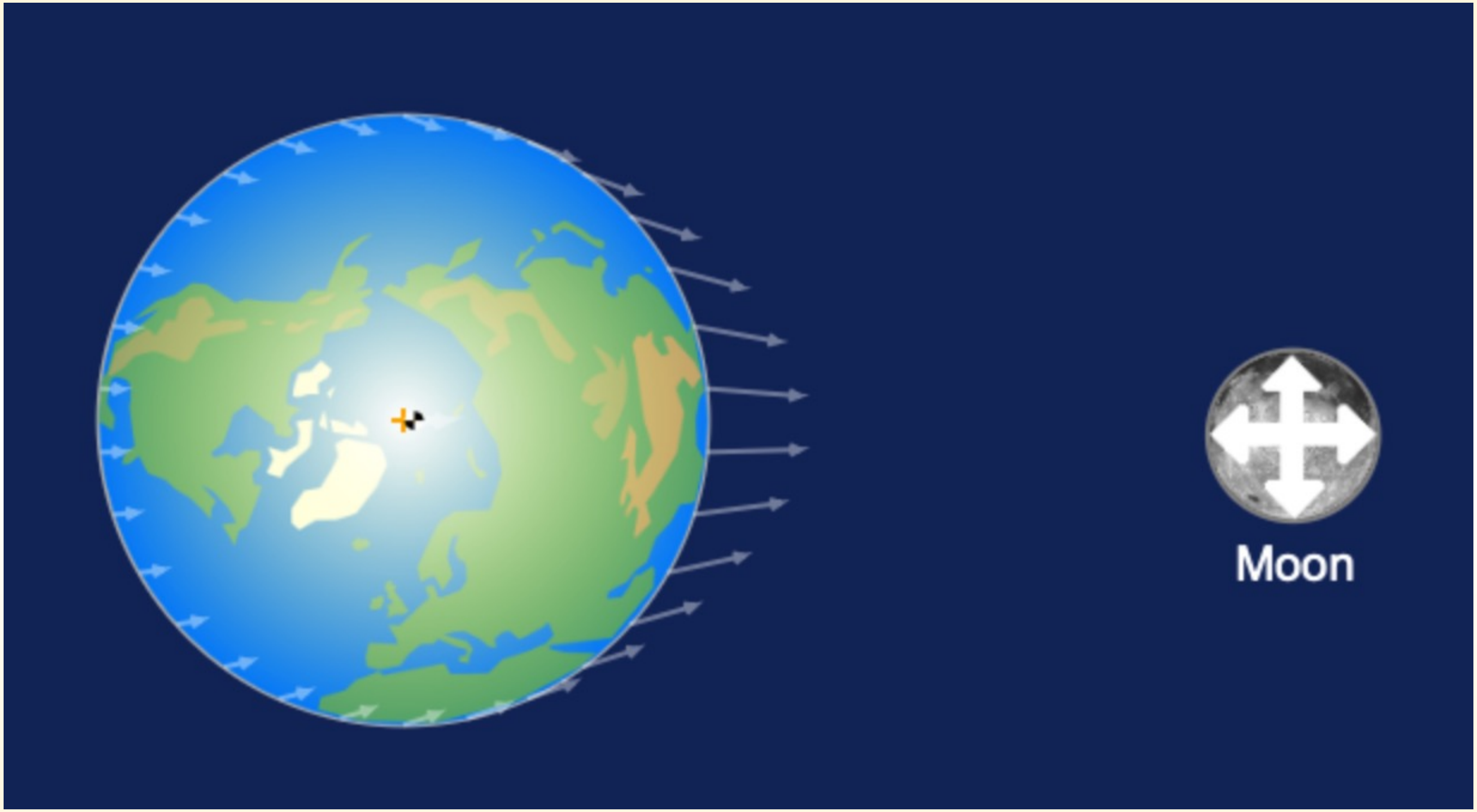
Ley de gravitación universal de Newton

Al principio, veremos exclusivamente la aceleración causada por la gravedad de la Luna en los objetos que se encuentran en la superficie de la Tierra. Por el momento, también asumimos que tanto la Tierra como la Luna están atrapadas en el espacio y no orbitan entre sí. Al sustituir la fuerza en la Ecuación 1 con la segunda ley de movimiento de Newton

$$\boxed{\vec{F} = \vec{a} \cdot m} \tag{2}$$

Podemos reorganizar rápidamente esta ecuación para calcular la aceleración de un cuerpo que yace en la superficie de la Tierra debido a la atracción gravitacional de la Luna:

$$\boxed{\vec{a}\left(\vec{r}\right) = G \cdot m_{Luna} \cdot \frac{\vec{r}_{Luna} - \vec{r}}{\left|\vec{r}_{Luna} - \vec{r}\right|^{3}}} \qquad (3)$$


Moon

- La aceleración es mayor en el lado de la Tierra frente a la Luna.
- Este efecto es menor si la Luna está más lejos.
- Los vectores de aceleración apuntan al centro de masa de la Luna.
- Si la Luna está muy lejos, los vectores de aceleración son casi paralelos

Consecuencias del movimiento orbital

La Tierra necesita 24 horas para completar una rotación alrededor de su eje.

La Luna tarda 27.32 días en completar una sola órbita alrededor de la Tierra.

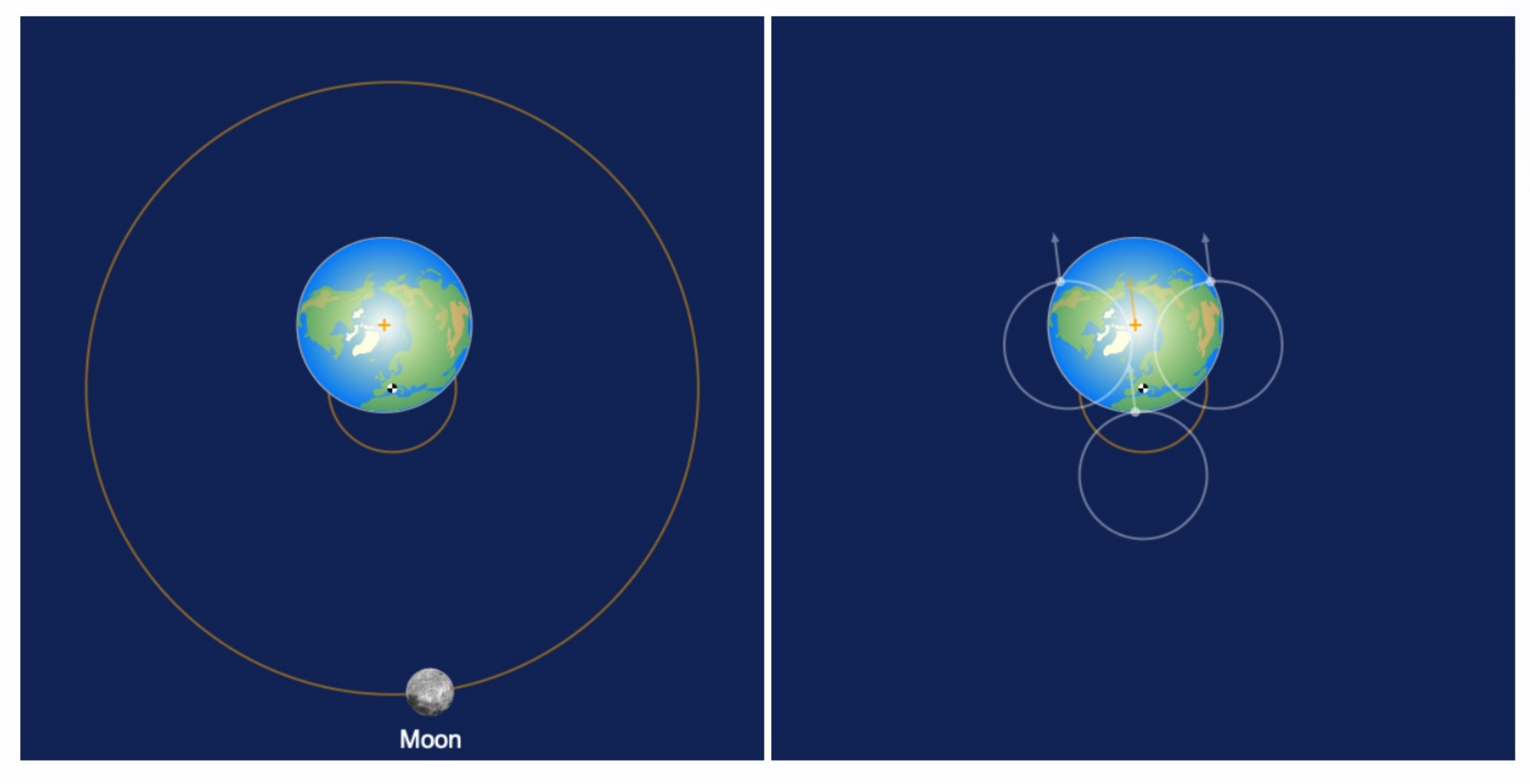
En un solo día, la Luna recorre una distancia angular de:

$$\boxed{360^{o} / 27.32d = 13.18^{o}} \qquad (4)$$

En consecuencia, un lugar en la Tierra tendrá la misma posición con respecto a la Luna después de 24 horas y 52 minutos. Observar el tiempo entre dos eventos de marea alta o baja en la mayoría de los sitios oceánicos en la Tierra produce 12 horas y 25 minutos. Eso es casi exactamente la mitad del número anterior.

La conclusión lógica es que debe haber dos bultos de marea en lados opuestos del planeta. Nuestro modelo actual no tiene en cuenta eso porque hemos ignorado que la Tierra y la Luna están unidas gravitacionalmente entre sí.

No se quedan quietos en el espacio, sino que orbitan entre sí alrededor del centro de masa común.


Moon

Para esta investigación, hemos seleccionado un marco de referencia ubicado en el centro de masa del Sistema Tierra-Luna.

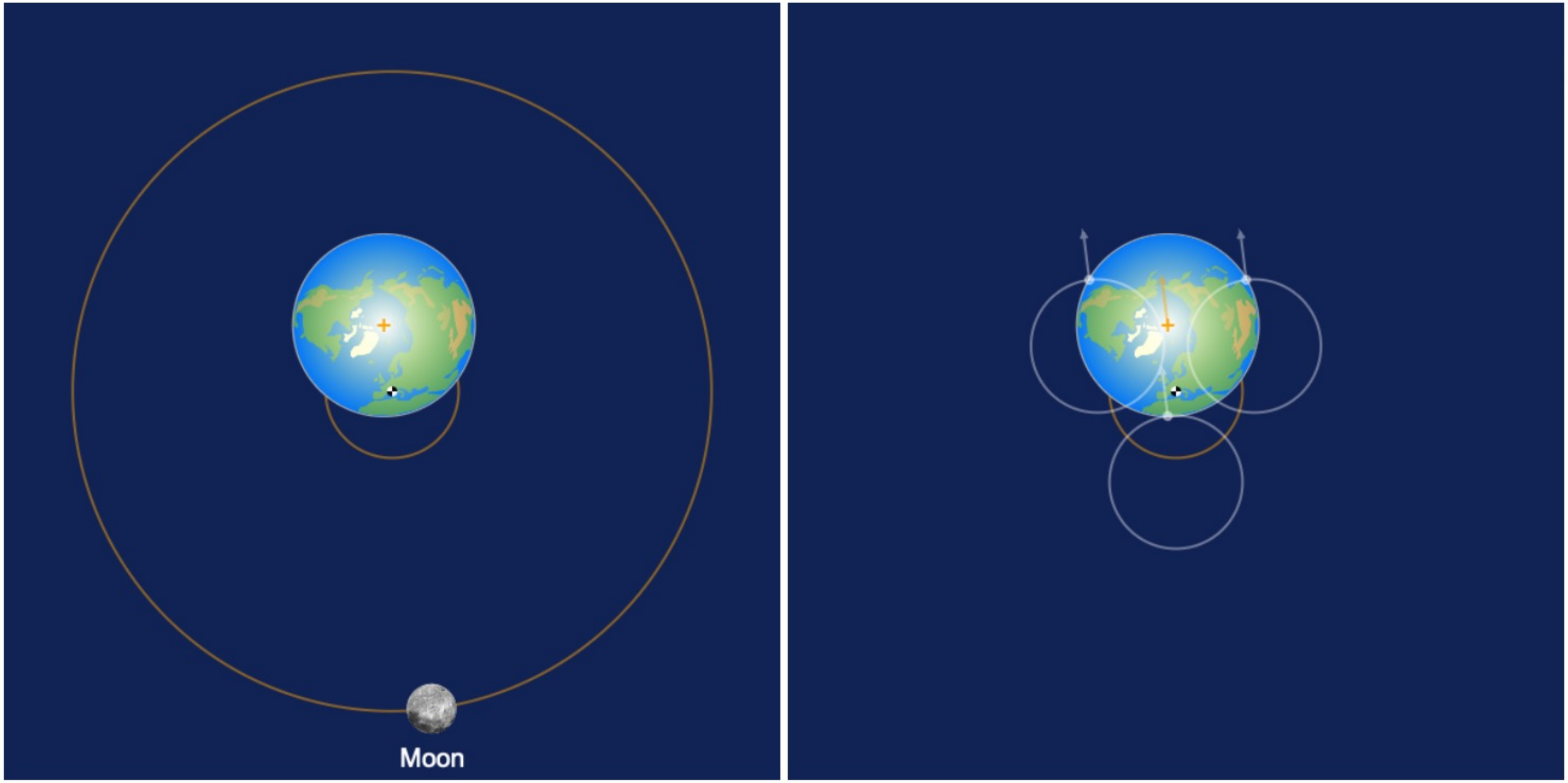
El sistema en sí no gira ni acelera y permanece fijo con respecto al resto del universo. (Por el momento ignoramos la órbita del Sol y la Tierra a su alrededor).

En física, dicho sistema se conoce como un marco de referencia inercial.

El centro de la Tierra describe una órbita de radio d casi circular alrededor del centro de masa común con la velocidad angular ω.

La distancia promedio de la Luna y la Tierra es de 385000 km. La distancia del centro de masa común desde el centro de la Tierra se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\boxed{r_{cm} = 385000km \cdot \frac{m_{Luna}}{m_{Tierra} + m_{Luna}} = 4678km} \qquad (5)$$


Moon

En nuestro marco de referencia, cada uno de los puntos en y dentro de nuestra tierra (no giratoria) está experimentando la **misma** aceleración centrífuga de

$$\boxed{a_{cf} = \omega^2 \cdot r_{cm}} \qquad (6)$$

causado por el movimiento de la Tierra alrededor del centro de masa común del sistema Tierra-Luna.

Calculemos brevemente la aceleración centrífuga en función de la duración del mes lunar (27.32 días), obtenemos una velocidad angular de:

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{27.32 \cdot 86400 s} = 2.662 \cdot 10^{-6}\frac{1}{s}} \qquad (7)$$

Lo que se tradujo en una aceleración centrífuga de:

$$\boxed{a_{cf} = \left(2.662 \cdot 10^{-6}\frac{1}{s}\right)^2 \cdot 4678 \cdot 1000 m = 3.31 \cdot 10^{-5}\frac{m}{s^2}} \qquad (8)$$

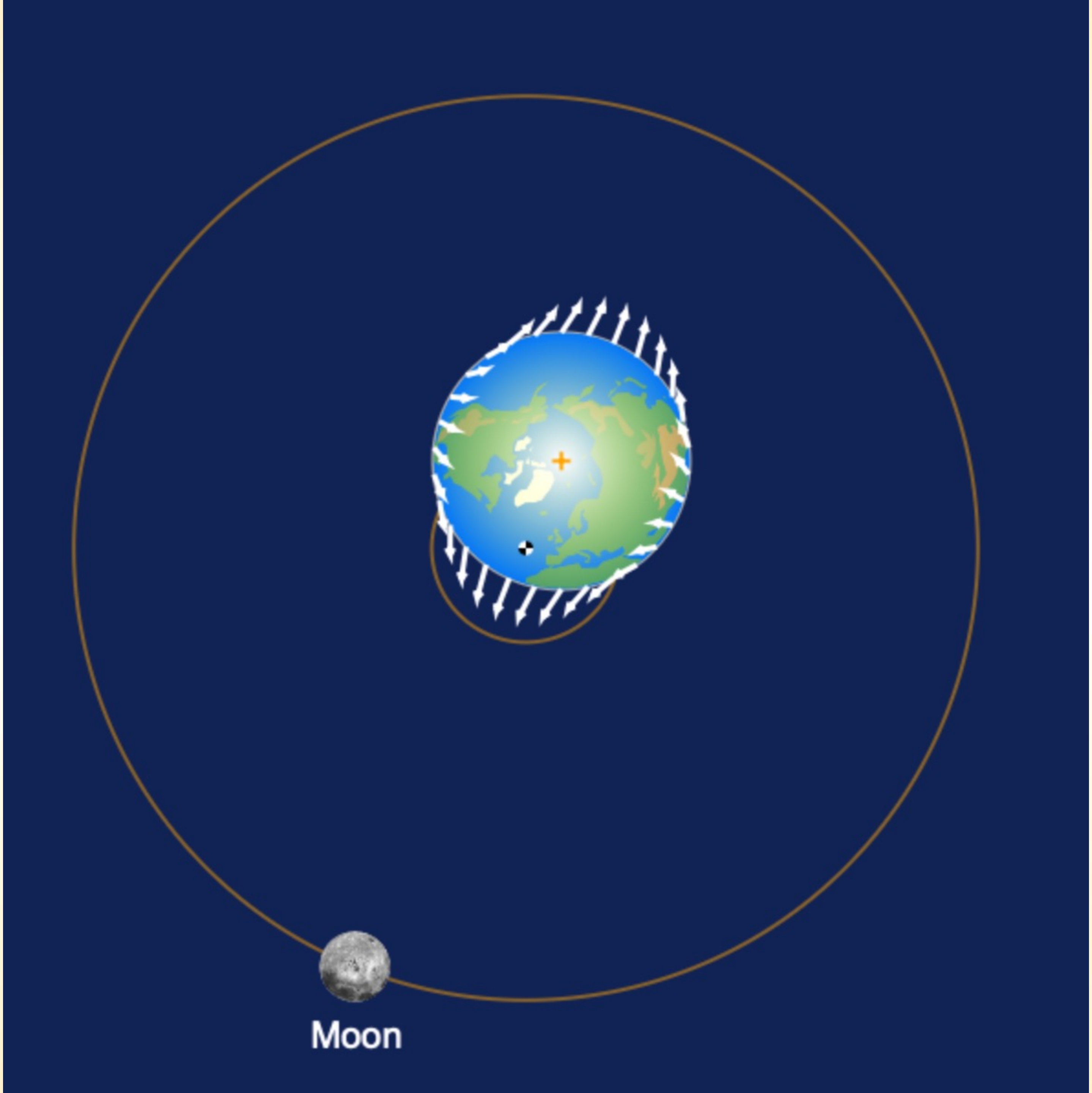
Al restar esta aceleración de la aceleración causada por la atracción gravitacional de la Luna, obtenemos la aceleración de las mareas.

Primero, veremos más de cerca el centro de la Tierra. La fuerza centrífuga calculada anteriormente es la misma en cualquier punto sobre y dentro de la Tierra y siempre apunta en la misma dirección. Esto significa que también está actuando en el centro de la Tierra misma.

Si tenemos una fuerza centrífuga que actúa sobre el centro de masa de la Tierra, ¿por qué la Tierra no se aleja de la Luna? ¿Qué lo mantiene en su lugar? La gravedad de la Luna lo hace! Si calculamos la aceleración causada por la atracción gravitacional de la Luna que actúa en el centro de la Tierra, obtenemos:

$$\boxed{a_g = G \cdot \frac{m_{Luna}}{d^2} = 6.675 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg\ s^2} \cdot \frac{7.349 \cdot 10^{22}\, kg}{(385000 \cdot 1000 m)^2} = 3.31 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s^2}}$$

La fuerza centrífuga se mantiene en equilibrio por la fuerza gravitacional de la Luna, que actúa como la fuerza centrípeta. En lugar de calcular la aceleración centrífuga, es más conveniente calcular la fuerza gravitacional ejercida por la Luna hacia el centro de la Tierra y restar esta fuerza de los vectores de aceleración obtenidos por la ecuación 2 para obtener la aceleración de las mareas.

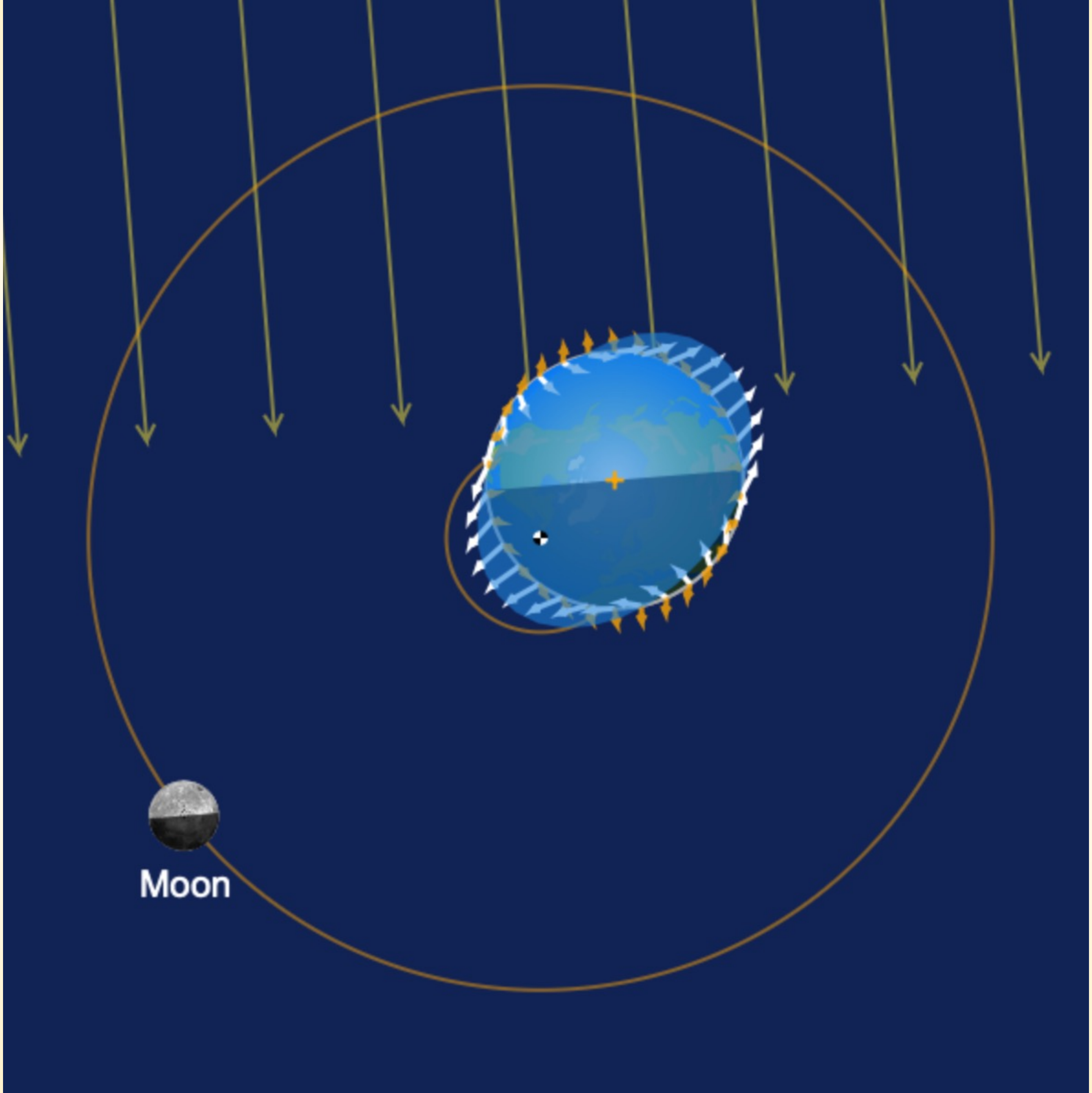

Moon

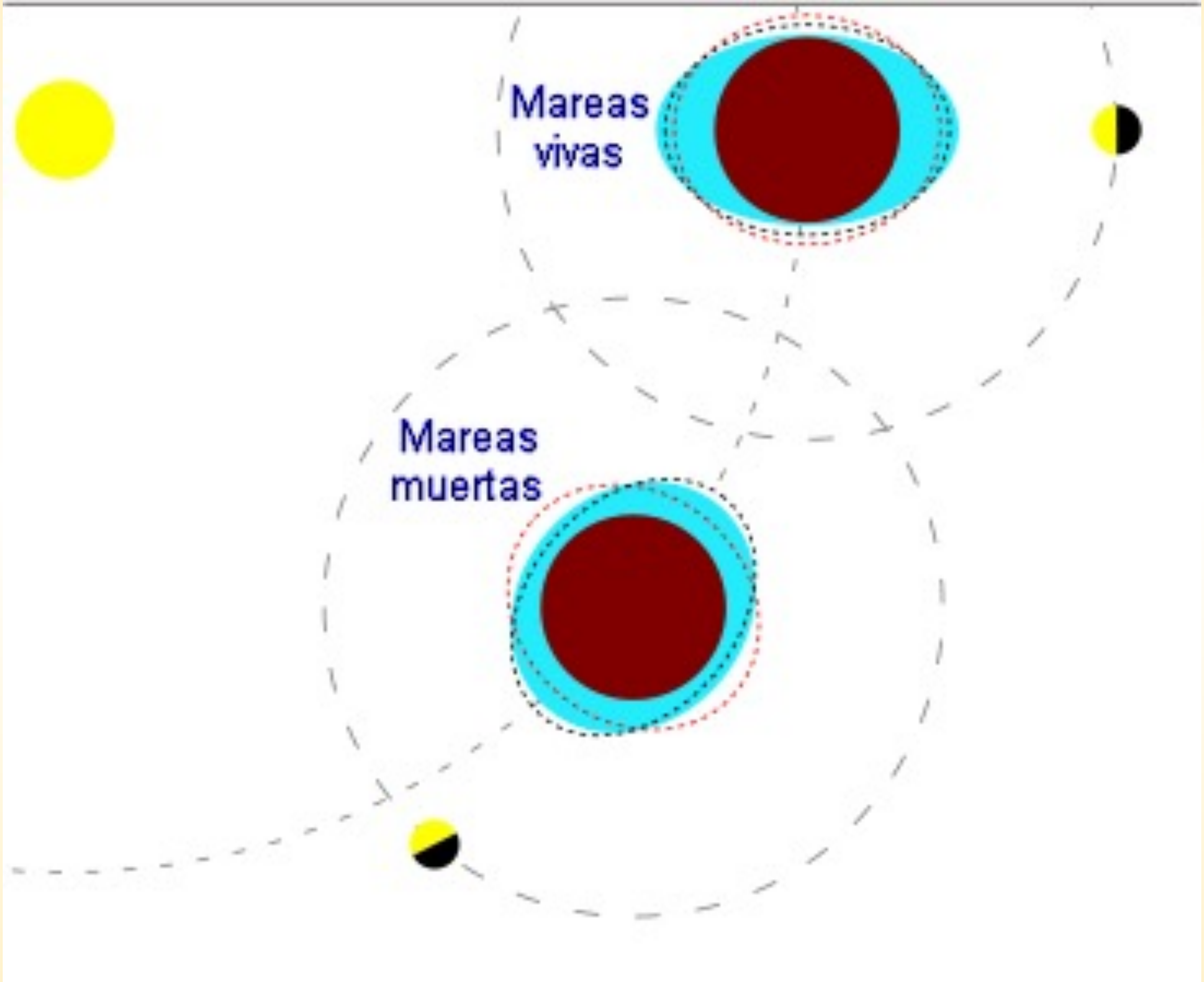
Los mismos principios explicados aquí también se aplican al efecto gravitacional del Sol en la Tierra.

El efecto de marea causado por el Sol es un poco más pequeño que el efecto causado por la Luna.

Si el Sol, la Luna y la Tierra están alineados a lo largo de una línea recta, la aceleración de las mareas es más fuerte ya que los efectos de la Luna y el Sol se suman (mareas vivas).

Si el Sol, la Tierra y la Luna están formando un triángulo de 90 grados, la fuerza de marea es más baja (mareas muertas).


Moon


Mareas vivas
Mareas muertas

Referencia:

La mayor parte del texto y las imágenes están tomadas de este sitio web:

https://beltoforion.de/article.php?a=tides_explained

El sitio web está en inglés pero traté de traducir la parte importante del texto. Vale la pena visitar el sitio web. La mayoría de las imágenes que uso aquí son de hecho animaciones, que no pude copiar.

Wikipedia:

https://es.wikipedia.org/wiki/Marea

https://es.wikipedia.org/wiki/Aceleración_de_marea

https://es.wikipedia.org/wiki/Acoplamiento_de_marea