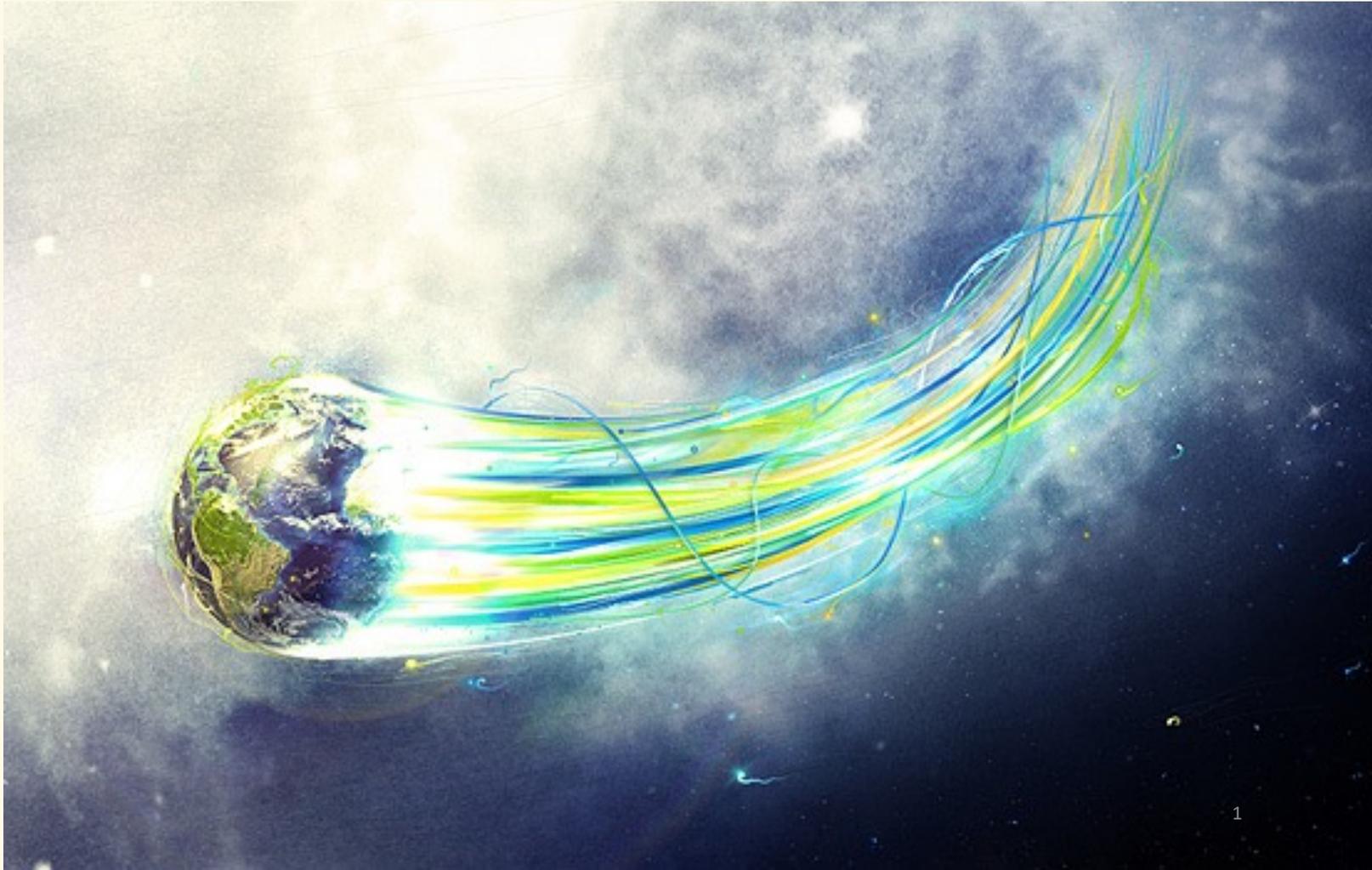


04 - Movimientos de la Tierra



¿Qué movimientos vemos?



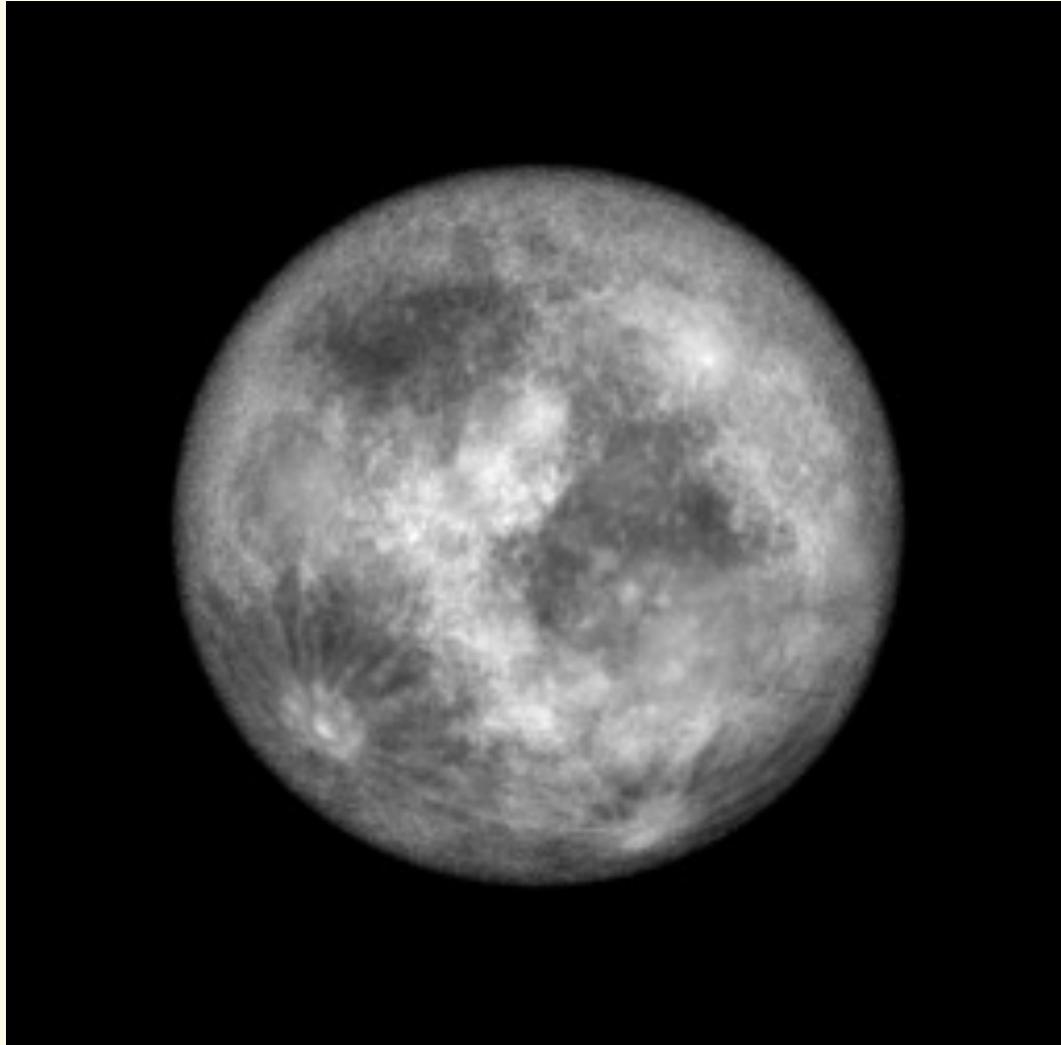
1) Vemos el Sol y la Luna despuntando y descendiendo cada día.



2) Vemos que estos movimientos cambian de día a día durante un año.



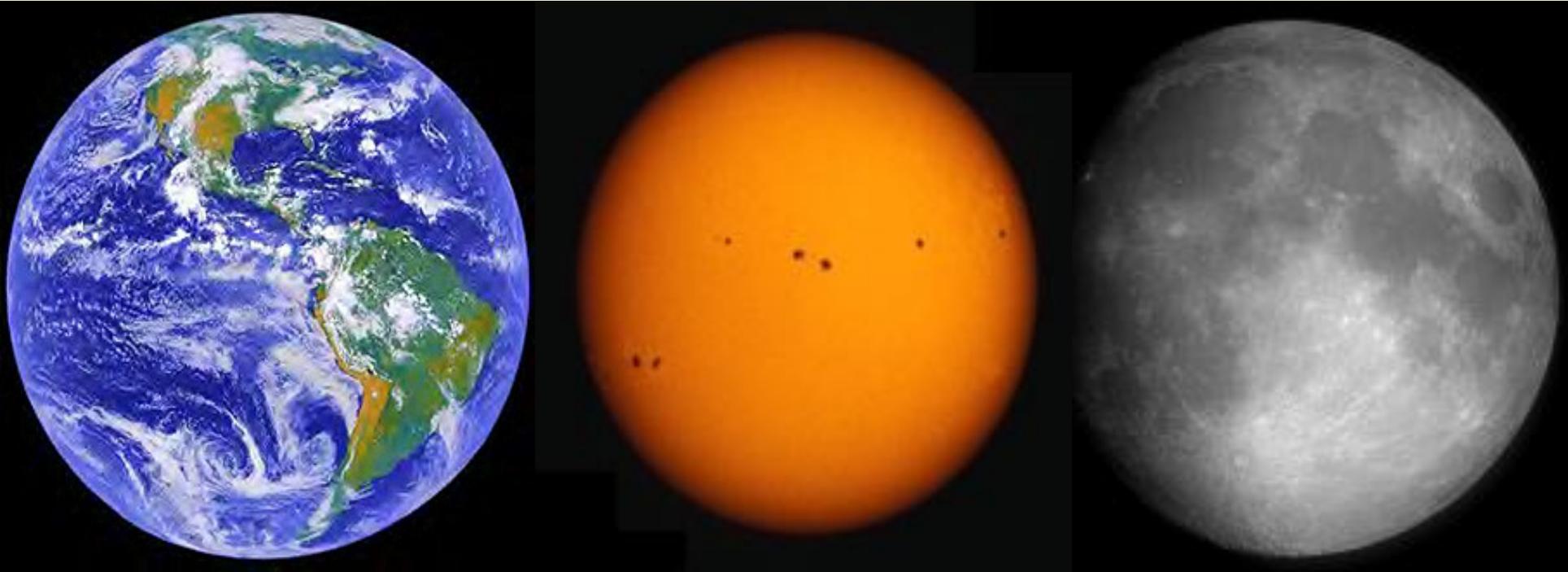
3) Vemos que la Luna cambia su forma durante un mes.



Utilizamos estos movimientos para medir el tiempo:

Día, Mes, Año

Hoy sabemos que es la Tierra, que se mueve y no el Sol.

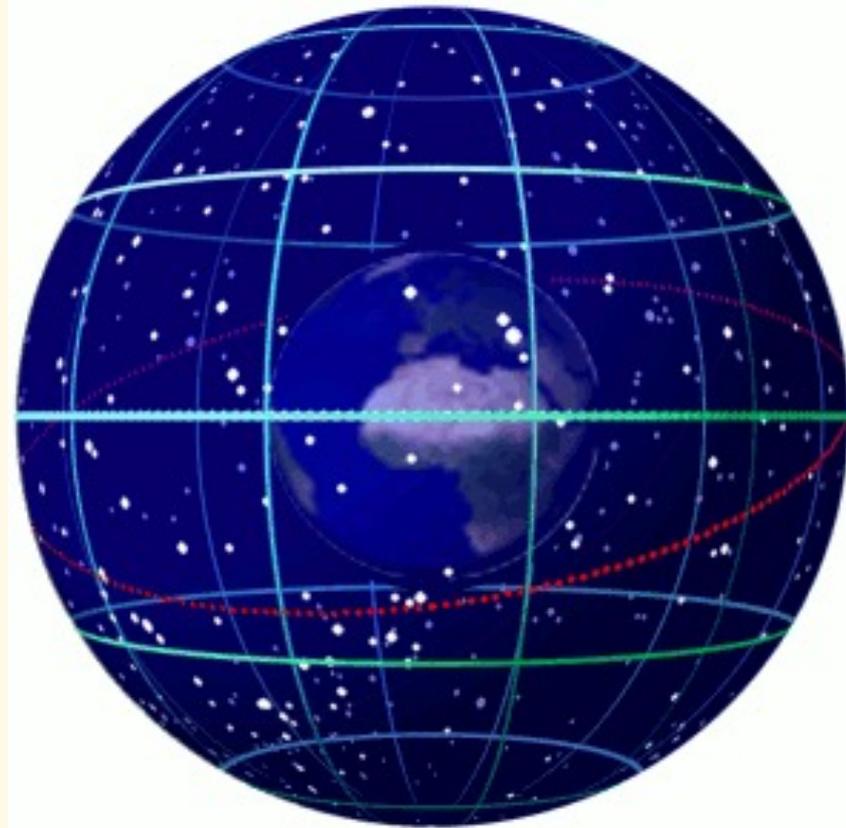


(1) Rotación de la Tierra

En realidad es la Tierra, que gira alrededor de su eje de polo a polo en sentido antihorario.

Una vuelta dura ~24 horas o un día.

El movimiento del Sol, la Luna y las estrellas es sólo un movimiento aparente.

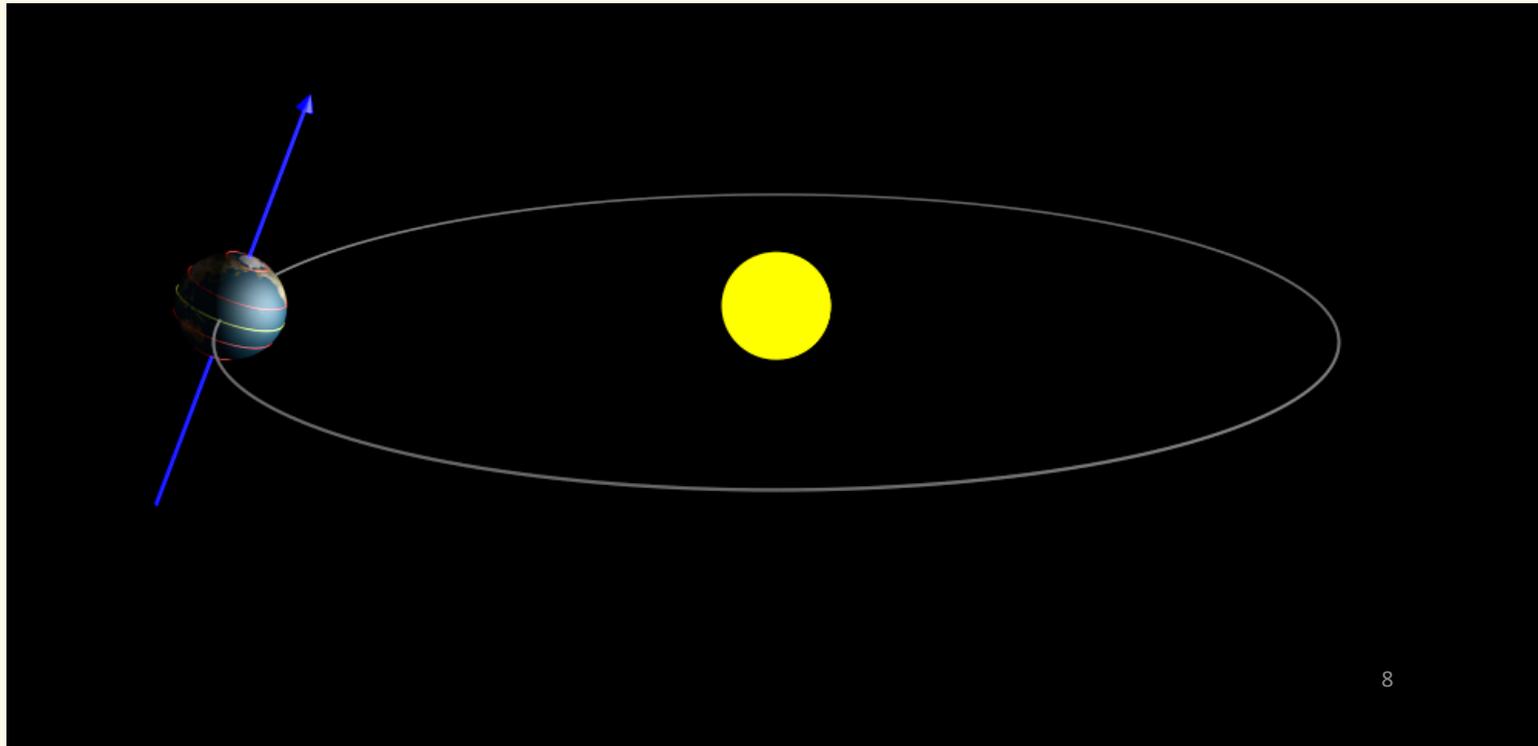


(2) Órbita alrededor del Sol

La Tierra orbita alrededor del Sol! -- Anti-horario

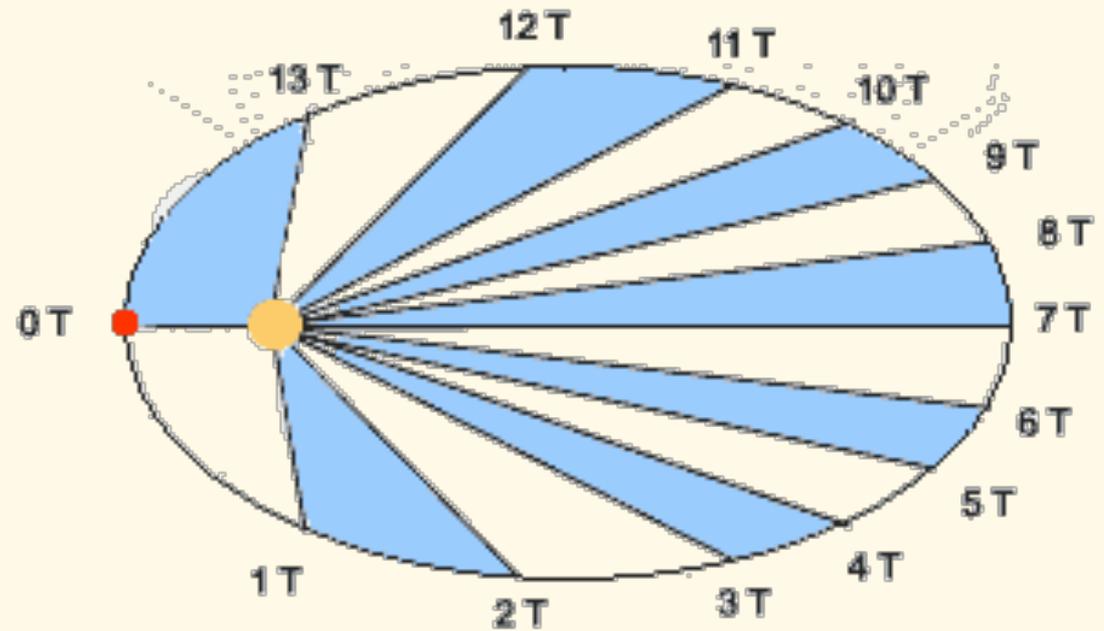
Una órbita dura alrededor de 365.25 días o ~1 año.

La órbita es exactamente situado en un plano – la **Eclíptica**.



La órbita de la Tierra alrededor del Sol no es un círculo, sino una elipse. (1. Ley de Kepler)

La Tierra orbita más rápido, cuando está más cerca del Sol (**Perihelio** = punto más cerca) y más lento más lejos (**Afelio** = punto más lejano). (2. Ley de Kepler)



T = any unit of time (hour, day, week, etc.) 9

Plano
de la
ecliptica

Rectangular a la
ecliptica

23.5°



Eje de la rotación

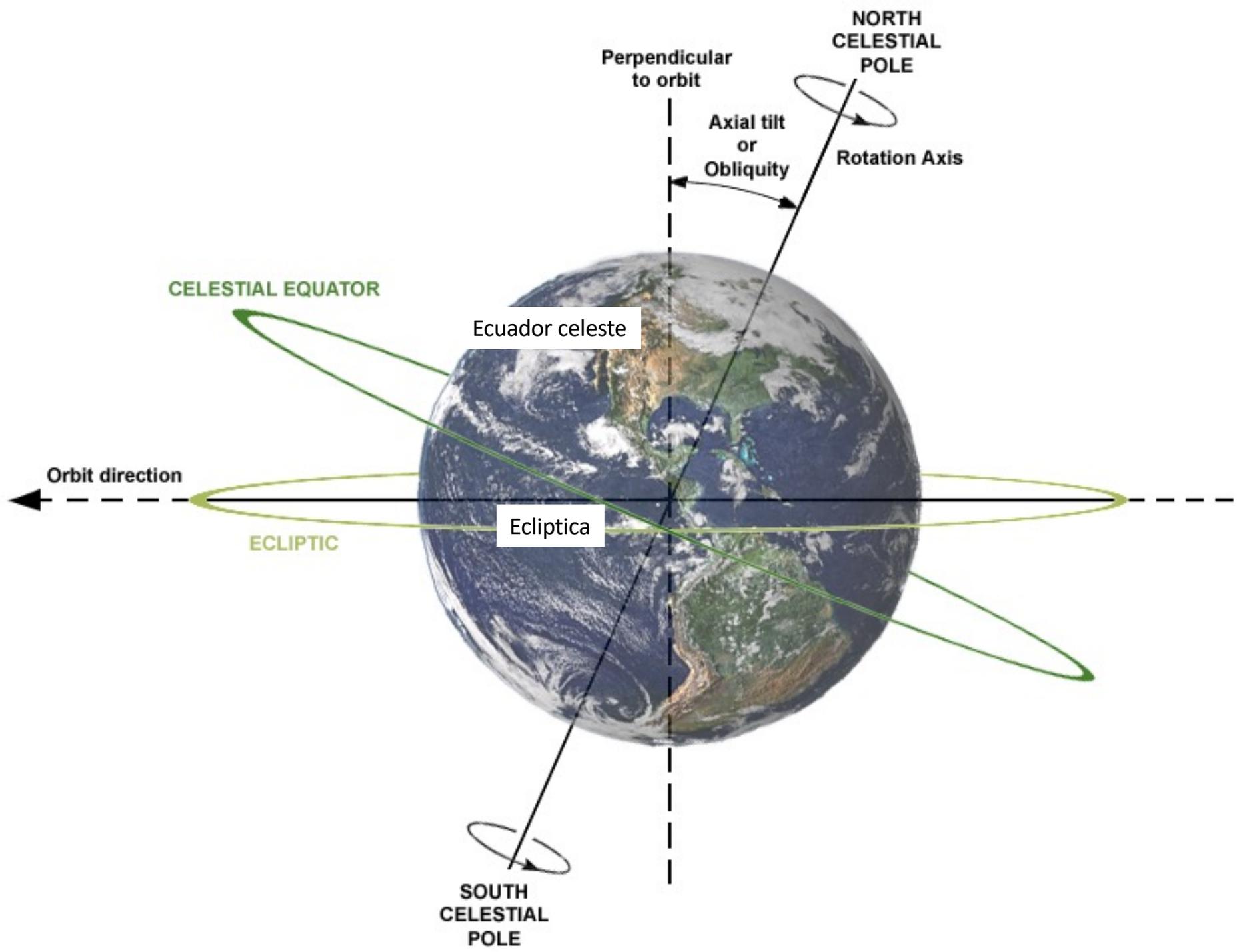
El eje de rotación de la Tierra está inclinado 23.5 grados con respecto a la Eclíptica (esta inclinación se llama **Oblicuidad**).

Oblicuidad de la Eclíptica

En Astronomía se denomina oblicuidad de la eclíptica (algunas veces llamada también simplemente **oblicuidad**) a la inclinación que presenta el eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de la eclíptica, y es la responsable de las estaciones del año.

La oblicuidad en 2011 fue de $23^{\circ}26' 16''$ (23.4377°).

En 1907 fue exactamente de $23^{\circ}27'$. Está disminuyendo actualmente a razón de $0.47''$ por año, debido al movimiento terrestre denominado **nutación**.



Los Movimientos Basicos de la Tierra

- 1. Rotacion:** gira alrededor de su eje de rotacion (N-S) una vez por dia.
 - Velocidad = $2\pi R(\text{Tierra})/1\text{día} = 1800 \text{ km/h}$
- 2. Revolucion:** cumple una orbita alrededor del Sol en un año.
 - Velocidad = $2\pi R(\text{orbita}) / 1\text{año} = 100.000 \text{ km/h}$ o 30 km/s

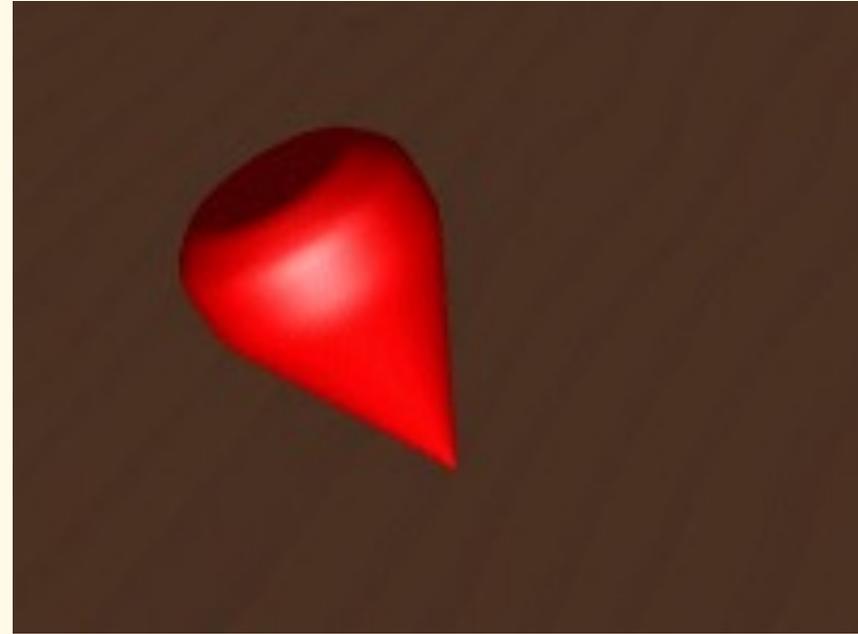
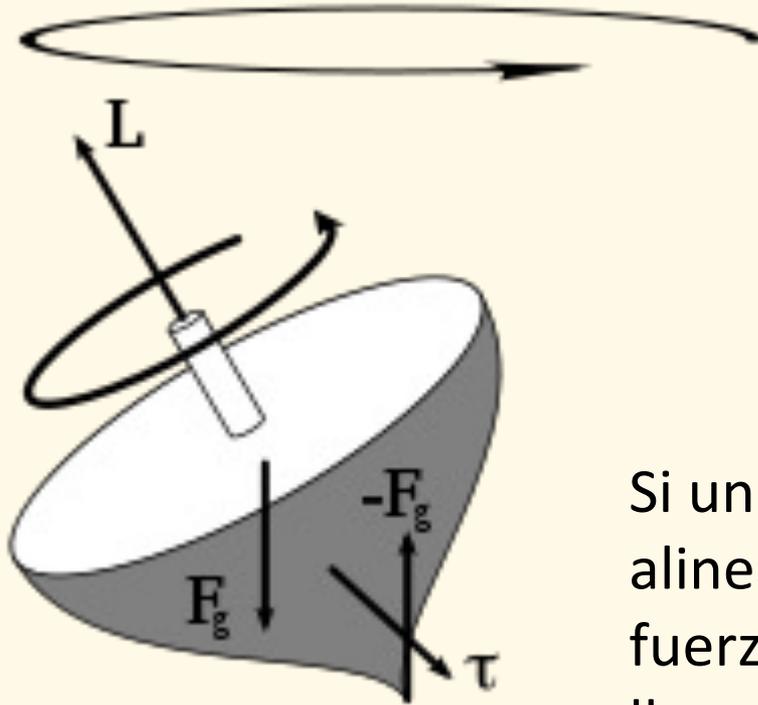
Precesión de los Equinoccios

Peonza (trompo)



Una peonza es un cuerpo que puede girar sobre una punta sobre la que sitúa su centro de gravedad de forma perpendicular al eje de giro, equilibrándose sobre un punto gracias a la velocidad angular, que permite el desarrollo del efecto giroscópico.

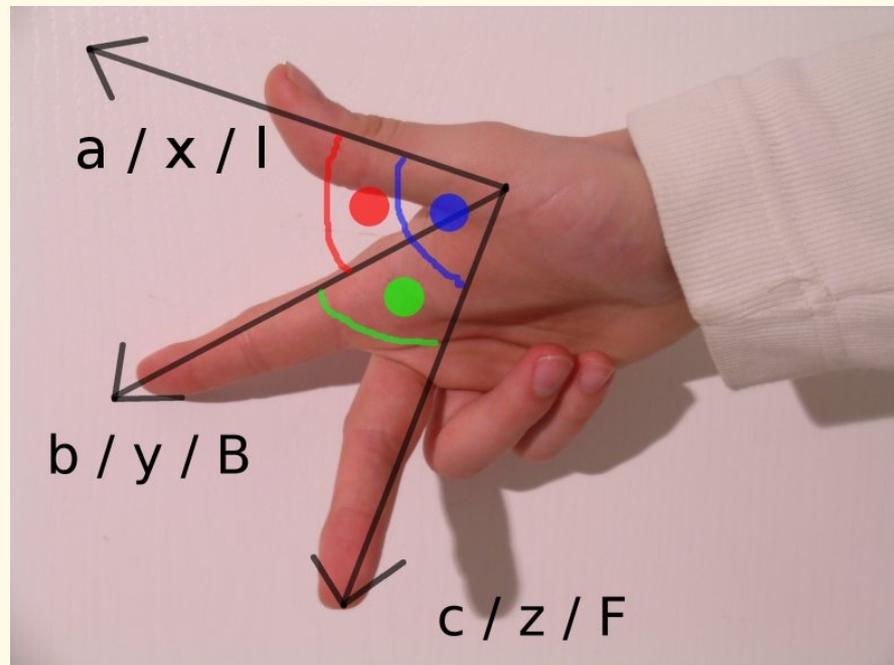
¿Qué es precesión?



Si un trompo no está perfectamente alineado, entonces experimenta una fuerza (fuerza gravitacional) que intenta llevar la parte superior al suelo.

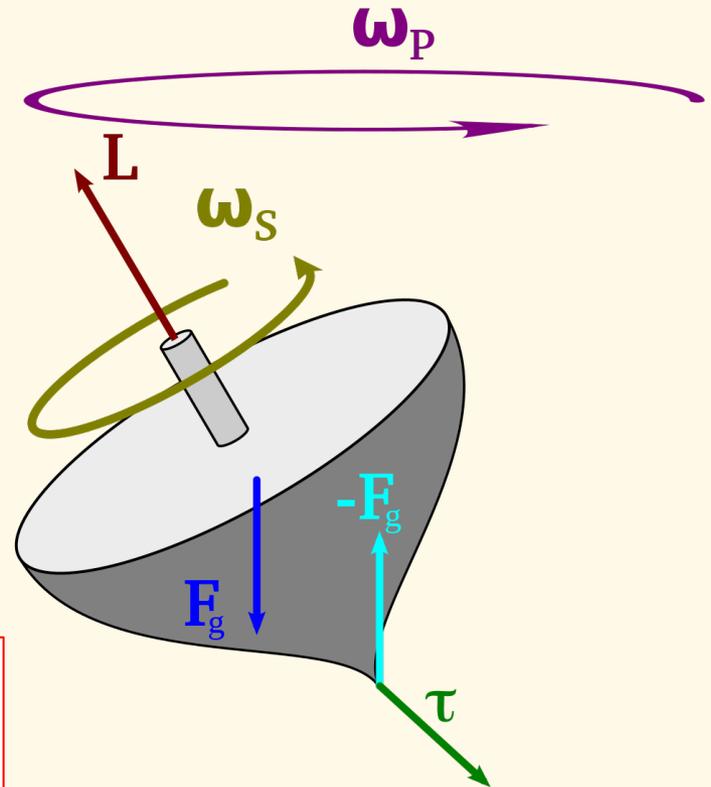
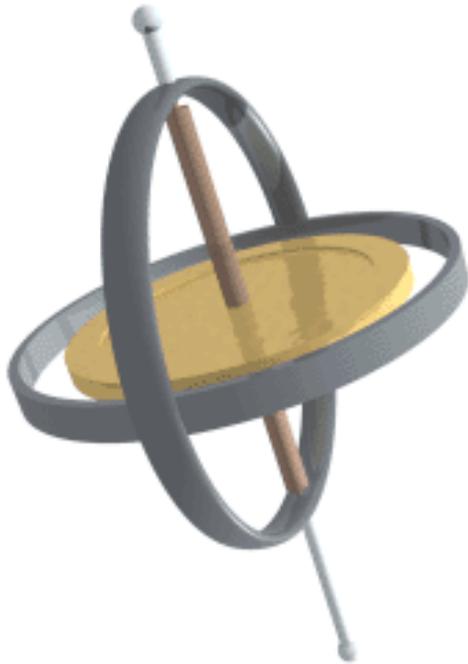
Esto significa que la fuerza intenta cambiar el momento angular, al menos la dirección, del trompo. En física esto se llama **torque** τ .

El cambio del momento angular ocurre en una dirección que es perpendicular a la dirección del momento angular y perpendicular a la fuerza.



El resultado se llama **precesión**:

Vemos una rotación más lenta del eje de rotación del trompo, describiendo un círculo.



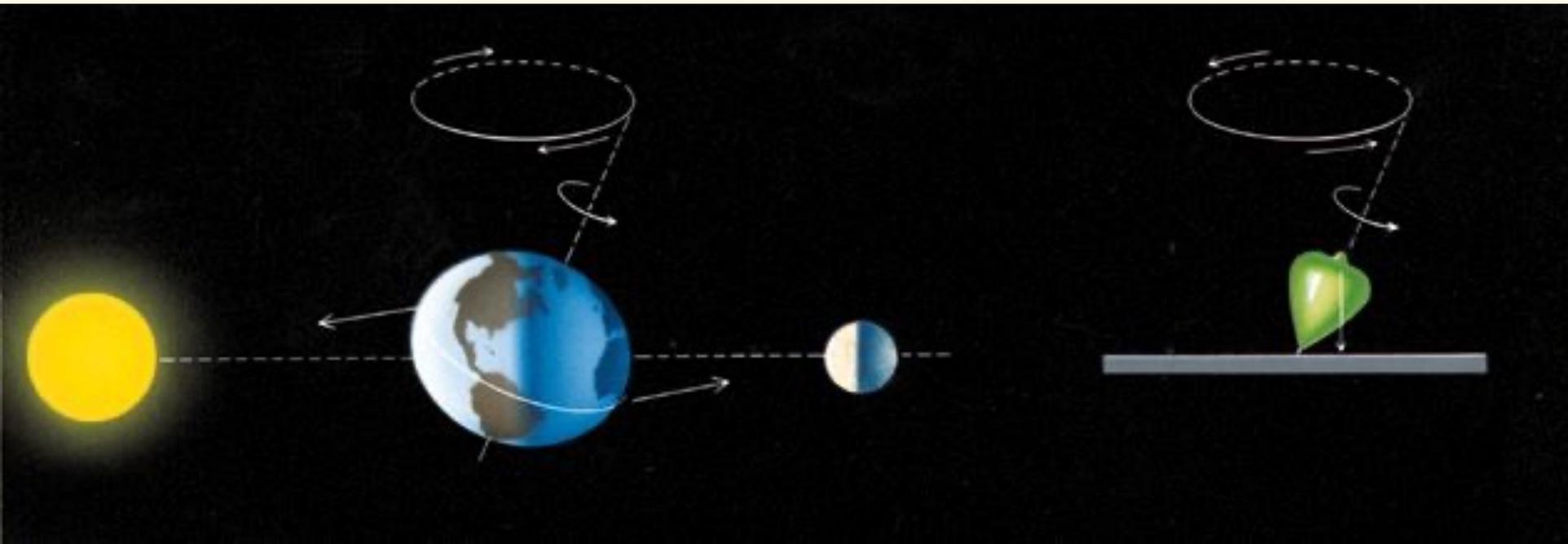
$$\omega_p = \frac{\tau}{I_s \omega_s}$$

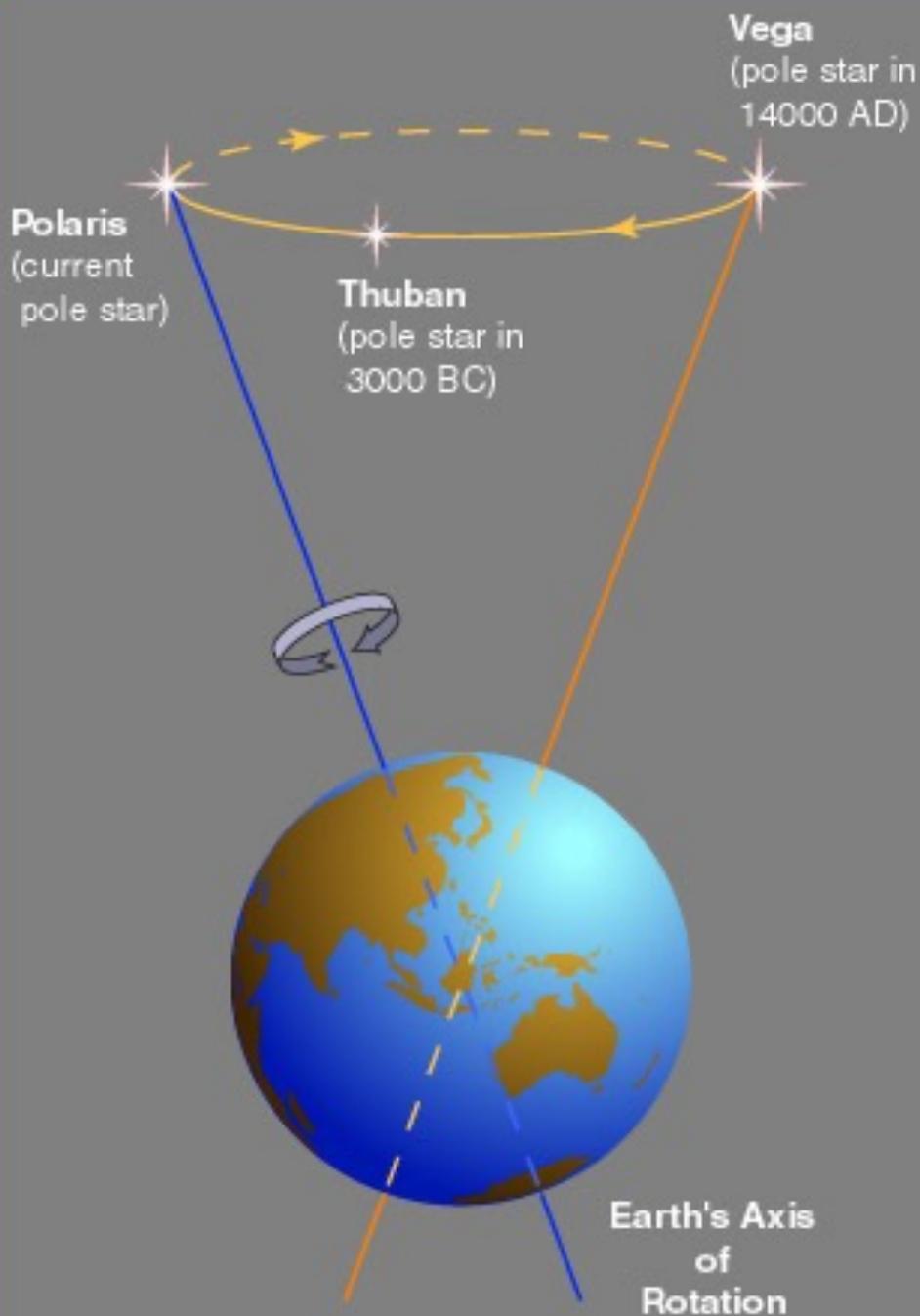
Precesión de los Equinoccios

La Tierra gira como un trompo y, como un trompo, el eje de rotación no está alineado (oblicuidad).

Por lo tanto, las fuerzas de gravedad del Sol y la Luna intentan cambiar la dirección del momento angular de la Tierra.

Y como un trompo, la Tierra tiene precesión.

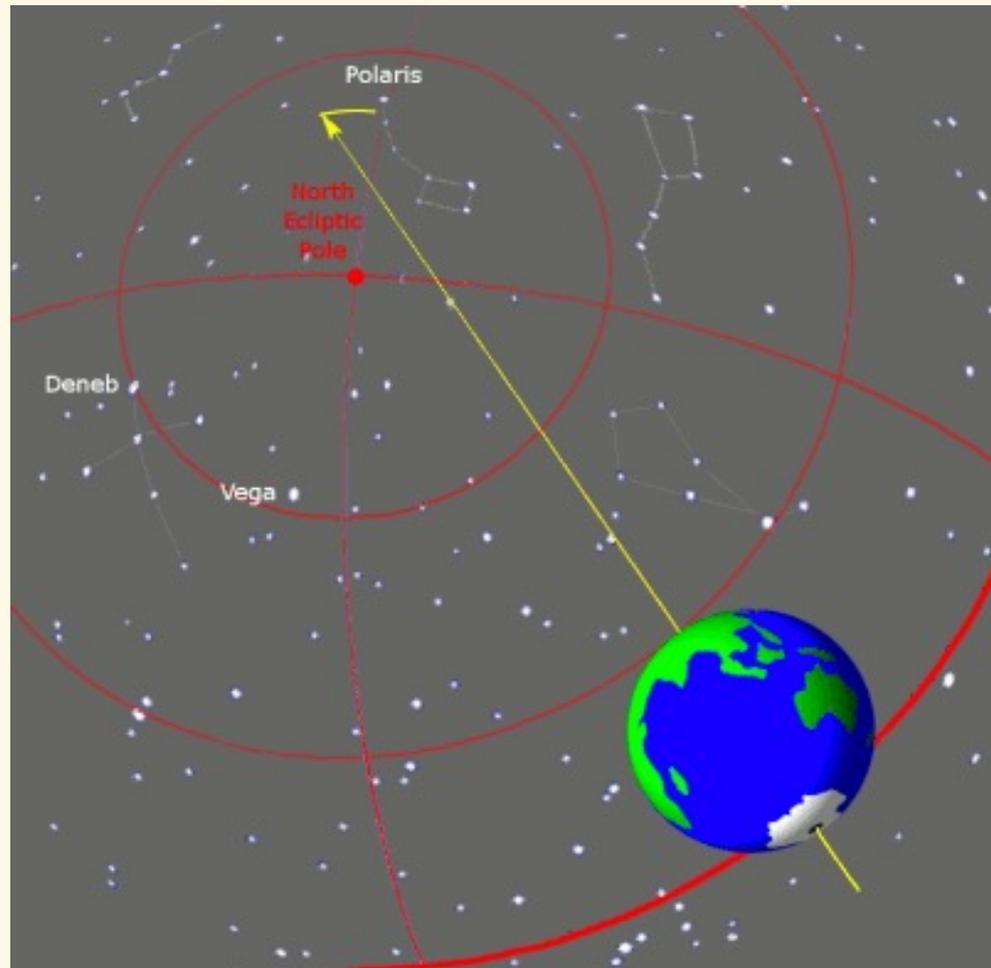




La **precesión de los equinoccios** es el movimiento del polo norte celeste, que describe un círculo completo alrededor del polo norte de la eclíptica con un período de 25780 años (período conocido como **año platónico**).

Este movimiento es debido al movimiento de precesión de la Tierra causado por el momento de fuerza ejercido por el Sol sobre la Tierra.

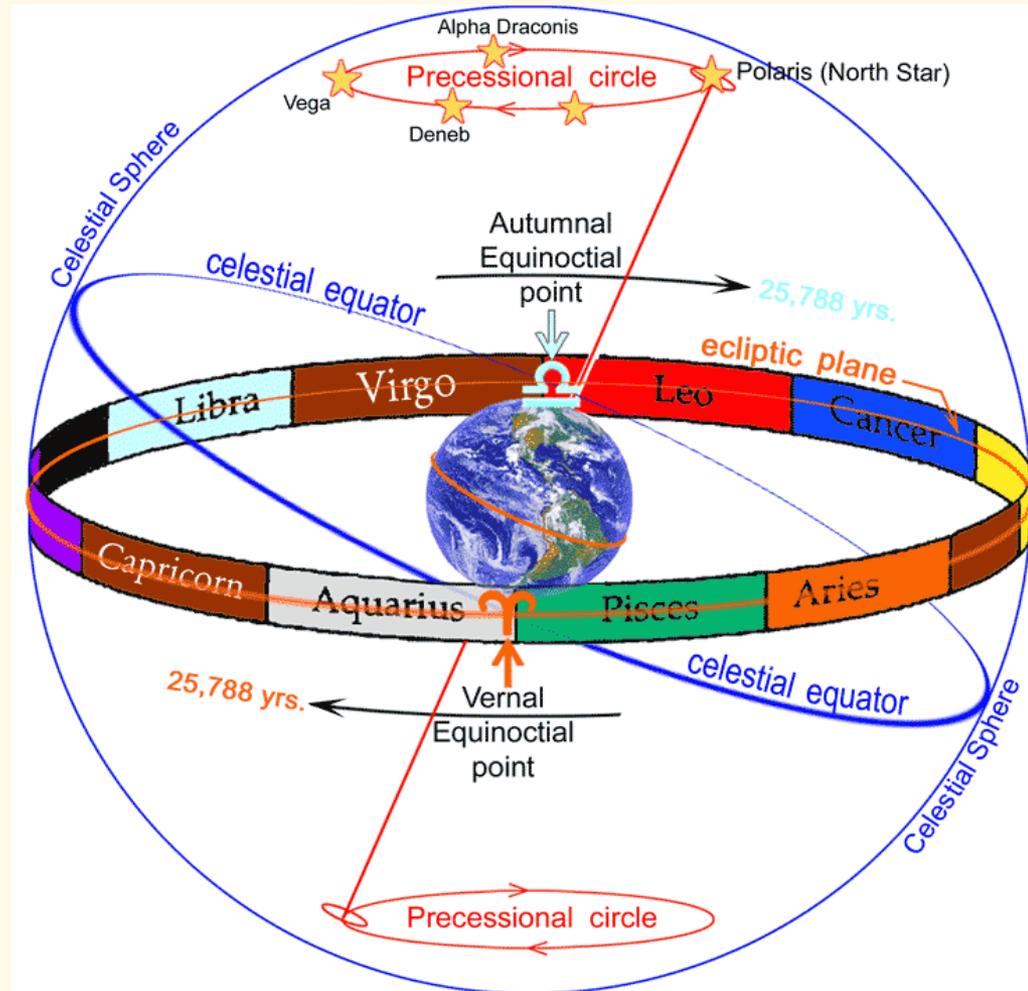
Hiparco de Nicea (siglo II a. C.) fue el primero en dar el valor de la precesión de la Tierra con una aproximación extraordinaria para la época.



Si el eje de rotación de la Tierra cambia con respecto a la esfera celeste, también lo hace la proyección del ecuador.

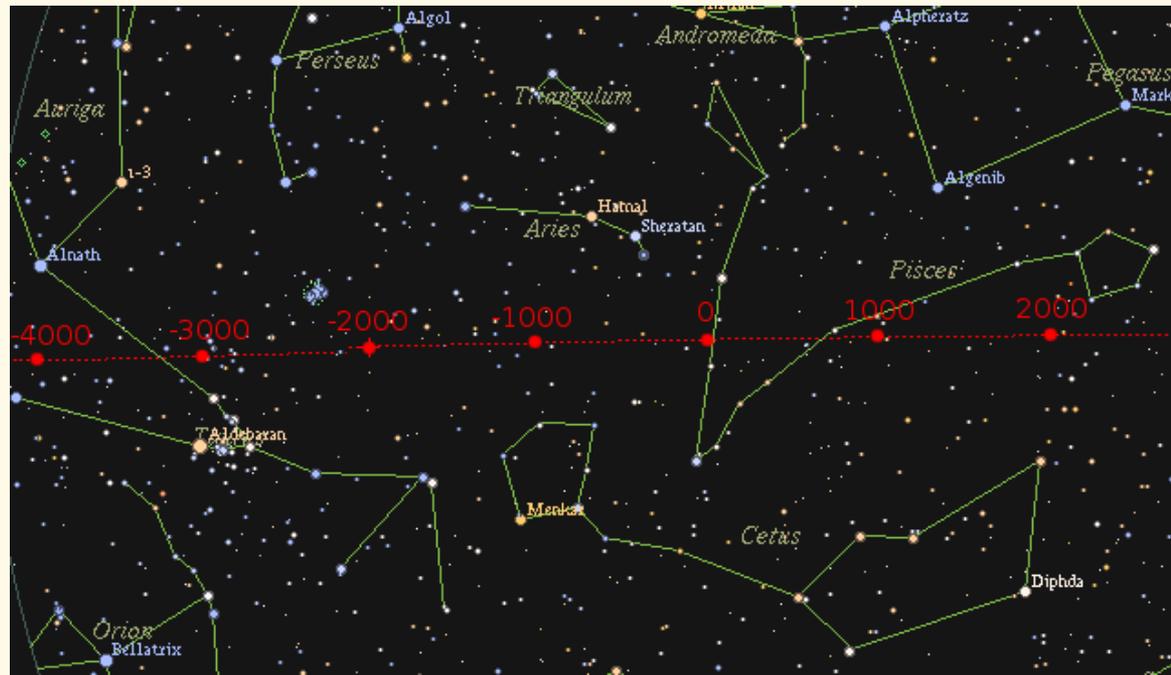
Y, por lo tanto, finalmente también los puntos donde eclíptica y ecuador coinciden.

→ **precesión de los equinoccios.**

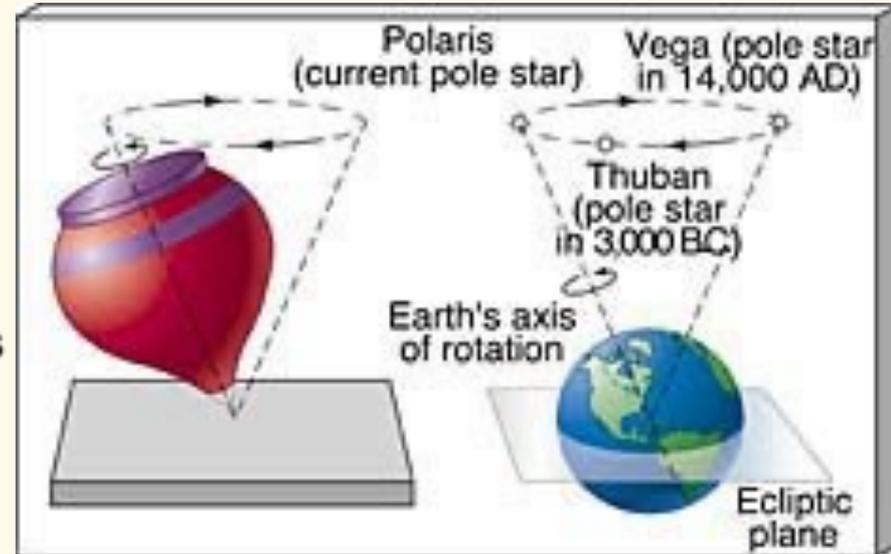
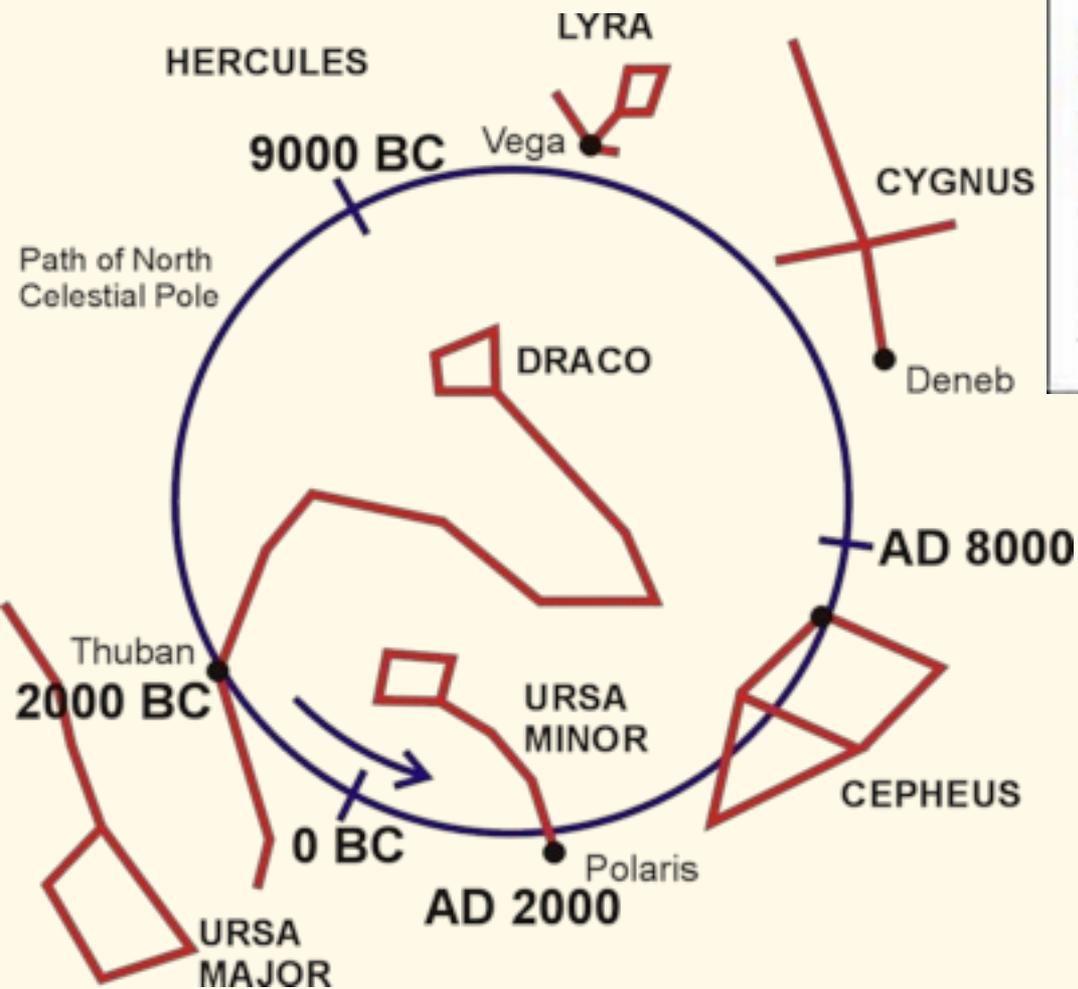


La definición de los puntos del equinoccio y sus nombres provienen de los antiguos griegos. Todavía usamos los mismos nombres y también los mismos nombres para las constelaciones de las estrellas.

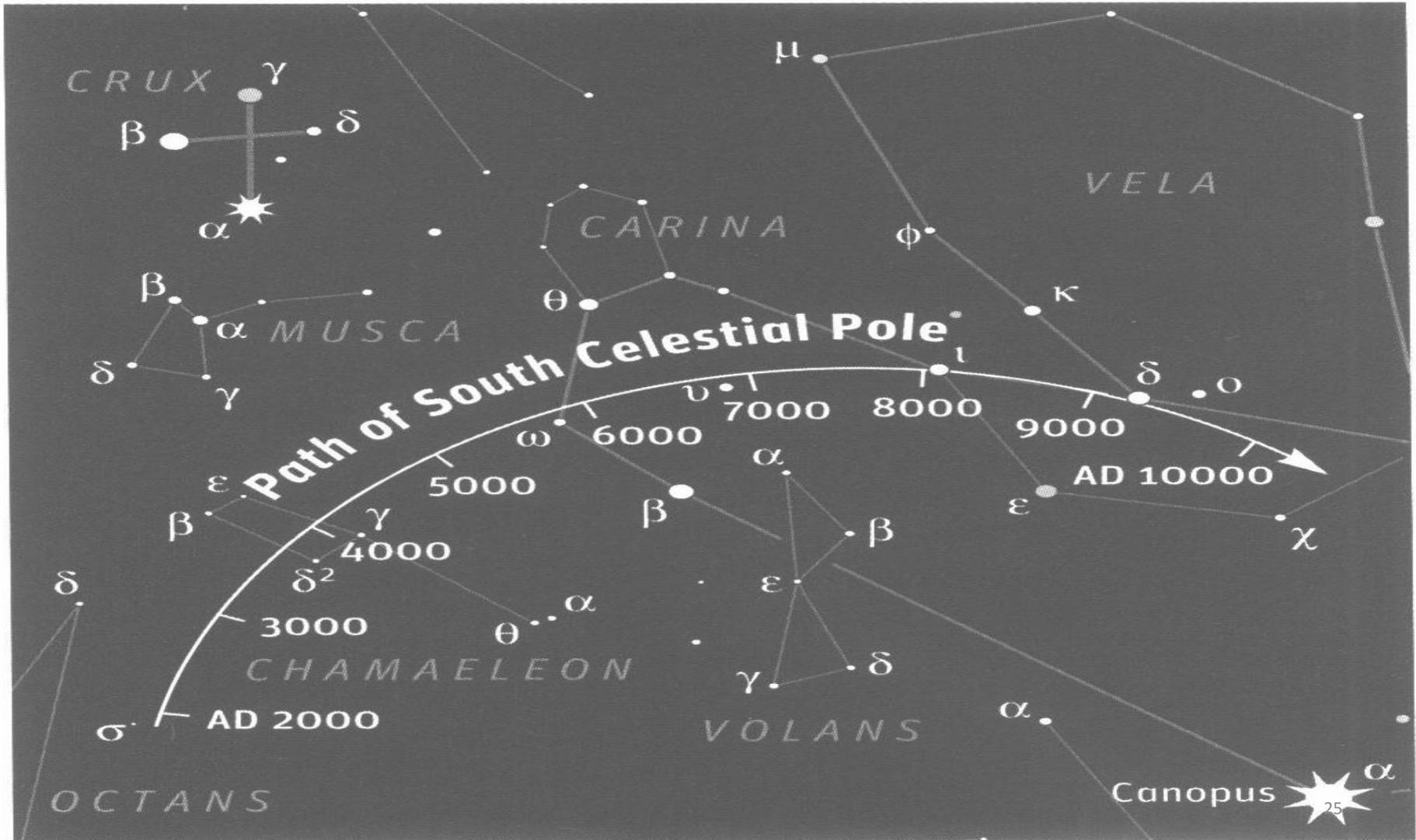
Por lo tanto, el equinoccio vernal ahora (más de 2000 años después, según la definición de los antiguos griegos) ya no está en las constelaciones de Aries, sino en Acuario.



Cómo cambia la dirección del polo norte con precesión

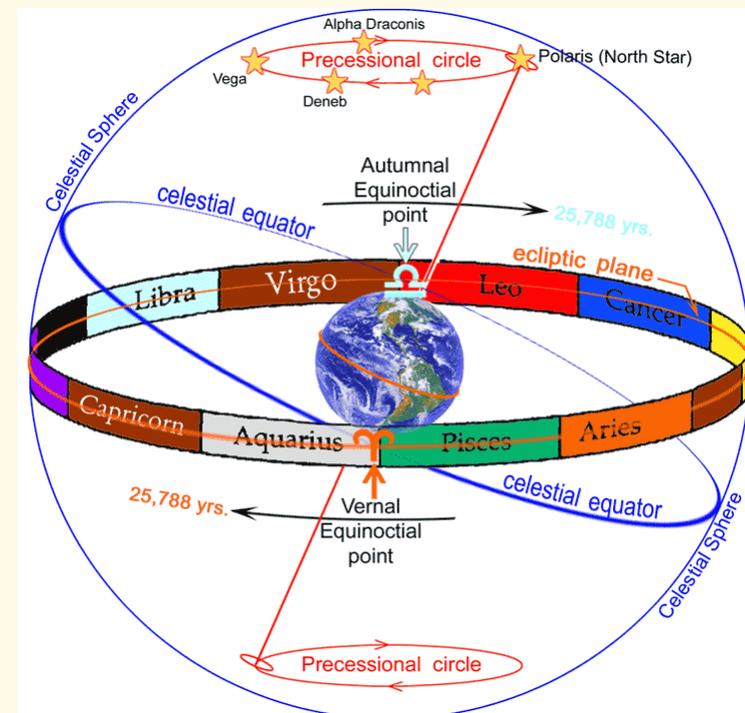


Cómo cambia la dirección del polo sur con precesión



La astrología se base en las posiciones de los equinoccios de más de 2000 años atrás.

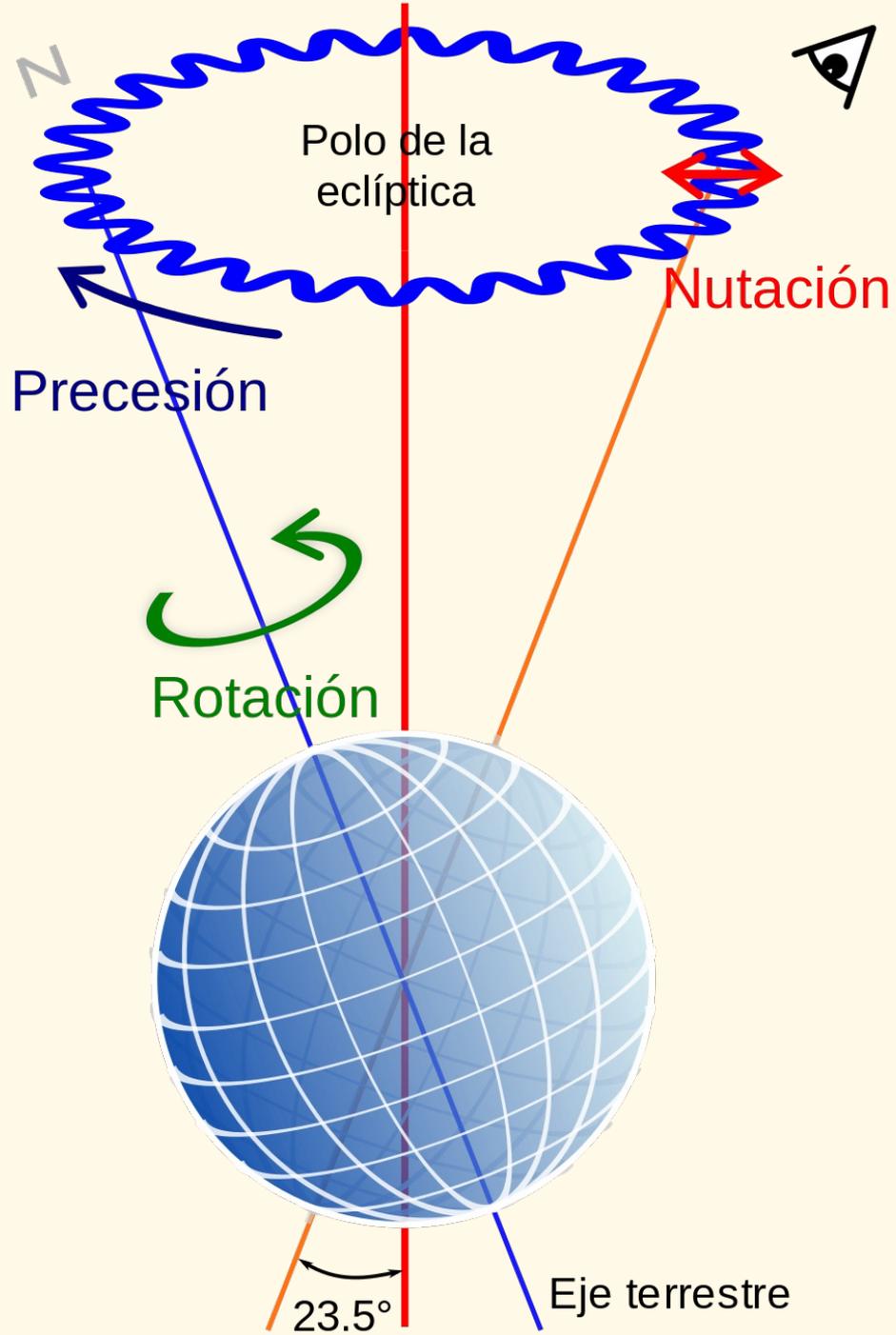
Y si tu horóscopo dice que tú naciste en una constelación, en realidad por la precesión tú naciste cuando el Sol estuvo en una constelación completamente diferente !



Laboratorio para la casa

- Mire la película 'Hair' (1979) y discuta la edad de Acuario.



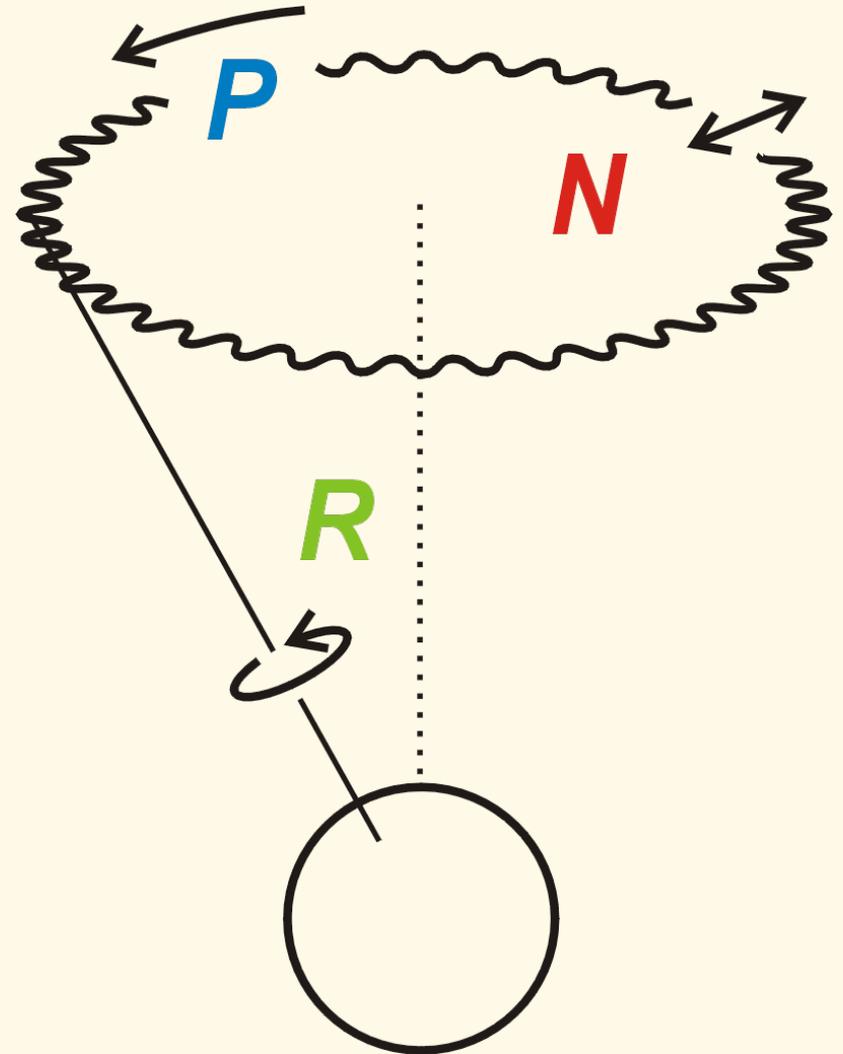


Nutación

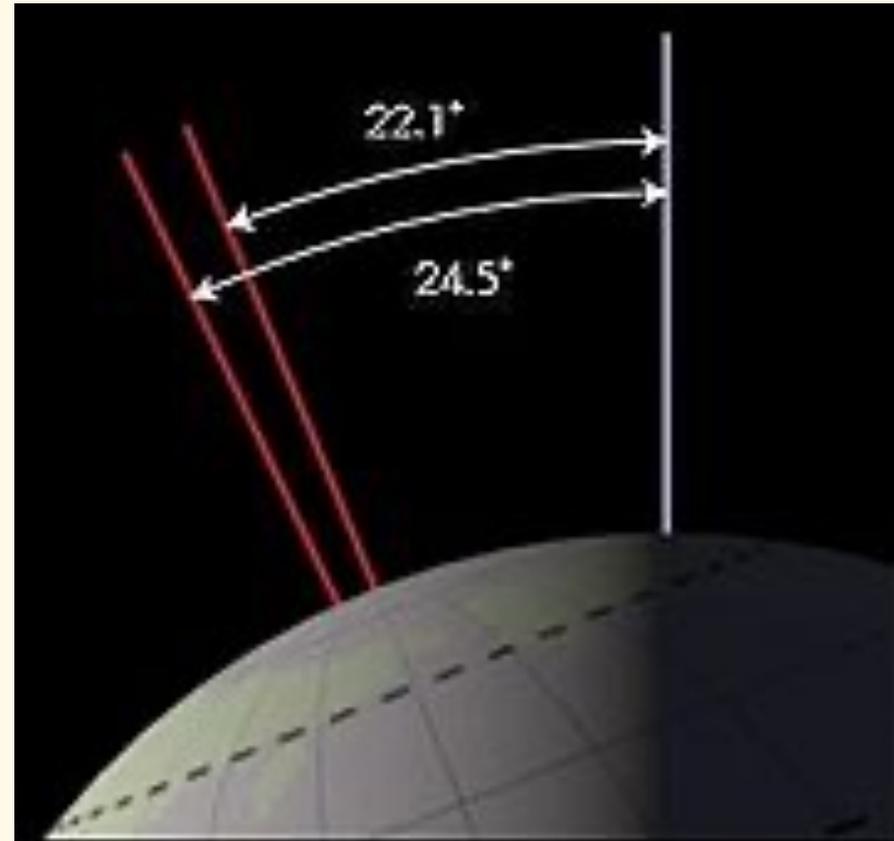
Nutación

Nutación (del latín “nutare”, cabecear u oscilar) es un movimiento ligero irregular en el eje de rotación de objetos simétricos que giran sobre su eje. Ejemplos comunes son los giroscopios, los trompos y los planetas.

Más exactamente, una nutación pura es el movimiento del eje de rotación que mantiene el primer ángulo de Euler (precesión) constante.

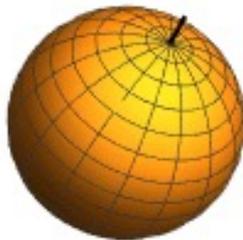


Para el caso de la Tierra, la nutación es la oscilación periódica del polo de la Tierra alrededor de su posición media en la esfera celeste, debido a las fuerzas externas de atracción gravitatoria entre la Luna y el Sol con la Tierra. Esta oscilación es similar al movimiento de una peonza (trompo) cuando pierde fuerza y está a punto de caerse.

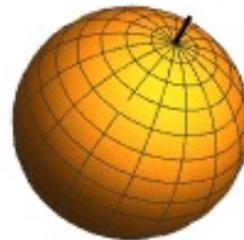


En el caso de la Tierra, la nutación se superpone al movimiento de precesión, de forma que no sean regulares, sino un poco ondulados, los teóricos conos que dibujaría la proyección en el espacio del desplazamiento del eje de la Tierra debido al movimiento de precesión. La nutación hace que los polos de la Tierra (su proyección a la esfera celeste) se desplacen unos nueve segundos de arco cada 18,6 años.

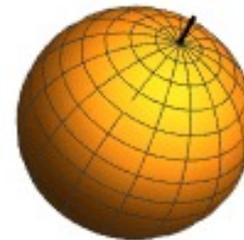
Rotation



Precession



Nutation



El Sol produce otro efecto de nutación de mucha menor relevancia, con un período medio de medio año y un desplazamiento polar máximo de 0,55" de arco.

Los demás planetas también producen variaciones, denominadas perturbaciones, pero que carecen de importancia por su pequeño valor.

Al depender el movimiento de nutación de la estructura interna de la Tierra, las discrepancias entre los valores predichos y observados proporcionan información sobre modelos para el núcleo terrestre.

El movimiento de nutación fue descubierto en 1728 por el astrónomo inglés James Bradley, y dado a conocer en el año 1748. Hasta 20 años más tarde no se supo que la causa de este movimiento extra del eje de la Tierra era la atracción gravitatoria ejercida por la Luna.

Los fenómenos de movimiento del polo e inconstancia de la rotación terrestre aparecen como consecuencia de pequeños cambios en el momento angular de la Tierra.

Este cambio es debido a muy diversos fenómenos, entre los que se pueden citar el intercambio de momento angular entre la Tierra y su atmósfera y, entre la Tierra y la Luna, variación de la altura del nivel del mar y corrientes oceánicas, producidas por el fenómeno de las mareas, acoplamientos mecánicos entre los movimientos de los fluidos del núcleo y manto, etc.

James Bradley (1693–1762)



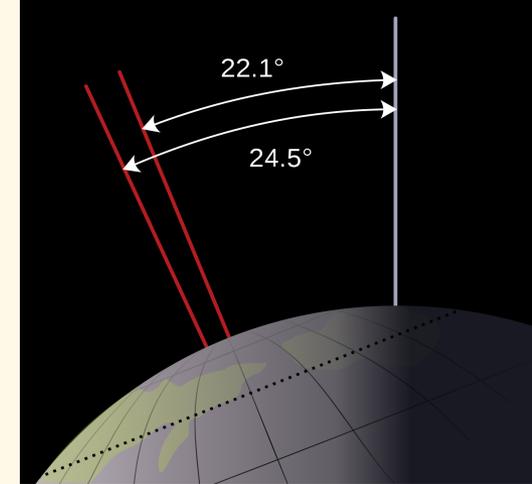
James Bradley fue un astrónomo y sacerdote inglés que sirvió como Astrónomo Real desde 1742.

Es mejor conocido por dos descubrimientos fundamentales en astronomía, la aberración de la luz (1725–1728) y la nutación del eje de la Tierra. (1728-1748).

Laboratorio para la casa

- Roba el trompo de tu hermana pequeña y juega con él. ¿Puedes ver su rotación, precesión y nutación? ¿Puedes girar el trompo de una manera que no tenga precesión ni nutación?

Nutación (largo plazo)



El ángulo de la inclinación del eje axial de la Tierra respecto al plano orbital (la oblicuidad de la eclíptica) varía de 22.1° a 24.5° en un ciclo aproximado de **41,000 años**.

La inclinación actual es de 23.44° , aproximadamente un término medio entre los dos valores extremos.

La inclinación alcanzó su máximo el año 8.700 A.C.

Actualmente, se encuentra en fase decreciente de su ciclo y alcanzará su mínimo el año 11.800 de nuestra era actual.

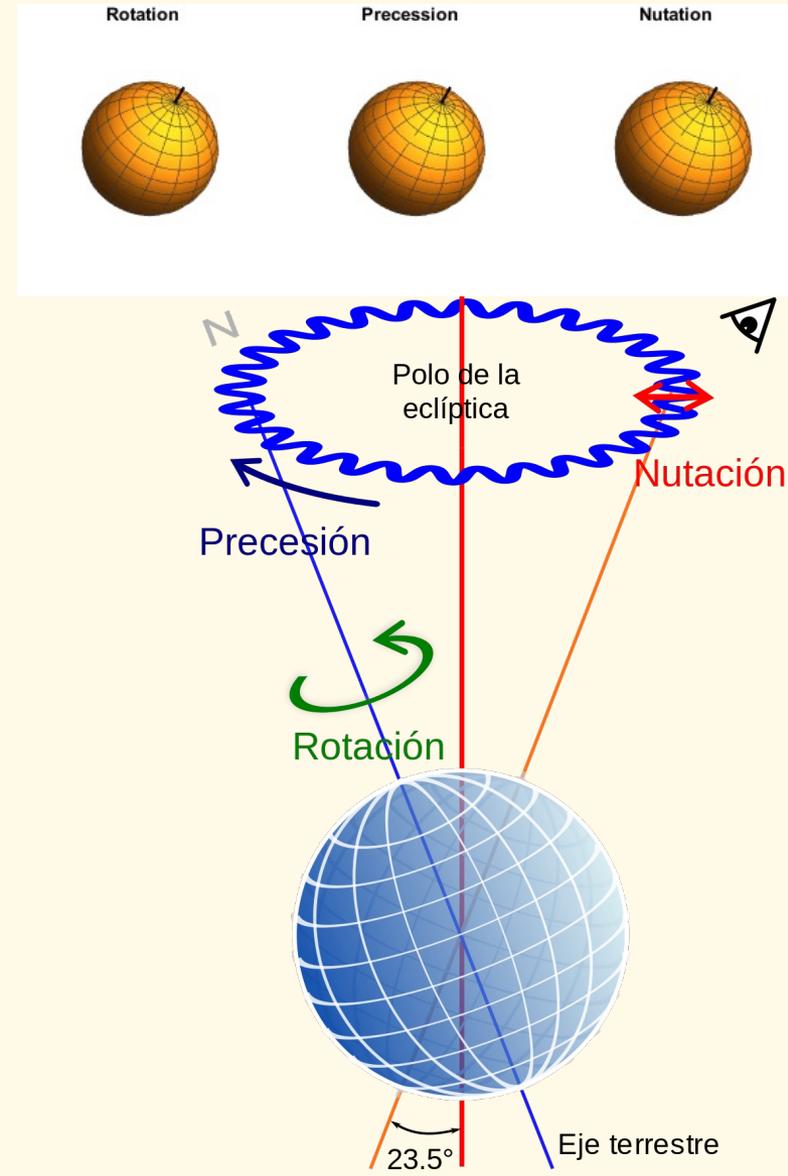
Nutación (corto plazo)

Luna:

La nutación hace que cada **18,6 años** el eje de rotación de la Tierra oscile hasta unos 9 segundos de arco a cada lado del valor medio de la oblicuidad de la eclíptica y hasta unos 17 segundos a cada lado del valor medio de desplazamiento de la precesión de los equinoccios.

Sol:

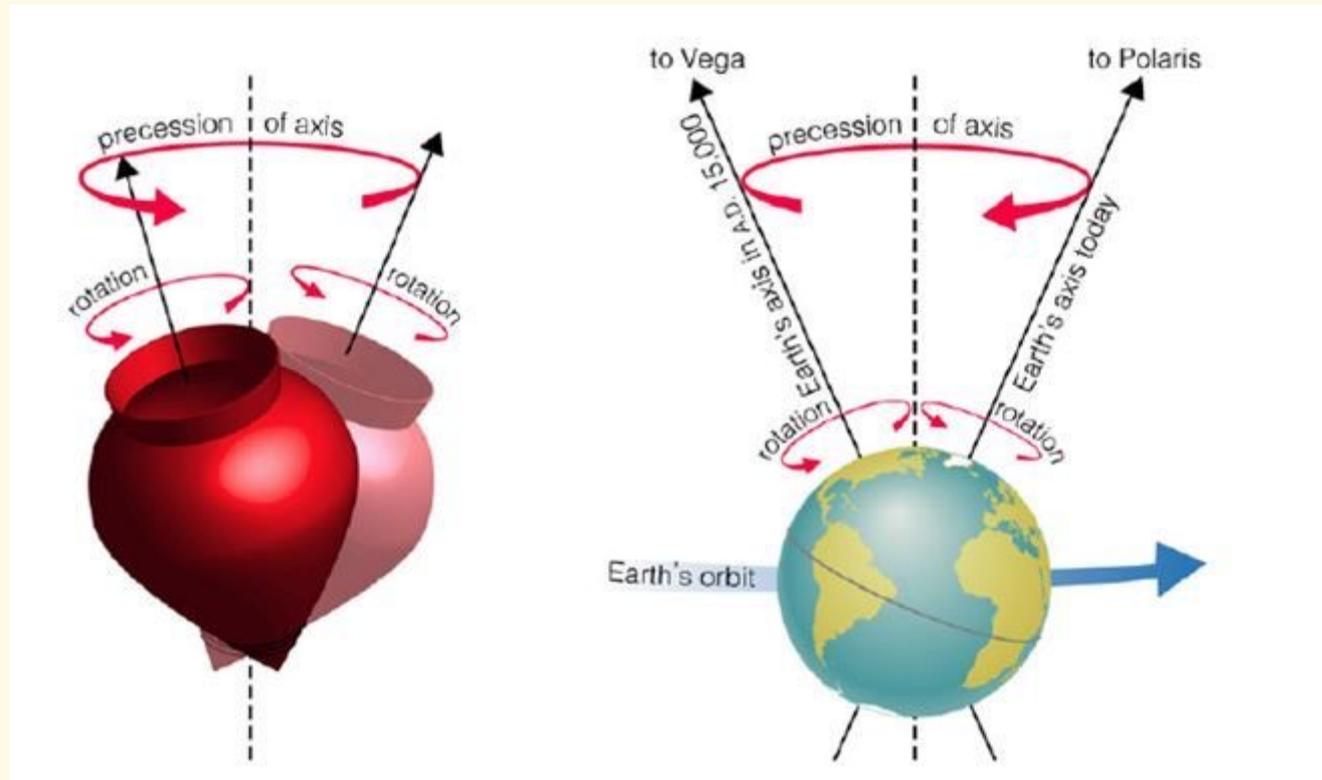
El Sol produce otro efecto de nutación de mucha menor relevancia, con un período medio de **0.5 año** incrementando la oscilación del eje mencionada hasta 1,1" de arco en oblicuidad y hasta alrededor de 2" de arco en longitud (precesión).



Bamboleo de Chandler

El bamboleo de Chandler es una pequeña variación en el eje de rotación de la Tierra, descubierta por el astrónomo norteamericano S. Chandler en 1891.

Supone una variación de 0,7 segundos de arco en un período de 433 días. En otras palabras, los polos de la Tierra se mueven en una circunferencia irregular de 3 a 15 metros de diámetro, en un movimiento oscilatorio.



El diámetro del bamboleo ha variado desde su descubrimiento, alcanzando la máxima amplitud registrada en 1910.

Su origen es desconocido: salvo por una fuerza externa, el bamboleo debería ir remitiendo paulatinamente. En un principio se creyó que estaba causado por fluctuaciones climáticas causantes de cambios en la distribución de la masa atmosférica, o a posibles movimientos geofísicos bajo la corteza terrestre.

En 2000 el JPL anunció que "la causa principal del bamboleo de Chandler es la presión fluctuante del fondo oceánico, originada por los cambios en la temperatura y la salinidad, y por los cambios en la dirección de las corrientes oceánicas".

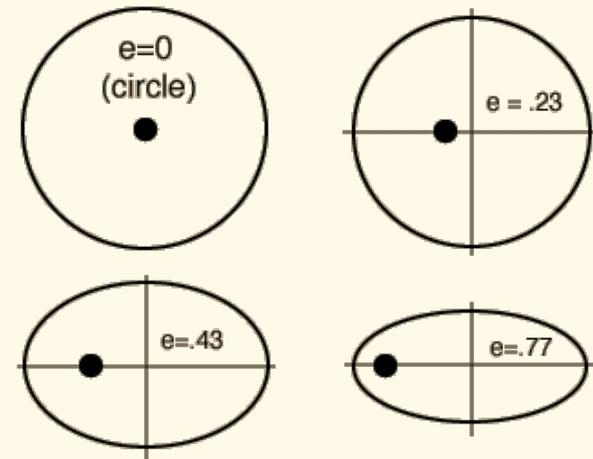
El bamboleo de Chandler es un factor tenido en cuenta por los sistemas de navegación por satélite (sobre todo los de uso militar).

Cambios de la excentricidad

La excentricidad de órbita de la Tierra varía entre una forma casi circular $e = 0.000055$ y la excentricidad más alta de 0.0679 .

Su excentricidad media principal es de 0.0019 .

El principal cambio de dichas variaciones ocurre en un período de aproximadamente **413,000 años** (con una variación de la excentricidad de ± 0.012).



Otros cambios se producen con una secuencia de ciclos de 95,000 y 125,000 años (con un ritmo cíclico de 400,000). Dichos movimientos se combinan entre sí con variaciones de -0.03 a $+0.02$.

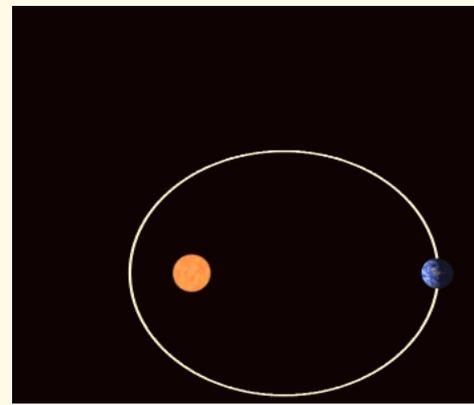
La excentricidad actual es de 0.017 y está decreciendo.

La excentricidad varía fundamentalmente debido al empuje gravitacional de Júpiter y Saturno.

Sin embargo, el eje semimayor de la órbita de la elipse permanece inalterado, aunque de acuerdo con la teoría astronómica de la perturbación que registra la evolución de la misma, dicho eje es una invariante adiabática.

El período orbital (la longitud del año sideral) tampoco ha cambiado, debido a que, según la tercera Ley del movimiento planetario de Kepler, ésta se halla determinada por el eje orbital semimayor.

Precesión apsidal



Además, la elipse orbital en sí misma precede en el espacio, de manera irregular, completando un ciclo cada **112,000 años** en relación con las estrellas fijas.

La precesión apsidal ocurre en el plano de la eclíptica y altera la orientación de la órbita de la Tierra en relación con la eclíptica.

Esto sucede principalmente como resultado de las interacciones con Júpiter y Saturno. Pequeñas alteraciones son también causadas por el achatamiento del Sol y por los efectos de la relatividad general.

La precesión apsidal se combina con el ciclo de 25,771.5 años de precesión axial para variar la posición durante el año en que la Tierra alcanza el perihelio.

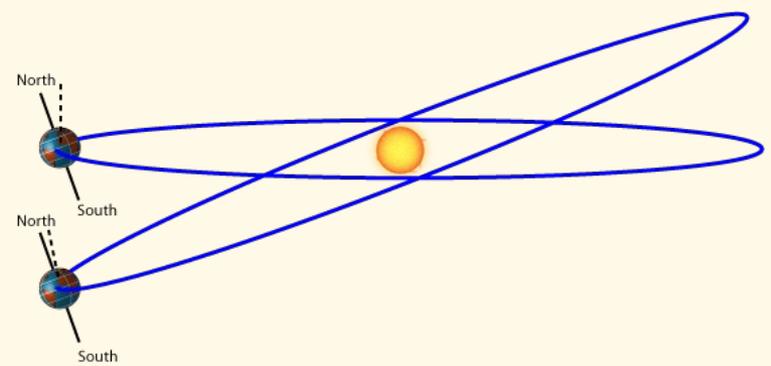
La precesión apsidal acorta este período a 23,000 años de promedio (variando entre 20,800 y 29,000 años)

A medida que cambia la orientación de la órbita de la Tierra, cada estación comenzará más pronto gradualmente cada año.

La precesión significa que el movimiento no uniforme de la Tierra afectará a las diferentes estaciones del año.

El invierno, por ejemplo, estará en una sección diferente de la órbita. Cuando los ápsides de la Tierra estén alineados con los equinoccios, la longitud de la primavera y el verano combinados será igual a la del otoño y el invierno. Cuando están alineados con los solsticios, la diferencia en la duración de estas estaciones será mayor.

Inclinación orbital



La inclinación de la órbita de la Tierra se desplaza hacia arriba y hacia abajo en relación con su órbita actual. Este movimiento tridimensional se conoce como "precesión de la eclíptica" o "precesión planetaria".

La inclinación actual de la Tierra es de 1.57° .

Fue descubierta más recientemente y se calcula que tiene un período de **70,000 años** en relación con la órbita de la Tierra.

Sin embargo, cuando se mide independientemente de la órbita de la Tierra, pero relativa al plano invariable (el plano que representa el momento angular del Sistema Solar, aproximadamente el plano orbital de Júpiter), la precesión tiene un período de aproximadamente 100,000 años.

Ciclos de Milanković

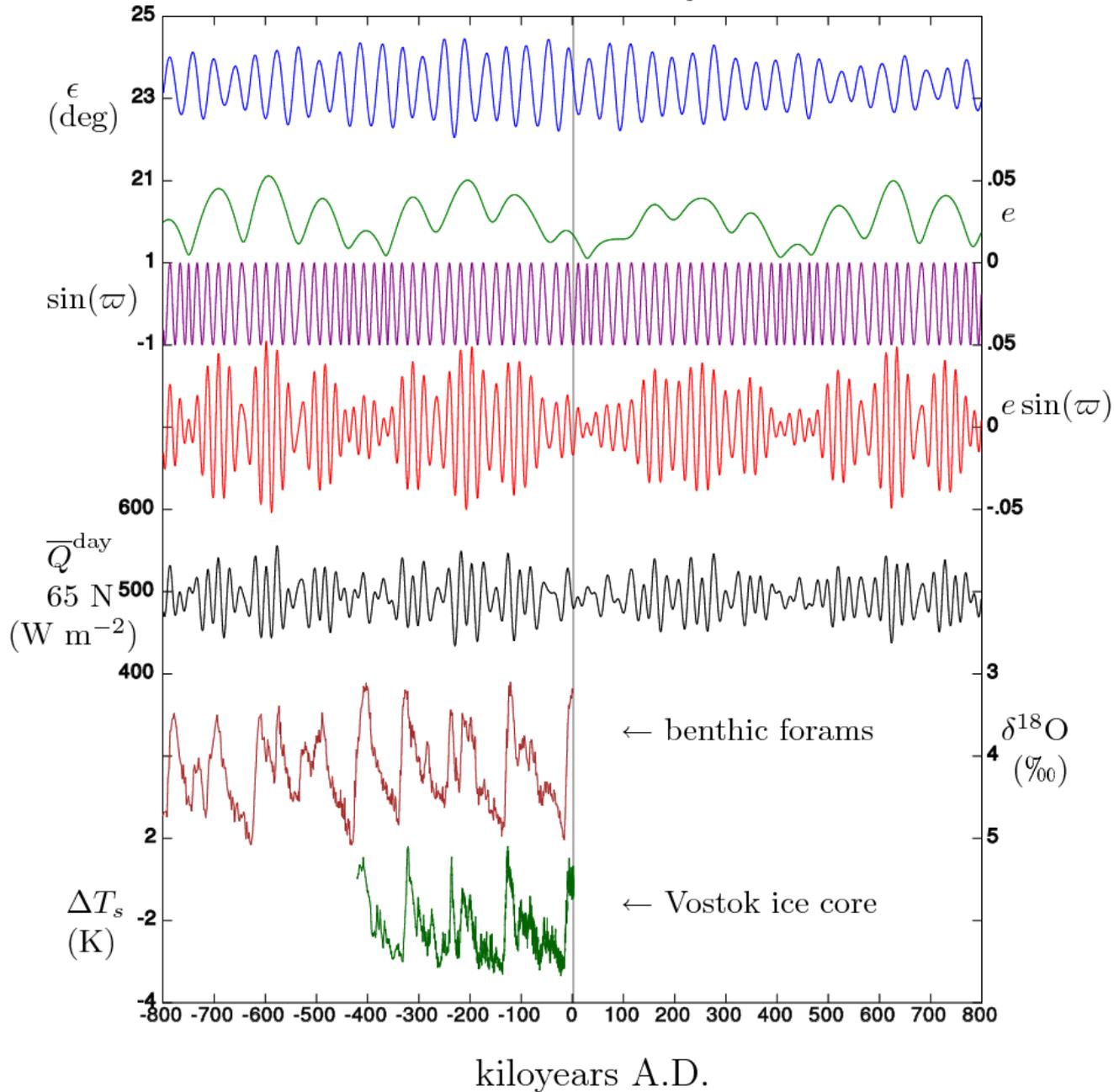
Las variaciones orbitales o ciclos de Milanković describen los efectos conjuntos que los cambios en los movimientos de la Tierra provocan en el clima a lo largo de miles de años.

El término fue acuñado tras los estudios realizados por el astrónomo y geofísico serbio Milutin Milanković. En la década de 1920, teorizó que las variaciones resultantes provocaban cambios cíclicos en la radiación solar que llega a la superficie terrestre y que ello influía considerablemente en los patrones de los cambios climáticos sobre la Tierra.

En la actualidad, los materiales geológicos sobre la superficie de la Tierra que no han cambiado durante miles de años están siendo estudiados por los especialistas para averiguar los cambios en la climatología terrestre.

Pese a que muchos de ellos son consistentes con la hipótesis de las teorías de Milankovitch, hay un conjunto de los mismos que las hipótesis predecibles no son capaces de explicar.

Milankovitch Cycles



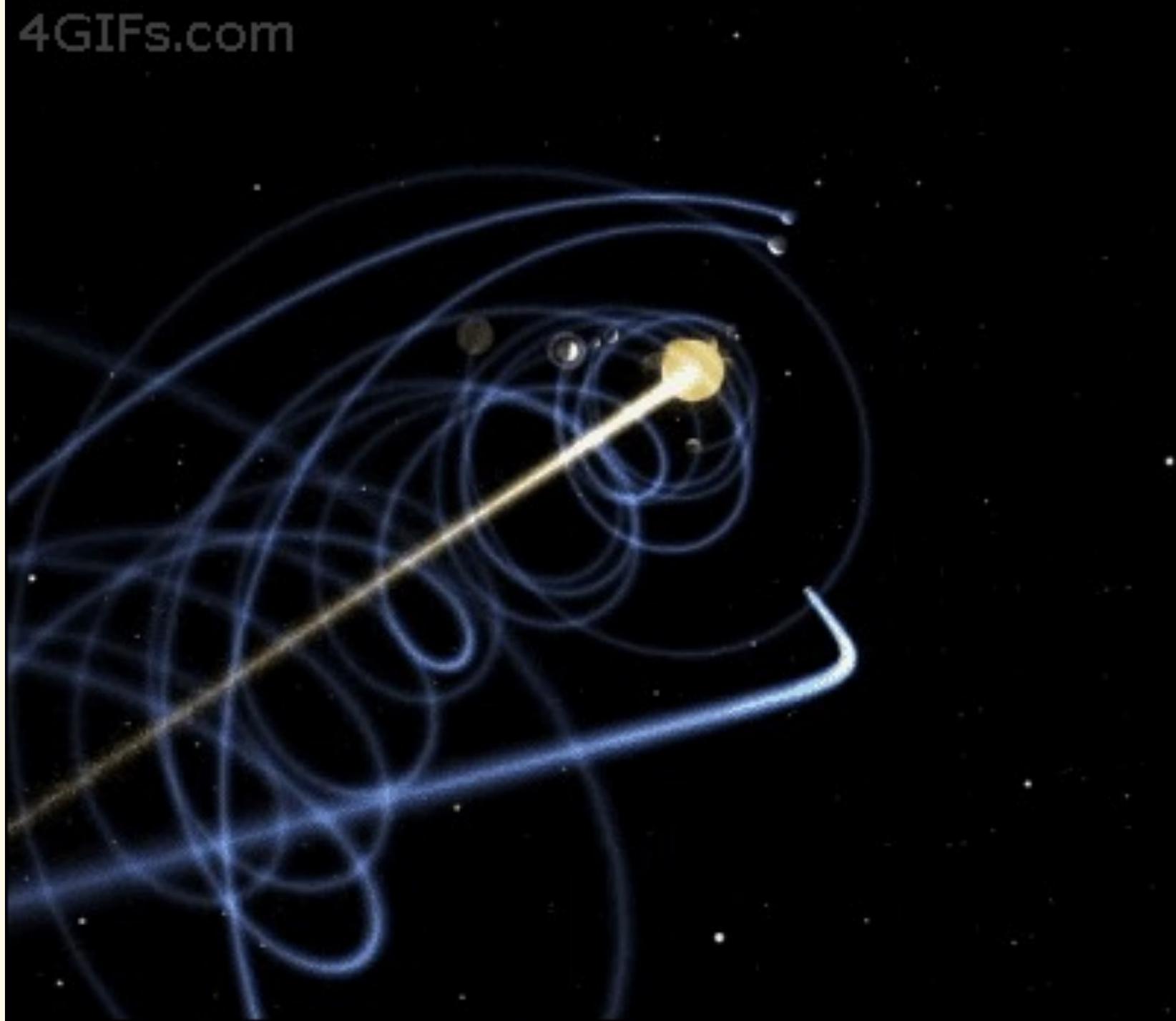
El pasado y futuro de los ciclos de Milanković ayuda a comprender la predicción de los parámetros orbitales pasados y futuros con gran precisión. La figura muestra variaciones en los elementos orbitales, como la Oblicuidad (Inclinación orbital), la Excentricidad, la Longitud del periastro y el Índice de precesión equinoccial, el cual, junto a la oblicuidad, controla el ciclo estacional de la insolación. Así mismo, aparece la cantidad de insolación calculada diariamente en la zona superior de la atmósfera durante el solsticio de verano a un nivel de latitud de 65° N. Aparecen dos niveles diferentes para el nivel del mar y la temperatura oceánica, ambos obtenidos de los sedimentos marinos y del hielo de la Antártida, extraídos de los depósitos bentónicos y del núcleo del hielo en la base antártica rusa de Vostok. La línea gris vertical muestra las condiciones actuales hacia el 2000 D.C.

otros movimientos

- El Sol (y el sistema solar) cumple una órbita alrededor de nuestra galaxia (Via Lactea) en $\sim 2 \times 10^8$ años.

$$\text{Velocidad} = 2\pi R(\text{orb}) / 2 \times 10^8 \text{ años} \sim 220 \text{ km/s}$$

- También la Via Lactea mueve en el Grupo Local de galaxias, hacia Andromeda con $V = 120 \text{ km/s}$.
- La velocidad mas grande conocido en lo cual estamos involucrado es la del Grupo Local al respecto del Hubble Flow (cosmic microwave background radiation), con Velocidad $\sim 600 \text{ km/s}$ hacia el Hydra-Centaurus supercluster.



Laboratorio para la casa

- Tome las velocidades de los movimientos de la Tierra y calcule qué tan rápido sería para una distancia determinada que elija (por ejemplo viajar con esta velocidad a Santiago).