

4.1. EL TIEMPO

Definía Newton el tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí sólo, como algo que debido a su naturaleza fluye de manera regular, e independiente de cualquier relación con el exterior. Pero hoy se sabe que el tiempo no es absoluto. Según la teoría restringida de la relatividad, las medidas del tiempo dependen del estado de movimiento del observador y tiempo es la cuarta dimensión de las coordenadas espaciales en el continuo espacio-tiempo.

Tampoco es una sustancia que fluye regularmente, sin relación con nada exterior, pues según la teoría general de la relatividad, los campos de gravedad intensa, al deformar el espacio tiempo, advierten de qué manera la materia crea unos campos gravitatorios que **dilatan el tiempo**.

Si fluyera el tiempo, no podría éste medirse experimentalmente. El desplazamiento del presente, del pasado al futuro, parece mantener un carácter subjetivo. Vemos como la física se ocupa de **intervalos** de tiempo, sin llevar a las ecuaciones matemáticas el momento presente. No obstante podemos decir que el tiempo si tiene una flecha o una dirección, al desplazarse hacia adelante, a una rata de un segundo por segundo (sin que haya virtud aclaratoria adicional).

La irregularidad, que se le niega poseer, no podría tampoco ser objeto de determinación, por no existir método alguno que nos permita medir una eventual irregularidad. Queda así entonces establecido que las determinadas flechas del tiempo no tienen que ver con un flujo. Sólo que el mundo no es simétrico desde el punto de vista temporal.

Planteadas estas dificultades en el tiempo newtoniano, ¿cómo se ha de definir el tiempo? no se puede decir que sea algo que define el **orden temporal** de los acontecimientos.

Con omisión de las implicaciones del término temporal, aparece la dificultad de que el orden de los acontecimientos también **es relativo**, por depender de la posición del observador. Al explotar dos estrellas, veremos primero la luz que primero llegue a nuestros ojos, independiente de cual acontecimiento haya sucedido primero: si ocurrieran en el mismo instante los eventos, de estar equidistantes las estrellas, la información la recibiría el observador simultáneamente, después de un lapso de tiempo; y si no son equidistantes, llegará primero la información de la estrella más próxima, pues la luz de la segunda tendrá una distancia adicional que recorrer. Puede ocurrir, en el segundo caso que explotando primero la estrella más lejana, la luz de ambas llegue simultáneamente al observador, y este erróneamente, suponga los eventos en el mismo orden cronológico.

Por eso es conveniente considerar el tiempo a la luz de la teoría general de la relatividad, para verlo como un elemento geométrico del **espacio tiempo tetra-dimensional**. Nadie sabrá si este concepto tendrá sentido alguno cuando se entra a la región de Planck. Pues a la escala de 10^{-43} segundos o menos, pudiera el tiempo dejar de existir, o estaría constituido por las partículas llamadas "**cronos**". Es que de pronto el tiempo tampoco tiene una estructura continua y uniforme, es decir, discreta y posiblemente sus partículas constituyentes no se han podido detectar.

4.2. LAS FLECHAS DEL TIEMPO

La teoría general de la relatividad, que parece ofrecer la definición más completa, no nos ha aclarado la razón de las flechas del tiempo, ni la relación entre ellas.

Es la primera flecha la **termodinámica**, que anuncia la entropía creciente, de conformidad con la segunda ley de la termodinámica. Por ella el pasado y el futuro son diferentes, pues el universo viene de un estado más a uno menos ordenado; es la flecha más importante.

La expansión del universo es la segunda flecha; ofrece dudas en cuanto a su importancia fundamental, ni se sabe de su relación con la flecha termodinámica. Claro sí, que esta dinámica del universo en expansión, se conecta con las interacciones gravitatorias, pero no tenemos conocimiento para el cálculo de la entropía en un campo gravitatorio.

Gonzalo Duque-Escobar

La tercera flecha del tiempo se relaciona con las partículas elementales. En la física nuclear se permiten reacciones en sentidos opuestos. Si puede darse cierto tipo de desintegración nuclear, también puede darse lo contrario. No obstante, existe una extraña excepción en una reacción entre partículas elementales. Se trata del **mesón neutro K o kaón**, que sí presenta una asimetría de tiempo.

El kaón es una subpartícula ligada a colisiones hiperenergéticas y no es un constituyente normal de la materia, ni desempeña papel alguno en la desintegración nuclear. Es inestable, desintegrándose de diferentes formas. Se transforma en tres piones, o en un pion, un positrón y un neutrino. Pero según las leyes de la física el kaón habrá de desintegrarse en tres partículas, pues de ser sólo dos, el proceso no sería reversible. En 1964 se observó que, a veces, sucede una desintegración en dos partículas, y esa es una flecha del tiempo, ya que se constituye en una asimetría.

La cuarta flecha es la **electromagnética**. Las ondas se propagan en el futuro, no en el pasado. Cuando se mira el Sol, han transcurrido ocho minutos entre la emisión y la recepción de su imagen, tiempo suficiente para que el astro cambie de posición. Así, todo lo que vemos, lo vemos en el pasado, en su pasada posición y estado.

La quinta flecha es la **sicológica**. Tan enigmática es que, algunos filósofos, han puesto en duda la existencia del tiempo. Según ella no recordamos el futuro.

4.3. UNA REFERENCIA EN EL CIELO

Recordemos que la órbita de la Tierra es elíptica, luego, por la segunda Ley de Kepler, la velocidad de traslación V es variable y por lo tanto el arco N es variable. Además el eje de la tierra está inclinado y la órbita de la tierra es excéntrica, pero los solsticios no coinciden con el perigeo y el apogeo. De esto se desprende que la duración de los días solares sea en realidad variable: los días son más largos cuando la velocidad de traslación es mayor.

El **tiempo verdadero** se mide con relación al Sol. La vida civil está regida por este astro, por lo que las escalas de tiempo, en las que se determinan las fechas, se han elaborado con base en el movimiento aparente del Sol. El día solar es el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta sobre su propio eje.

El **tiempo medio** se mide con el reloj respecto de un Sol hipotético, porque los días de tiempo verdadero tienen duración desigual. El tiempo verdadero lo da el reloj de Sol con la sombra y el tiempo solar medio lo da un reloj de pulso con su cronómetro.

Dicho de otra manera, al oír las 12 campanadas del medio día, el Sol debería estar cruzando nuestro meridiano celeste, pero no es así: algunos días del año el Sol camina más aprisa, mientras otros tardará para llegar puntualmente sobre aquella posición. En consecuencia podemos obtener el promedio de la duración de los días solares y hablar de un Sol ficticio, y evaluar los adelantos y retardos del Sol verdadero, respecto a él. Esas

diferencias de tiempo que alcanzan valores del orden de las decenas de minutos, se muestran en la ecuación de tiempo.

Viendo la gráfica, **se acaba primero el día sidéreo que el día solar medio**. Para que termine el día solar, falta la rotación entre A y B, cuyo valor es aproximadamente 1° . Por tal circunstancia, el día solar dura 3 minutos 56,555 segundos de tiempo más que el día sidéreo. Acumulando estos valores, aparece en consecuencia el año bisiesto con lo cual nos empalmamos al año tropical, aunque no exactamente.

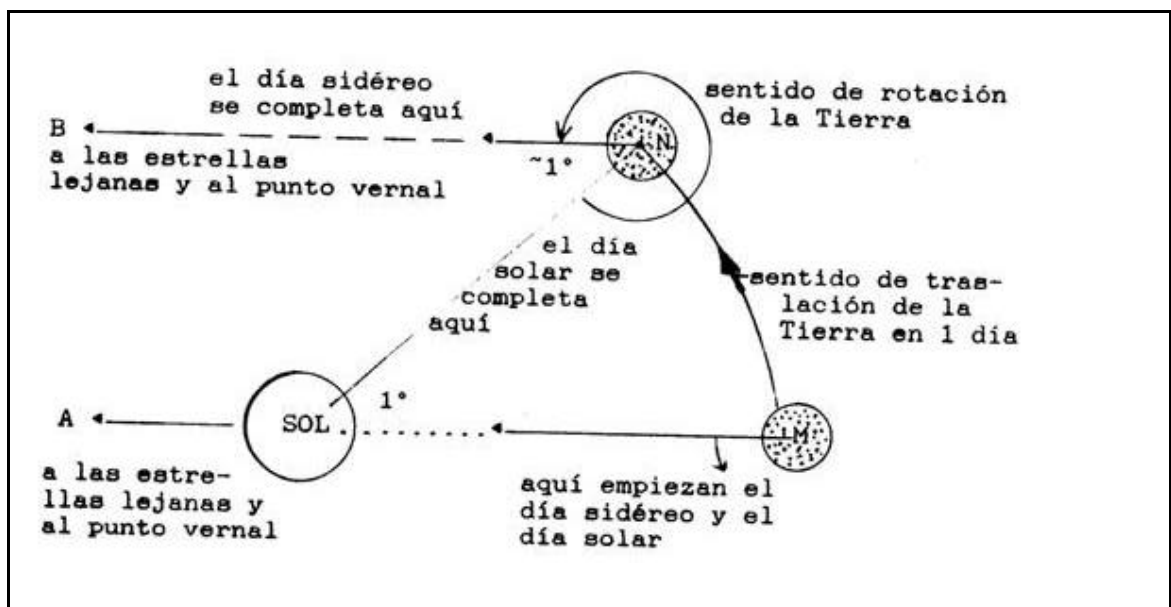


Figura 4.1 Día sidéreo y día solar: el día sidéreo es más corto que el día solar en casi un grado, puesto que por la traslación, el Sol parece haberse quedado atrás respecto de las estrellas del fondo (A y B se encuentran en el infinito).

El **tiempo sideral** se mide con relación al punto vernal. Un día sideral vale $365,2422/366,2422$ días solares medios. Pero esto supone dejar de lado ciertas irregularidades de la rotación terrestre y el movimiento del polo para poder medir el tiempo sideral con el ángulo horario del punto vernal desde una posición dada.

El **tiempo tropical** se mide con relación a las estrellas. Un año trópico vale $3666,2422$ días solares medios o también $3666,2422$ días siderales.

Se denomina **culminación superior** de un astro, al paso del astro por el punto más alto sobre el horizonte del observador.

El día sidéreo es el intervalo de tiempo entre dos culminaciones unívocas del punto vernal. El tiempo sidéreo se mide por el ángulo horario del punto vernal. El día solar verdadero, a diferencia del anterior, es el intervalo entre dos culminaciones superiores o inferiores consecutivas del Sol y, el tiempo solar verdadero se mide por el ángulo horario del Sol.

El inicio del día sidéreo es la culminación superior del punto vernal, mientras que el comienzo del día solar es la medianoche, por lo tanto el tiempo solar es igual al ángulo horario del Sol más 12 horas. La duración del día solar verdadero, en el transcurso del año, varía a consecuencia de la velocidad no uniforme del Sol por la eclíptica y también por la inclinación entre la eclíptica y el ecuador celeste ($23^{\circ} 27'$).

Gonzalo Duque-Escobar

Por ello aparece un nuevo concepto: "**Día solar medio**". Utilizando un Sol medio imaginario que se mueve uniformemente por el ecuador celeste, realizando una vuelta completa durante un año tropical.

El **año sidéreo**, es el período necesario para que el Sol ocupe la misma posición en la órbita aparente respecto a una estrella fija, y equivale a 365,2564 días solares medios.

El **año tropical** es una revolución de la Tierra alrededor del Sol, hasta ubicarse nuevamente respecto de la misma estrella del fondo. Dicho año, es casi igual al año sidéreo, el que se toma con relación a t ; pero el punto vernal por el movimiento de precesión, modifica su posición respecto a las estrellas del fondo en 50,26" por año.

El **tiempo solar medio** se mide por el ángulo horario del Sol medio. La duración de este día es constante. La ecuación de tiempo es igual al tiempo medio menos el tiempo verdadero y por lo tanto, será igual a la ascensión recta del Sol verdadero menos la del Sol medio. Esas diferencias entre los tiempos medio y verdadero a lo largo del año se publican en las **efemérides** de cada año Calendario astronómico del año en curso.

Si llamamos m el tiempo solar medio, s el tiempo sidéreo y So el tiempo sidéreo a mediodía, expresado en m horas, la **conversión de un tiempo** sidéreo en intervalo de tiempo solar medio, se da por la fórmula:

$$S - S_0 = m + (3\text{min } 56 \text{ seg}) m/ 24$$

TU, TE, GMT Y TD. En los observatorios hay generalmente un reloj que marca el tiempo sideral del lugar, con el fin de hacer las observaciones, tomando de partida el punto Aries. El tiempo sideral de **Greenwich** puede venir tabulado en los almanaques astronómicos, a fin de transformar el tiempo sideral local en éste último, según nuestra longitud astronómica. Otras escalas de tiempo, además del tiempo medio de Greenwich (GMT), son: el universal (TU), el de efemérides (TE) y dinámico (TD).

Se denomina **tiempo universal** el tiempo zonal del meridiano de Greenwich. Pero hay defectos en la uniformidad de este tiempo basado en la rotación de la Tierra. Para uniformar la escala se recurre al tiempo newtoniano que se presenta en las efemérides, como tiempo de efemérides TE. Desde 1984 se utiliza el tiempo dinámico terrestre de gran utilidad en la mecánica celeste.

El tiempo de Greenwich es 12 horas inferior al TU, por lo tanto:

$$\text{TU} - \text{GMT} = 12 \text{ horas}$$

4.4. ECUACION DE TIEMPO

Se llama Ecuación de Tiempo a la expresión **W** que permite evaluar cada día los minutos que tarda o que se adelanta el Sol, en su paso por el meridiano, con relación al reloj: **m** es el tiempo del reloj de pulso con cronómetro y **v** el tiempo verdadero en el cual pasa el Sol obtenido con la sombra en un reloj de Sol. Se trata aquí de encontrar la ecuación de empalme entre los dos relojes.

Siendo **W** la diferencia entre el tiempo medio **m** y el verdadero **v**, tendremos que la diferencia es mayor a comienzos de noviembre, cuando el tiempo solar medio está a más de 16 minutos por detrás del tiempo solar aparente, y a mediados de febrero cuando el tiempo solar medio va más de 14 minutos por delante del tiempo solar aparente. Los dos son iguales cuatro veces al año, el 15 de abril, el 14 de junio, el 1° de septiembre y el 25 de diciembre.

Siendo la ecuación de tiempo, una función que puede representarse con **W = m - v**, tenemos en el siguiente diagrama el valor de **W en minutos, a lo largo del año** -ver la línea continua- cuya ordenada es la suma de las ordenadas de las funciones m y v:

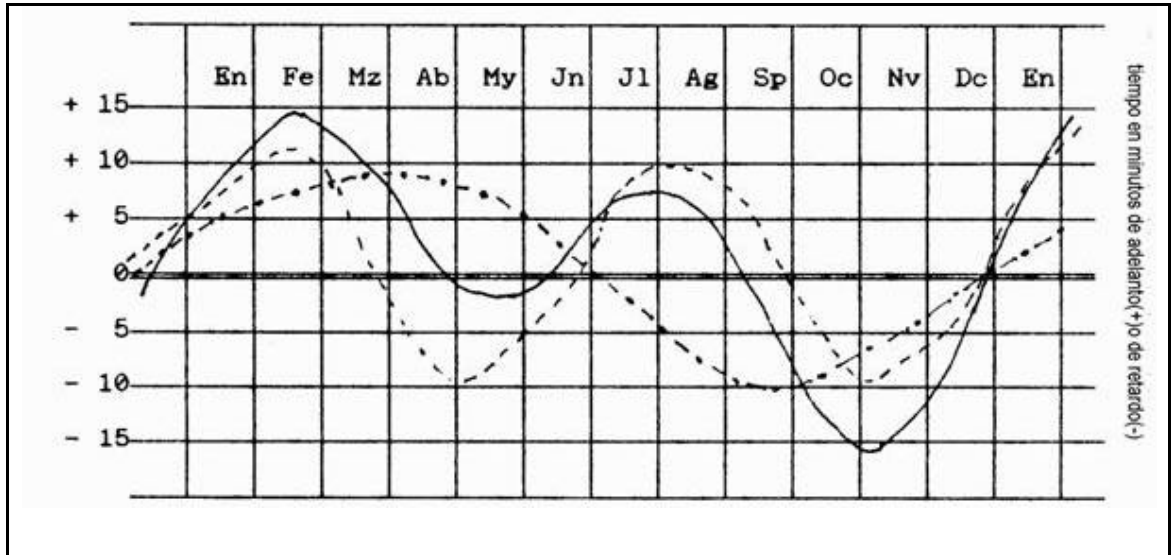


Figura 4.2 – A. La ecuación de tiempo: --- Ecuación de Tiempo; --- Función de la inclinación de la eclíptica; -·-·- Función de la excentricidad de la órbita terrestre.

También se puede representar la ecuación de tiempo con la siguiente curva. En ella, w es la diferencia v menos m , por lo que los datos se ofrecen con signo contrario a los de la gráfica anterior. Se puede aproximar por la siguiente fórmula.

$$E = 9.87 \cdot \text{sen}(2B) - 7.53 \cdot \text{cos}(B) - 1.5 \cdot \text{sen}(B)$$

Donde:

$$B = 360 \cdot \frac{N - 81}{365}$$

$N = \text{día del año}$

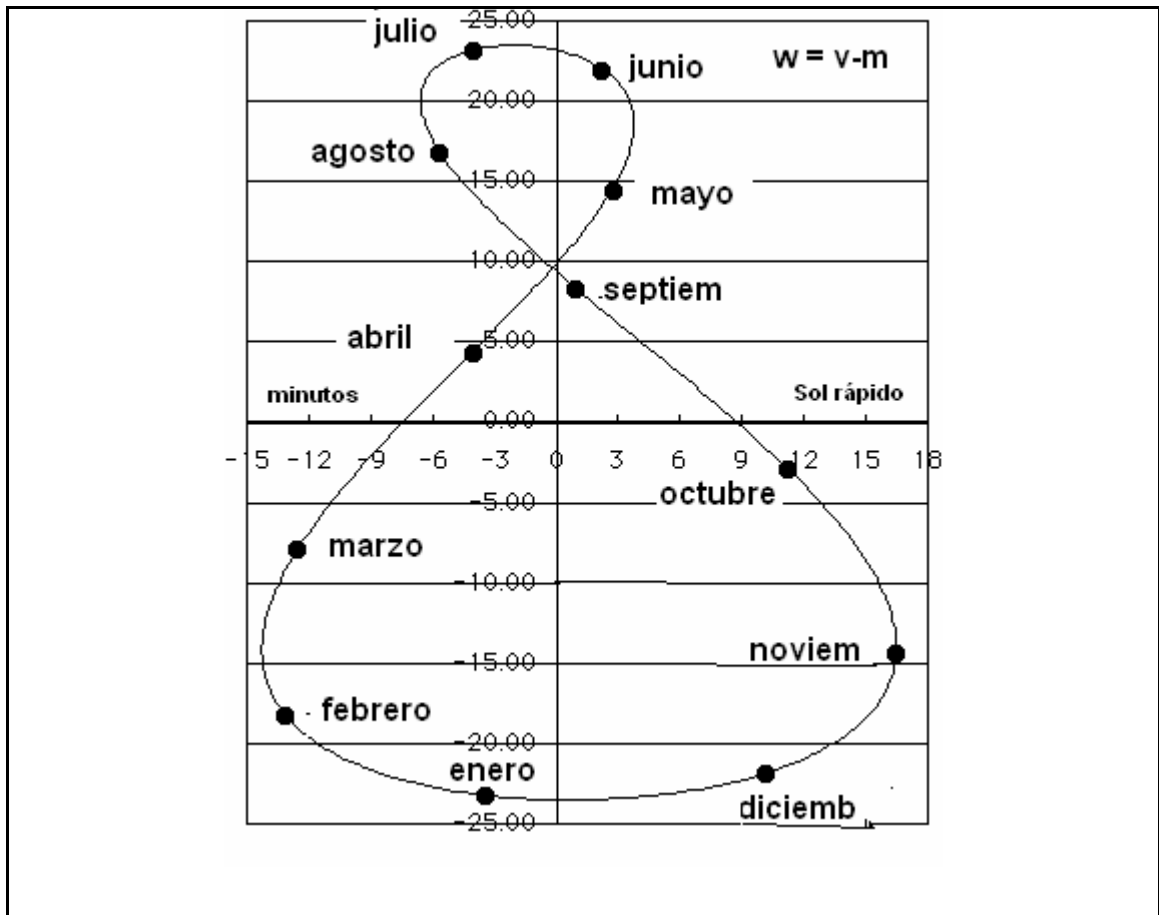


Figura 4.2 – B. Ecuación de tiempo: la función denominada ecuación de tiempo de la gráfica expresando de otra forma la diferencia del tiempo verdadero menos el tiempo medio. Adaptado de Diccionario Rioduero de la Física y el Espacio.

4.5. CALENDARIOS

Antes de Galileo el concepto de tiempo que manejaba la humanidad, era el de un **tiempo discreto**: entre una y otra puesta del Sol se tenía el día, cada fase de la Luna daba la idea de una semana, entre una Luna nueva y la siguiente el lapso era un mes, entre una primavera

y otra, o entre dos posiciones homólogas entre el Sol y una constelación, se tenía el año. Después de Galileo el tiempo se comprende como una **función continua**: la velocidad con la cual se desplazan los objetos y la aceleración como una variación de la velocidad, son dos magnitudes que suponen el transcurrir continuo del tiempo.

Nos ocuparemos aquí del tiempo en su primera versión. Esa dimensión siempre fue importante para el hombre que depende de los ciclos de la caza, la pesca y las cosechas de la tierra. También lo es hoy si comprendemos la ciudad, desde el punto de vista cosmológico, como el espacio reticulado controlado por la hora.

Los calendarios suelen ser solares, lunares y lunisolares, y sus bases son los siguientes períodos en días solares medios:

Calendario solar: basado en el movimiento anual de la Tierra alrededor del Sol.

Calendario lunar: basado en el ciclo de las fases de la Luna en el que 12 meses sinódicos constituyen un año lunar.

Calendario Juliano: iniciado en el año 46 a. C. por el emperador romano Julio César. Consistía en 365 días por año, con un día adicional añadido cada cuatro años. Esto daba una extensión media de 365.35 días, algo más que la duración del año tropical. Por esa razón el calendario juliano se iba desajustando lentamente de las estaciones.

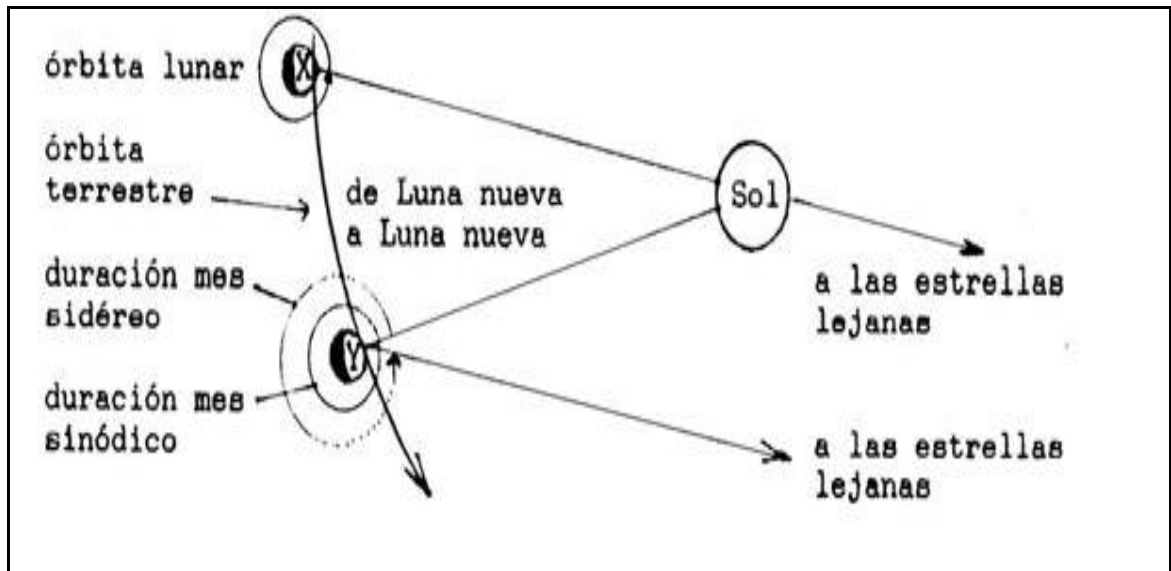


Figura 4.3. Mes sidéreo y mes sinódico: XY es el movimiento de la Tierra en un mes (entre dos lunaciones). El punto vernal casi se mantiene con las estrellas del fondo. Cada año sufre un pequeño desplazamiento de $50''{,}26$ de arco debido a la precesión.

NOTA: la órbita de la Luna hace 5° con la eclíptica $s s'$

Calendario Gregoriano: utilizado para la mayoría de los fines en el mundo, e iniciado por el papa Gregorio XIII en 1582. La regla del calendario juliano para fijar los años bisiestos (según la cual había que intercalar un día adicional cada cuatro años), fue modificada en el sentido de considerar años bisiestos, de 366 d, todos aquellos años cuyas dos últimas cifras fuesen exactamente divisibles por 4, pero conservando como años comunes, de 365 días, aquellos años que, siendo un número entero de centenas, no son divisibles por 400, por ejemplo: 1700, 1800, 1900, etc. si el año es múltiplo de 400 es bisiesto, por ejemplo: 1600, 2000, 2400.

Así, la duración en días del año y el mes, según sean estos, es de así:

- El año gregoriano tiene una duración media de 365,2425 días.
- Año tropical = 365 d 5 h 48 m 46 seg. o 365,24220 días solares medios
- Mes sinódico = 29 d 12 h 44 m 3 seg. o 29,53059 días solares medios
- El mes sinódico dura más que el mes sidéreo, (27,3217 d s m).
- El año tropical es ligeramente más corto que el año sidéreo por la precesión del punto vernal hacia el Sol (de B a A); pero se pueden asumir iguales dada la insignificante diferencia de tiempo.
- El mes anómalo es el tiempo que tarda la Luna entre dos perigeos. Ella recorre su órbita en 27,3216 días solares medios.
- El año anómalo es el tiempo que tarda la Tierra entre dos perihelios consecutivos, es decir, lo que demora la Tierra para recorrer su órbita. Es más largo que el año sideral porque dura 365,2596 días solares medios contra 365,2564 días del año sideral.
- Año lunar: duración de 12 meses sinódicos o 354 días solares medios. El año solar es igual al año tropical.
- Mes draconico: período transcurrido entre dos pasos de la Luna por el nodo ascendente de 27,2122 días solares medios. Los nodos lunares tienen una regresión de 19° cada año; su órbita hace 5° con s s'.

4.6. PERIODO ENTRE DOS CONFIGURACIONES HOMONIMAS

A veces queremos saber cuando vuelven a alinearse los planetas o a repetirse los eclipses. El problema empieza por calcular el intervalo entre una y otra conjunción u oposición. Ese intervalo de tiempo es lo que se denomina revolución sinódica de un planeta.

$1/T = 1/S + 1/P$ <p>planeta superior</p>	$1/S = 1/P + 1/T$ <p>planeta inferior</p>
---	---

- S = período sidéreo u orbital de un planeta alrededor del Sol
- T = duración de un año, en la Tierra (en las mismas unidades de S y P).
- P = intervalo de tiempo entre dos configuraciones homónimas del planeta (período sinódico)

4.7. CICLOS

Ciclo de Saros: se denomina al período de $6585 \frac{1}{3}$ días (18 años, $11 \frac{1}{3}$ días); es el intervalo de tiempo de 242 meses dracónicos, después de cuyo transcurso la Luna vuelve a adoptar la misma posición respecto del Sol, la Tierra y la línea nodal, de forma que los

eclipses de Sol y de Luna vuelven a repetirse con el mismo ciclo. En la antigüedad se empleó para predecir eclipses (ver Historia de la Astronomía).

Ciclo solar: intervalo de tiempo de 28 años, en el que después de su transcurso, los días de la semana vuelven a caer en el mismo día del mes del calendario juliano.

Ciclo metónico: se conoce como ciclo lunar. Es el intervalo de tiempo de 6140 días, iguales a 19 años solares, que son aproximadamente 235 meses lunares sinódicos (125 meses de 30 días, 110 de 29 días). Este ciclo reconocido por Meton el año 32 a.C.; es fundamento del calendario lunisolar griego.

Los movimientos de la Tierra. Son cuatro los movimientos fundamentales de la Tierra. El de rotación, consistente en un giro sobre su propio eje y en dirección oeste-este, cuyo período es de 23 h 56 m 4 s; por él se explica el intercambio del día y la noche. El de traslación, por el que describe la órbita alrededor del Sol en 356 d 5 h 48 m y 46 s, recorriendo 936 millones de Km a una velocidad de 29,8 k/s; en el afelio, a comienzos de julio la distancia Tierra-Sol es 152 millones de Km y en el perihelio de 147 millones de Km.

El eje terrestre, por su oblicuidad de $23^{\circ} 27'$ motiva el cambio de estaciones en el año: después de un otoño y un invierno, descansa la naturaleza y se suceden la primavera; después de una primavera y un verano, agotada la naturaleza, llega el otoño. En 25800 años el eje de rotación describe un cono circular, tras un movimiento conocido como la precesión de los equinoccios. El cuarto movimiento de la Tierra, es el que lleva por

Gonzalo Duque-Escobar

acompañar al Sol en su órbita galáctica, la cual recorre en un período de 230 millones de años, a una velocidad de 220 Km/s.

La precesión es el resultado del efecto de gravitación del Sol y la Luna sobre el pliegue del ecuador terrestre, rico en masa, que intenta poner el eje terrestre perpendicular a la eclíptica. Por este movimiento del eje terrestre alrededor del eje polar eclíptico (pp'), el punto de primavera (t) adelanta 50,26 segundos de arco al año. Los astrólogos denominan las eras, por la constelación sobre la cual se encuentre el punto vernal y cada una de ellas dura la doceava parte de 25800 años. Se trata de la variación espacial, en el tiempo de la intersección del ecuador celeste (QQ') con el plano de la eclíptica, y del cambio de estrella polar, que en época de las pirámides fue Thuban del Dragón.

Debe advertirse que en tiempos geológicos varían la excentricidad de la órbita terrestre y la inclinación del eje polar.

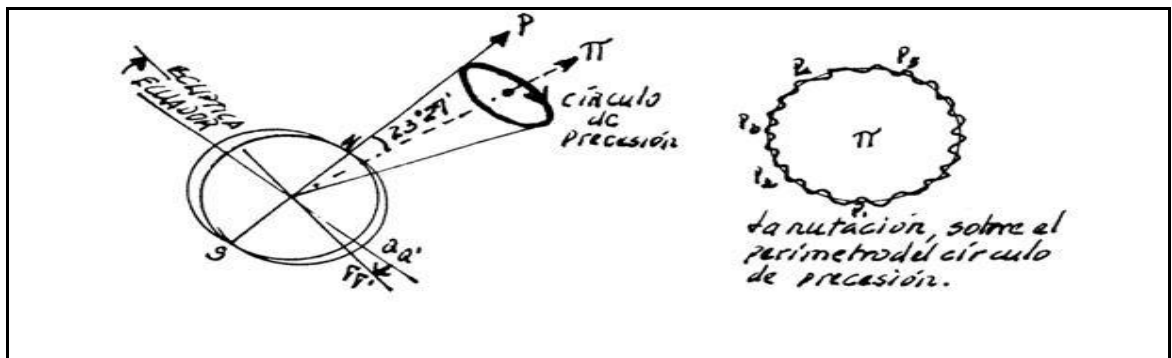


Figura 4.4 Precesión de los equinoccios: movimiento de peonza de la Tierra, a causa de la atracción lunisolar. Su período de 25800 años desplaza el punto vernal, entre constelaciones del zodiaco, a razón de 50",26 de arco por año, cada 2150 años

Los movimientos de la Luna. Ella gira la Tierra de occidente a oriente, en un movimiento que permite distinguir dos períodos de revolución: el sidéreo, tomando como referencia una estrella, de 27 d 7 h 43 m y 11,47 s, y el sinódico, tomado con relación al Sol (llamado también lunación o mes lunar), de 29 d 12 h 44 m 2,78 s.

La rotación de la Luna sobre su eje tienen una duración igual al mes sidéreo, por lo que **siempre presenta la misma cara**. A pesar de ello, desde la Tierra se ve algo más de un hemisferio lunar (59% de su superficie), debido a unos balanceos aparentes llamados libraciones.

La Luna posee otros movimientos, como el retrógrado de los nodos, con una duración de 18,6 años, y el que afecta la línea de los ápsides. El primero origina la llamada revolución anomalística. El movimiento de precesión de los equinoccios da lugar a la revolución trópica.