



Laurea triennale in Fisica
a.a. 2016 - 2017

CORSO DI ASTRONOMIA

LEZIONE 2

Parametri fisici della Terra



$$R_E = 6\,378\,137 \text{ m}$$

$$R_P = 6\,356\,752 \text{ m}$$

$$\Delta R = 21\,385 \text{ m.}$$

$$R_M = 6\,372\,797 \text{ m}$$

$$\text{schacciamento} = \Delta R/R_E = 1/298 = 0,003353.$$

Parametri fisici della Terra



Lunghezza equatore = 40 075 017 m,

Circolo Meridiano = 39 940 650 m.

Parametri fisici della Terra



Superficie totale = 509 495 000 km²

Mari = 361 640 000 km² (70,98%)

Terre emerse 147 855 000 km² (29,02%)

Profondità media degli oceani = 3794 m

Profondità massima = 10 924 m: Fossa delle Marianne

Altezza media dei continenti = 874 m l.m.

Altezza massima = 8850 m: Monte Everest

Parametri fisici della Terra



Massa = $5,9726 \cdot 10^{24}$ kg

Densità media = 5515 kg/m³

$v_F = 11,18$ km/s = 40 248 km/h.

$$g = 9,7803184(1 + A \sin^2 \varphi - B \sin^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} h \quad \text{in m/s}^2$$

$$A = 0,0053024$$

$$B = 0,0000059$$

φ è la latitudine

h è l'altezza sul livello del mare in metri

Temperatura media = 15°C ; massima = 60°C ; minima = -90°C .

I moti della Terra



IL MOTO DI ROTAZIONE

Il ciclo del dì e della notte



IL MOTO DI RIVOLUZIONE

Il ritmo delle stagioni



I MOTI SECONDARI (MILLENARI)

Moto biconico

Nutazione

Variazione dell'inclinazione

Polodia

Rotazione della linea degli apsidi

Precessione degli equinozi

Variazione della distanza tra i fuochi

Moto di traslazione

Conseguenze dei moti millenari della Terra

Il moto di rotazione della Terra

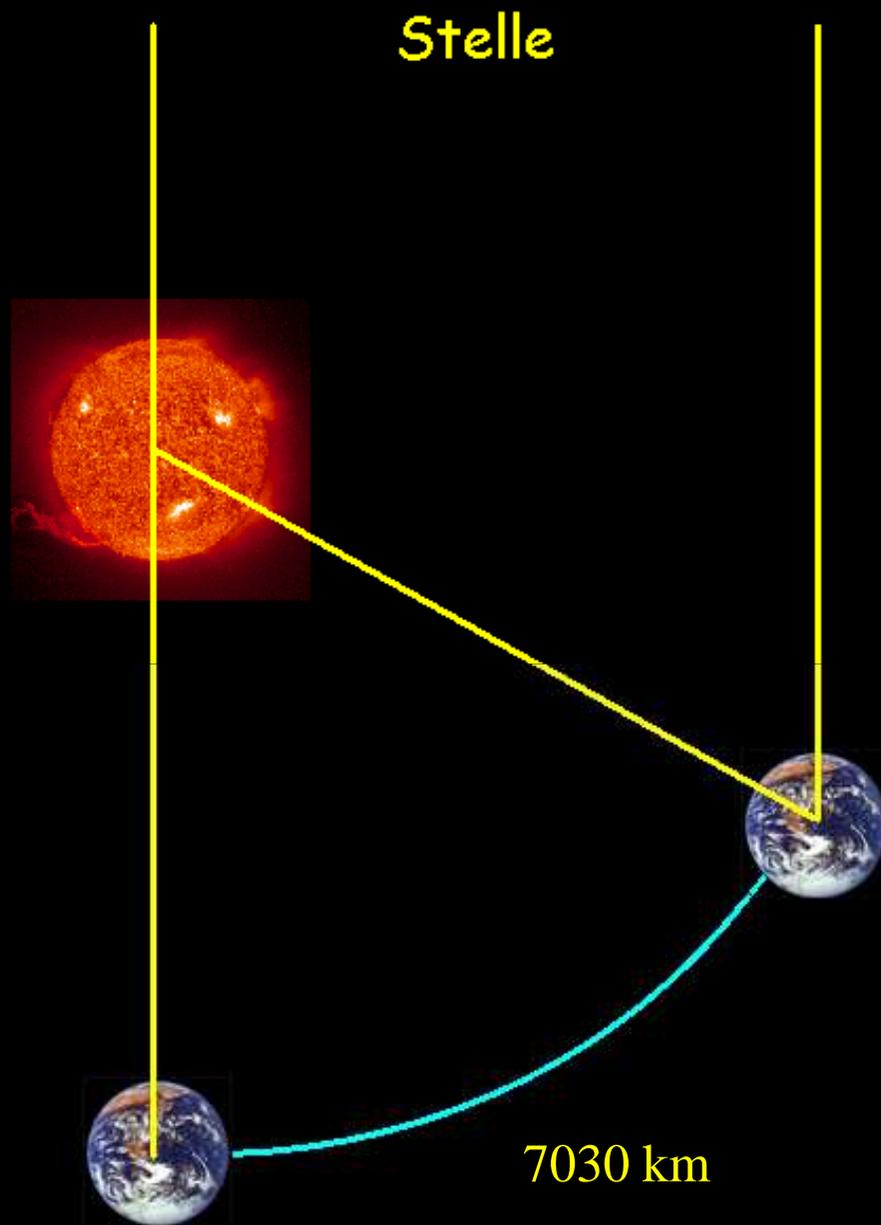
È il moto che la Terra compie intorno al proprio asse, da ovest verso est, cioè in senso inverso all'apparente moto diurno della Sfera Celeste e del Sole.

Il periodo di rotazione è di 23,9344726 ore = 23h 56min 4,1s.

Il tempo che impiega il Sole per ritornare nella stessa posizione del cielo è di 24 ore ed è il giorno solare medio.

$$\frac{t_{\text{SOLARE}}}{t_{\text{SIDERALE}}} = \frac{24}{23,9344726} = 1,00273778$$

Giorno solare e giorno sidereo



Il moto di rotazione della Terra

La velocità angolare della Terra è di circa 15° ogni ora.

La velocità di un punto della superficie della Terra varia con la latitudine: è massima all'Equatore (circa $464 \text{ m/s} = 1670 \text{ km/h}$) e nulla ai poli.

$$v = \frac{2\pi R}{T} \cos \varphi$$

Alla latitudine di Camerino (Lat: $43^\circ 08' 24''$ Long: $13^\circ 04' 04''$) la velocità è di 338 m/s ($= 1218 \text{ km/h}$).

Il moto di rotazione della Terra

Le misure della durata del periodo di rotazione eseguite con orologi atomici hanno dimostrato che esiste un graduale rallentamento della velocità di rotazione che porta all'allungamento del giorni di circa **2 millesimi di secondo per secolo**.

Questo rallentamento si spiega con l'attrito delle maree: la Luna esercita un'azione frenante sulla Terra, perché questa ruota su se stessa più velocemente di quanto non faccia la Luna nel suo moto di rivoluzione intorno alla Terra.

Come conseguenza si ha anche un'accelerazione della Luna sulla sua orbita ed un aumento della forza centrifuga che tende ad allontanare la Luna dalla Terra.

Ciò si verificherà fino a quando la durata della rivoluzione della Luna attorno alla Terra non diverrà uguale alla durata della rotazione terrestre.

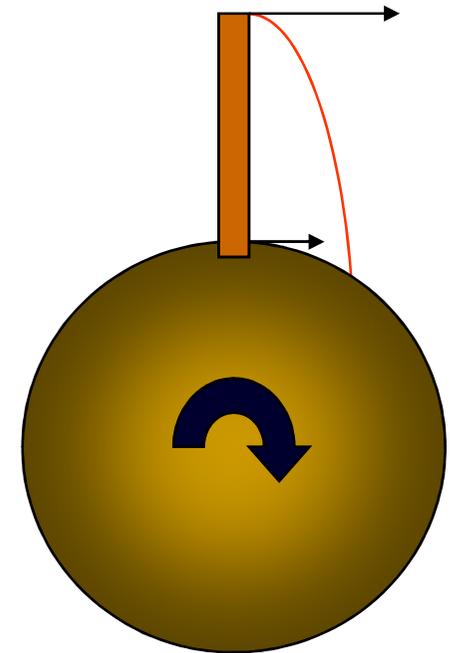
Prove della rotazione

Moto apparente dei corpi celesti da est verso ovest.

Analogia con il moto rotazionale degli altri pianeti.

Esperimento di G.B. Guglielmini (Bologna 1791 e 1792).

Esperimento del pendolo di Foucault.



Il ciclo del dì e della notte

La conseguenza più immediata del moto di rotazione è l'*alternarsi del dì e della notte*.

Poiché la rotazione si compie in un tempo molto più breve della intera rivoluzione intorno al Sole sulla superficie terrestre si alternano un periodo di illuminazione, che chiamiamo *dì*, e uno di oscurità, che chiamiamo *notte*. Con il termine *giorno* indichiamo il tempo dell'intera rotazione, cioè l'insieme del dì e della notte.

L'emisfero illuminato è diviso da quello in ombra dalla fascia del *crepuscolo*.

Ciò è dovuto agli effetti che l'atmosfera ha sui raggi del sole.



Il moto di rivoluzione della Terra

La Terra, come gli altri pianeti del Sistema Solare, compie un'orbita ellittica intorno al Sole in senso antiorario, immaginando di osservare il movimento dal Polo nord celeste.

Dalla I legge di Keplero, la distanza tra la Terra ed il Sole varia a seconda che la Terra si trovi in afelio ($d_A = 152\,097\,701$ km) o in perielio ($d_P = 147\,098\,074$ km); quella media è di 149.600.000 km.

La Terra viene a trovarsi in perielio tra il 2 e il 6 gennaio, in afelio tra il 3 e il 7 luglio.

L'eccentricità e dell'orbita è:

$$e = \frac{d_A - d_P}{d_A + d_P} = 0,01671$$

	Perielio	Afelio
Anno	Gennaio	Luglio
2010	3 alle 00	6 alle 11
2011	3 alle 19	4 alle 15
2012	5 alle 00	5 alle 03
2013	2 alle 05	5 alle 15
2014	4 alle 12	4 alle 00
2015	4 alle 07	6 alle 19
2016	2 alle 23	4 alle 16
2017	4 alle 14	3 alle 20
2018	3 alle 06	6 alle 17
2019	3 alle 05	4 alle 22
2020	5 alle 08	4 alle 12

Il moto di rivoluzione della Terra

L'orbita ha una lunghezza di circa 940 milioni di chilometri e viene percorsa ad una velocità variabile (II legge di Keplero) compresa tra 29,3 km/s in afelio ed i 30,3 km/s in perielio: mediamente circa 29,8 km/s.

Il tempo che la Terra impiega a compiere un'orbita completa, cioè l'effettiva durata della rivoluzione terrestre, è di 365,25636 d = 365d 6h 9min 9,5s e viene denominato *anno sidereo*.

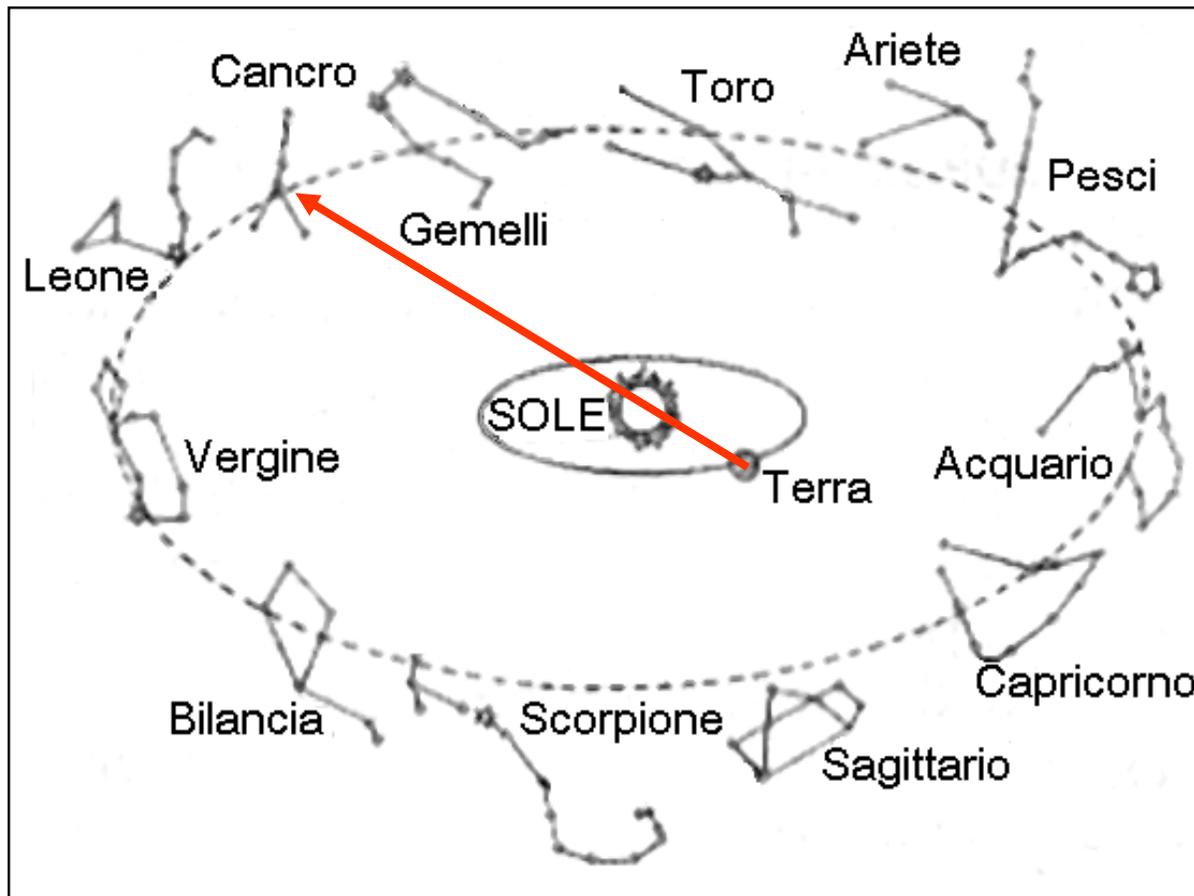
L'asse di rotazione della Terra è inclinato di $66^{\circ}33'$ rispetto al piano dell'orbita ($23^{\circ}27'$ rispetto alla normale a tale piano).

In realtà il sistema Terra-Sole si muoverebbe attorno al centro di massa comune che non è il centro del Sole, ma un punto che mediamente si trova a 450 km dal centro del Sole.

Il moto di rivoluzione della Terra

La rivoluzione della Terra è equivalente al movimento del Sole attraverso il cielo durante l'anno.

Se non ci fosse l'atmosfera a diffondere la luce solare, potremmo vedere il Sole muoversi lungo le costellazioni dello zodiaco.



Prove della rivoluzione terrestre

Analogia con gli altri pianeti del Sistema solare.

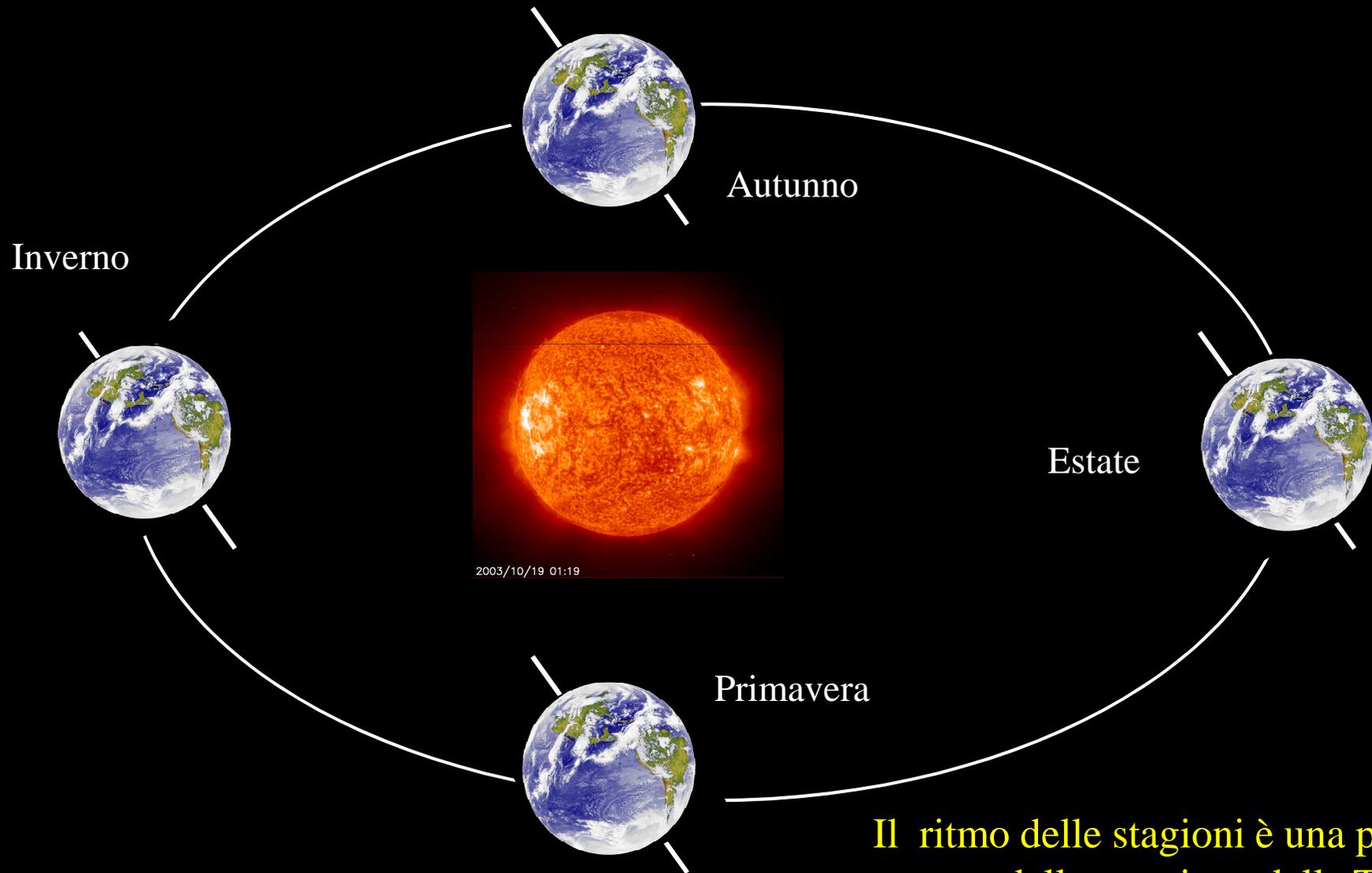
Periodicità annua di alcuni gruppi di stelle cadenti.

Aberrazione della luce stellare (scoperta nel 1727 da J. Bradley, dell'Osservatorio astronomico di Greenwich).

Quando noi osserviamo una stella, la direzione secondo cui la vediamo non è quella effettiva, data dalla congiungente il punto di osservazione con la stella, ma è solo una direzione apparente.

Per una stella la cui direzione vera sia perpendicolare alla direzione del moto dell'osservatore, l'angolo di aberrazione raggiunge il valore massimo (in perielio) che è di 20,50”.

Prove della rivoluzione terrestre

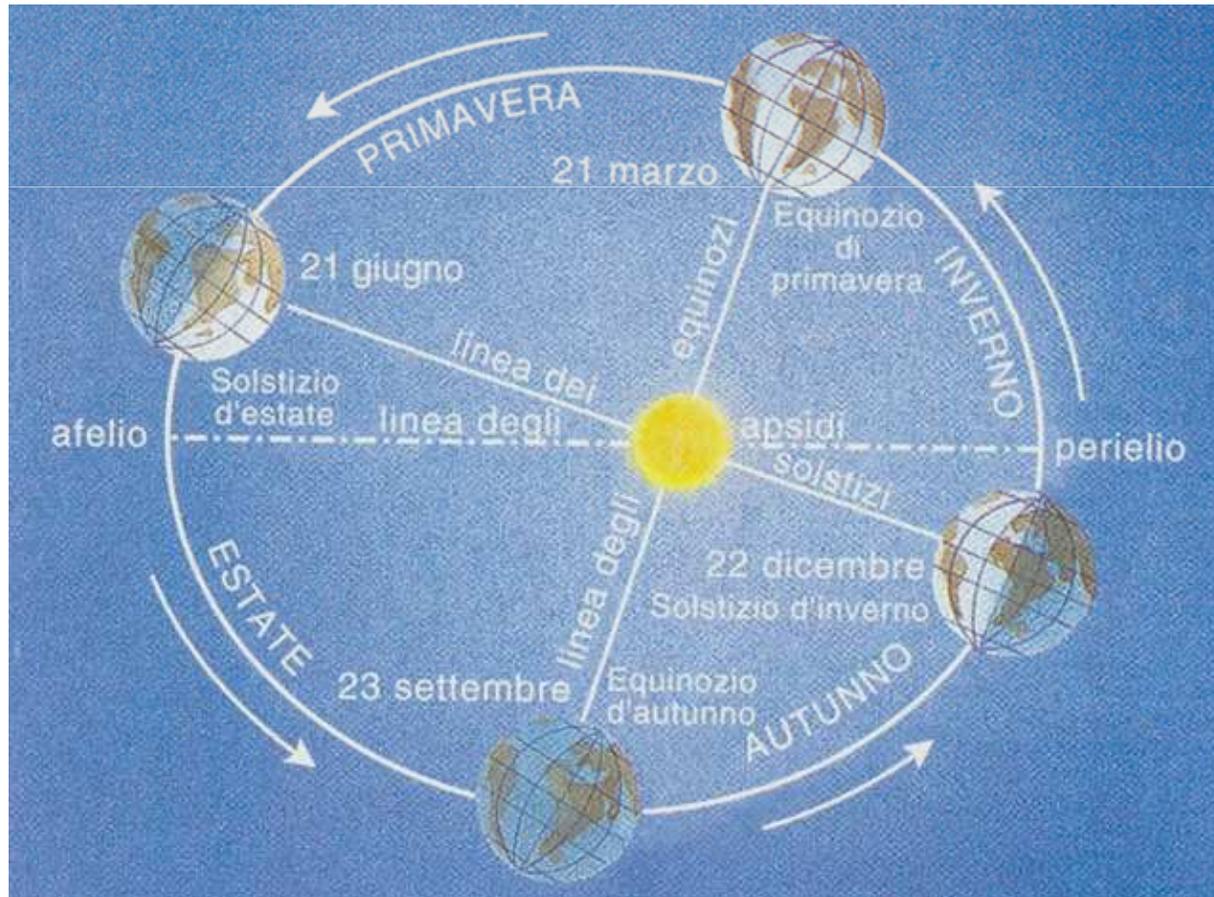


Il ritmo delle stagioni è una prova della rotazione della Terra.

Il ritmo delle stagioni

Durante un anno ci sono due giorni in cui la durata del dì e della notte sono gli stessi in tutti i punti della Terra:

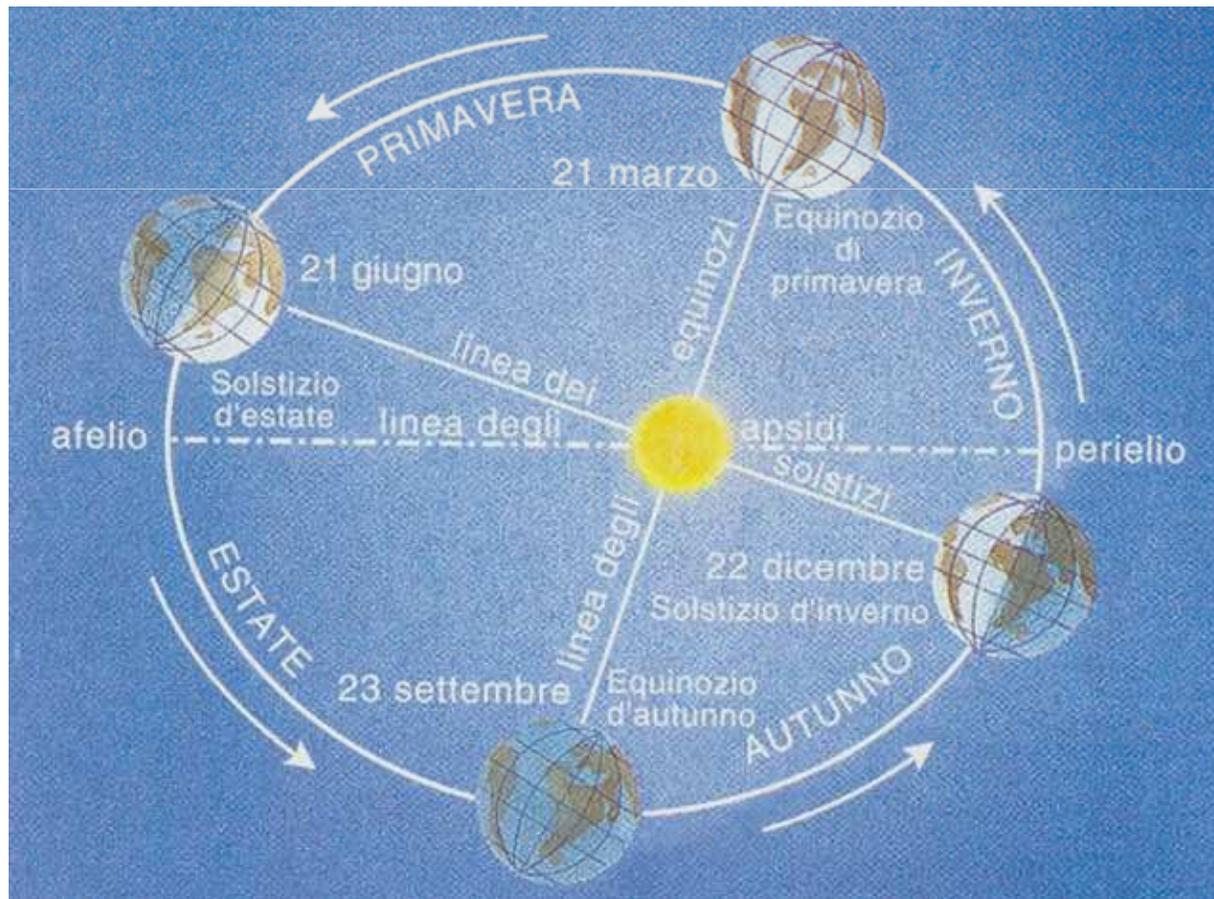
il 21 marzo (*equinozio di primavera*) e il 23 settembre (*equinozio d'autunno*).



Il ritmo delle stagioni

Il 21 giugno il sole è allo zenit nei punti che si trovano sul parallelo $23^{\circ} 27'$ Nord (tropico del Cancro) e in tutti i punti a nord di esso raggiunge la massima altezza dell'anno sull'orizzonte sud.

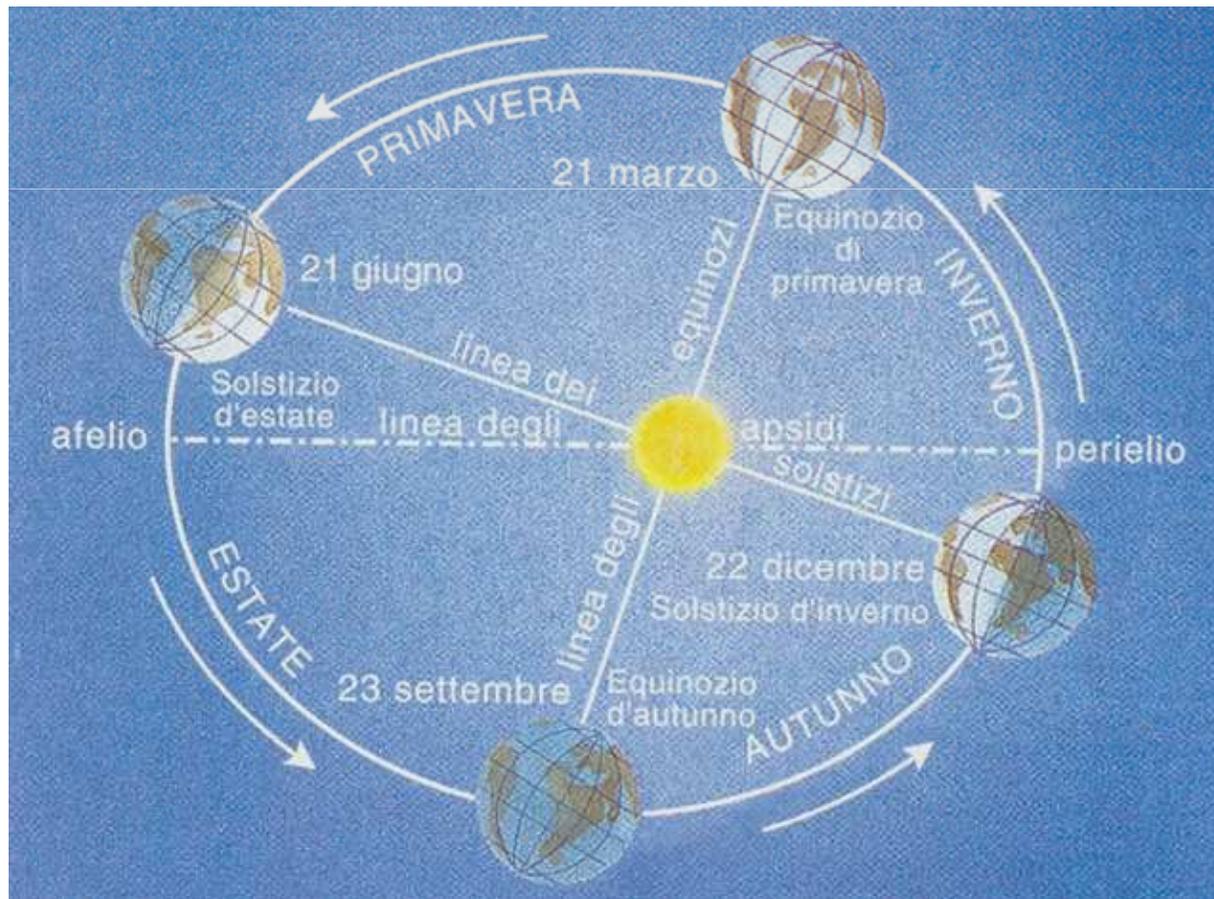
È il giorno del *solstizio d'estate*.



Il ritmo delle stagioni

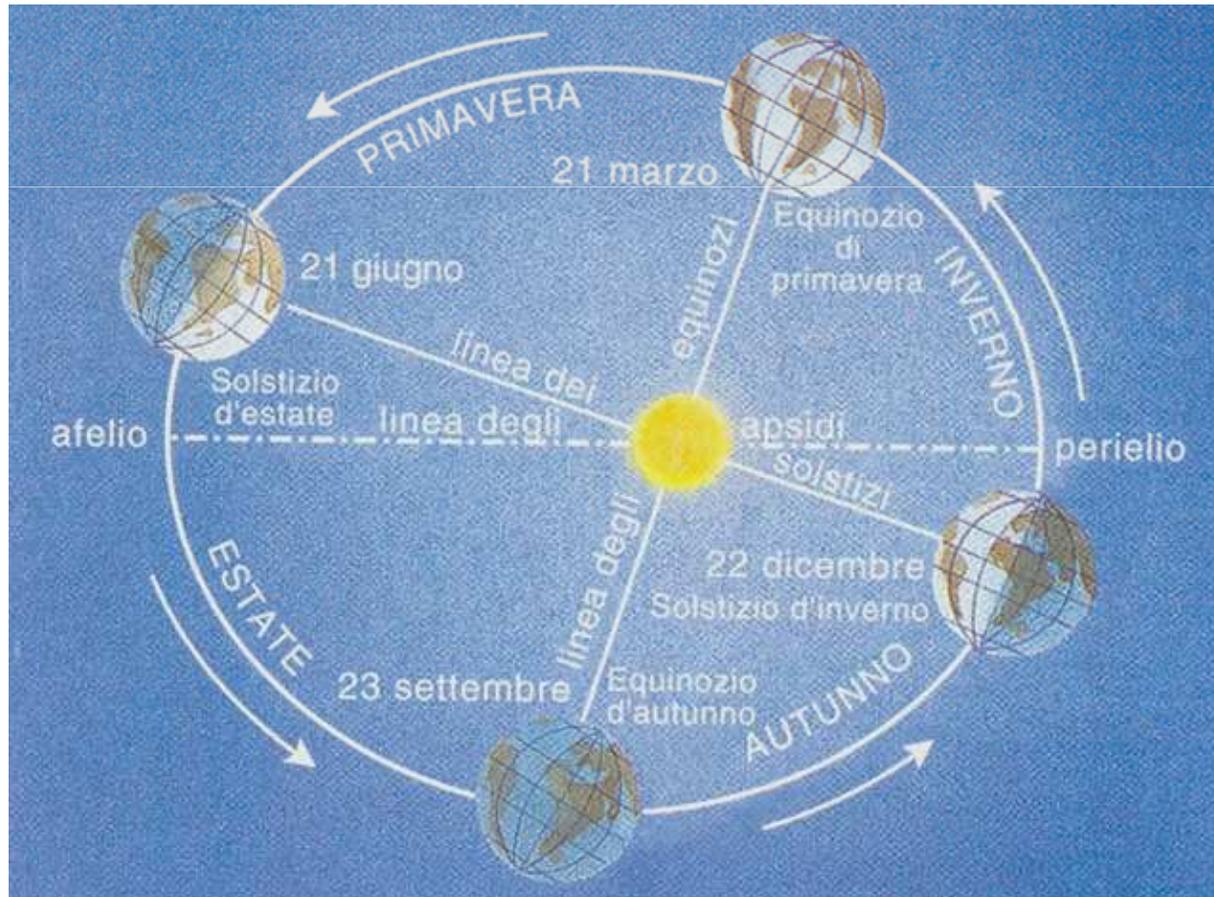
Il 22 dicembre il sole è allo zenit nei punti che si trovano sul parallelo 23° 27' Sud (tropico del Capricorno) e in tutti i punti a sud di esso raggiunge la massima altezza dell'anno sull'orizzonte nord.

È il giorno del *solstizio d'inverno*.



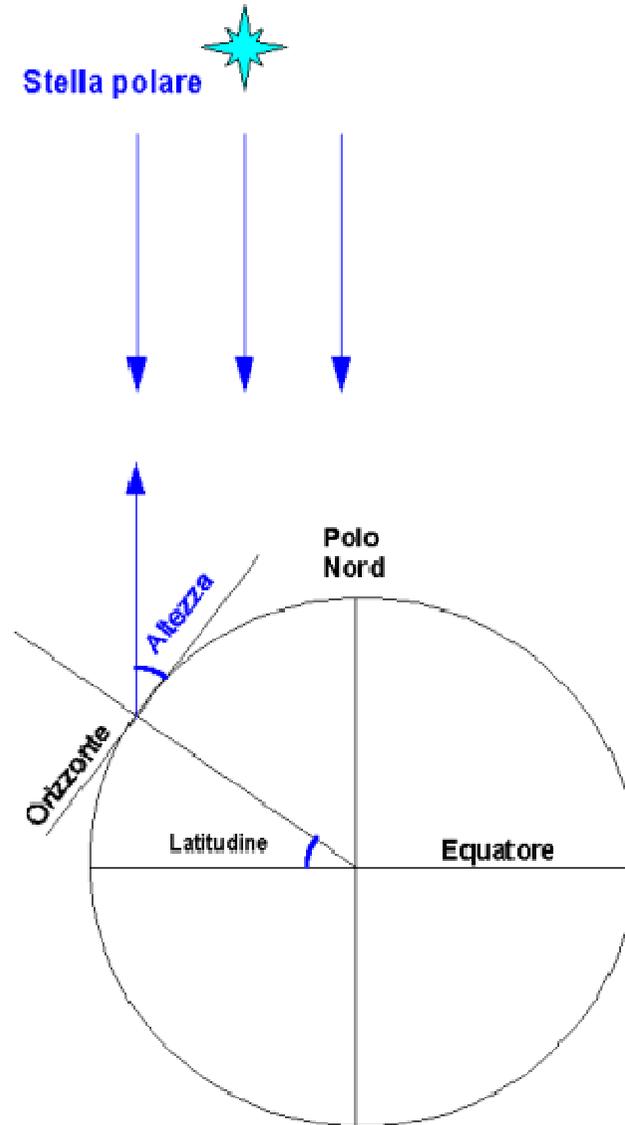
Il ritmo delle stagioni

La linea che unisce i punti dell'orbita dove capitano gli equinozi si chiama **linea degli equinozi** ed è perpendicolare alla linea che unisce i punti dell'orbita dove cadono i solstizi che viene detta **linea dei solstizi**.



Il ritmo delle stagioni

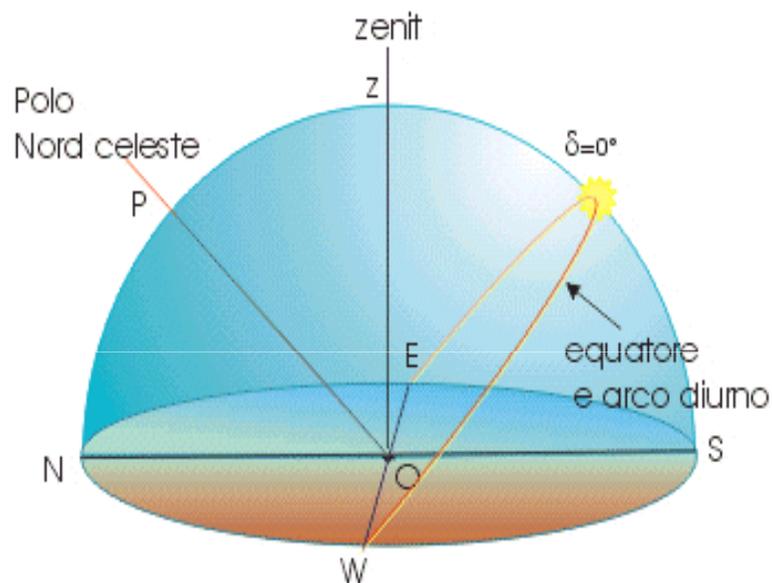
Altezza del Polo Nord Celeste sull'orizzonte



$$h = \varphi$$

Il ritmo delle stagioni

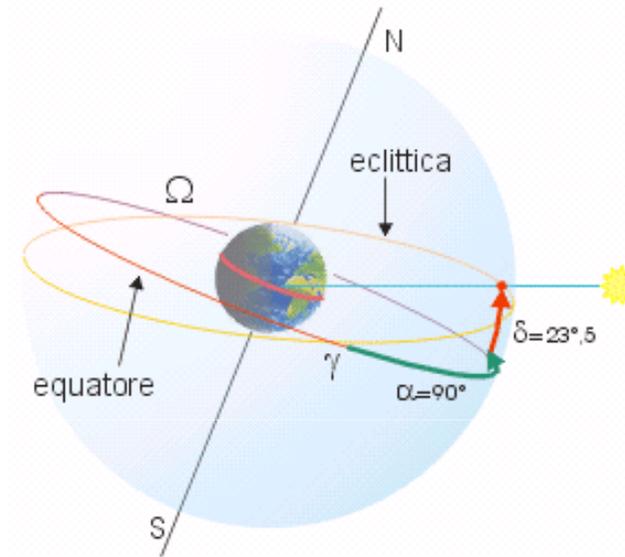
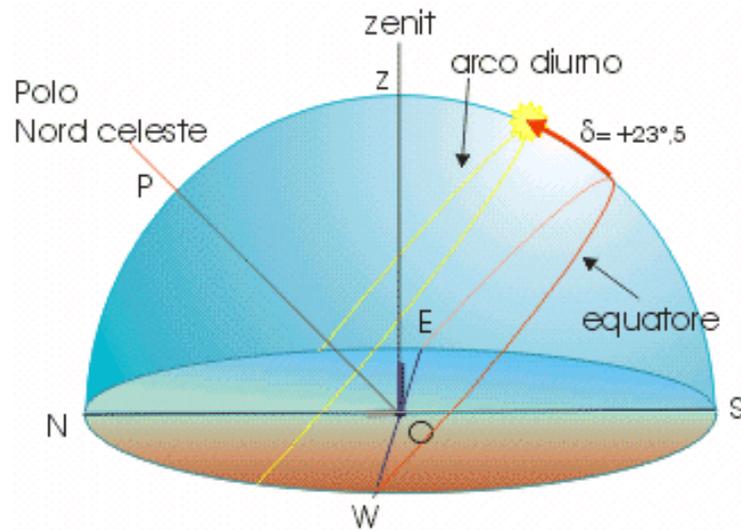
Come si vede il cielo all'equinozio



- Sole sorge esattamente a est e tramonta esattamente a ovest
- L'arco diurno è lungo quanto l'arco notturno (il dì è uguale alla notte)
- Coordinate del Sole
 $\delta=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$ primavera
 $\delta=0^\circ$, $\alpha=180^\circ$ autunno
- L'altezza del Sole a mezzogiorno è uguale alla colatitudine ($90^\circ - \varphi$) del luogo

Il ritmo delle stagioni

Come si vede il cielo al solstizio d'estate

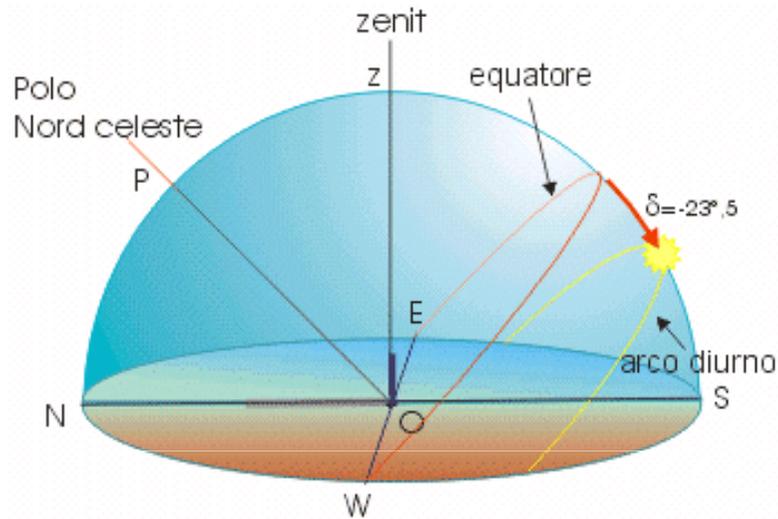


Coordinate equatoriali del Sole:
 $\delta = +23,5$ $\alpha = 90^\circ$

- Il Sole sorge a nord-est e tramonta a nord-ovest
- Il Sole raggiunge la declinazione massima e la massima altezza sull'orizzonte $(90 - \varphi + 23,5)^\circ$.
- L'arco diurno è massimo
- L'ombra di un oggetto raggiunge la sua minima lunghezza.

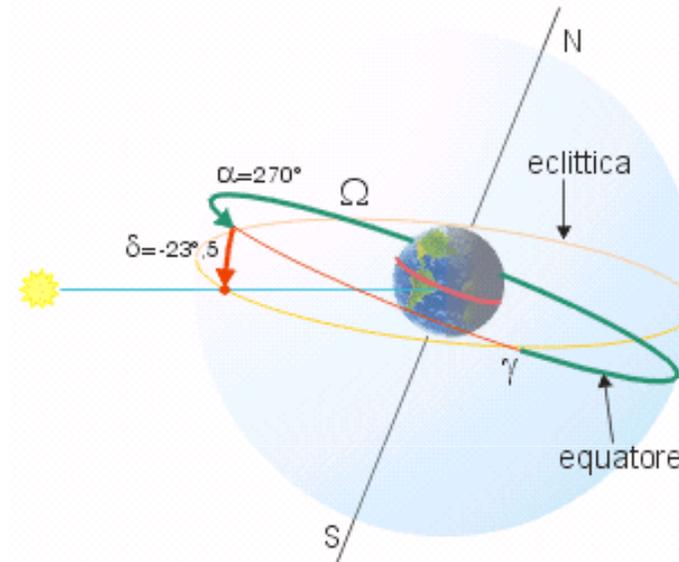
Il ritmo delle stagioni

Come si vede il cielo al solstizio d'inverno



Coordinate equatoriali del Sole:

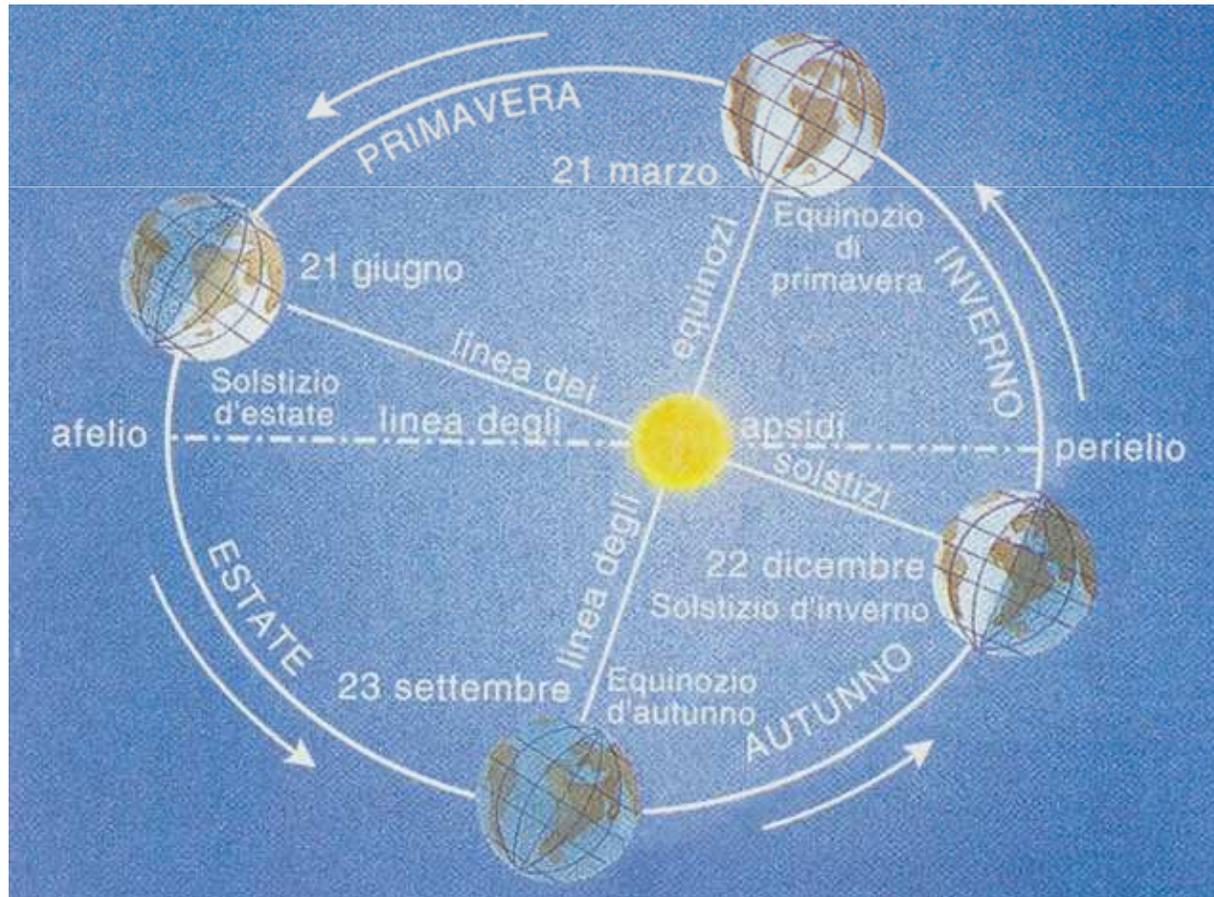
$$\delta = -23,5^\circ \quad \alpha = 270^\circ$$



- Il Sole sorge a sud-est tramonta a sud-ovest
- Il Sole raggiunge la sua minima declinazione e la sua minima altezza sull'orizzonte $(90 - \varphi - 23,5)^\circ$.
- L'arco diurno è più breve che in qualsiasi altro periodo dell'anno.
- Gli oggetti proiettano ombre lunghe

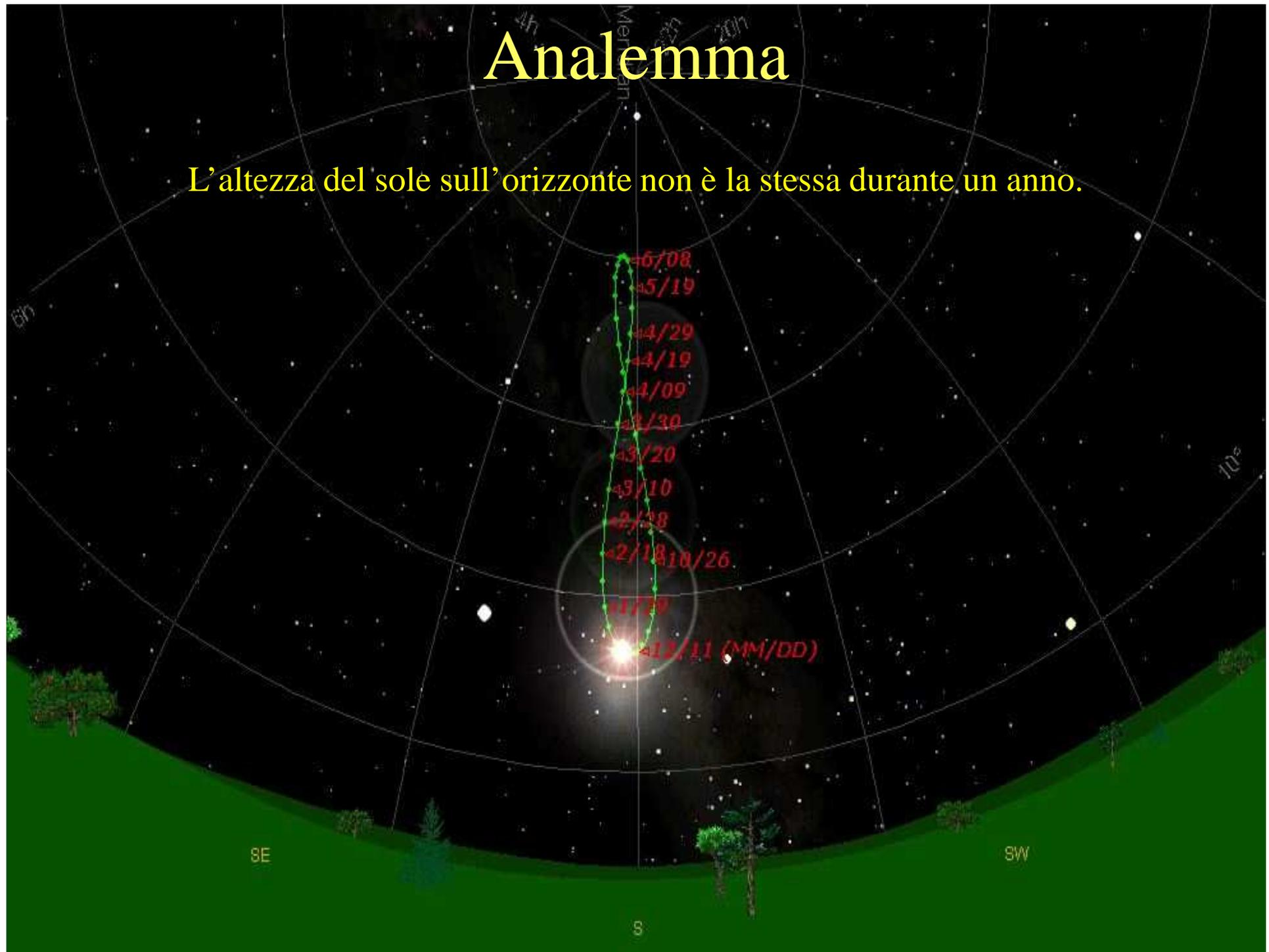
Il ritmo delle stagioni

La linea che unisce il perielio all'afelio si chiama *linea dei nodi*, oppure *linea degli apsidi*.

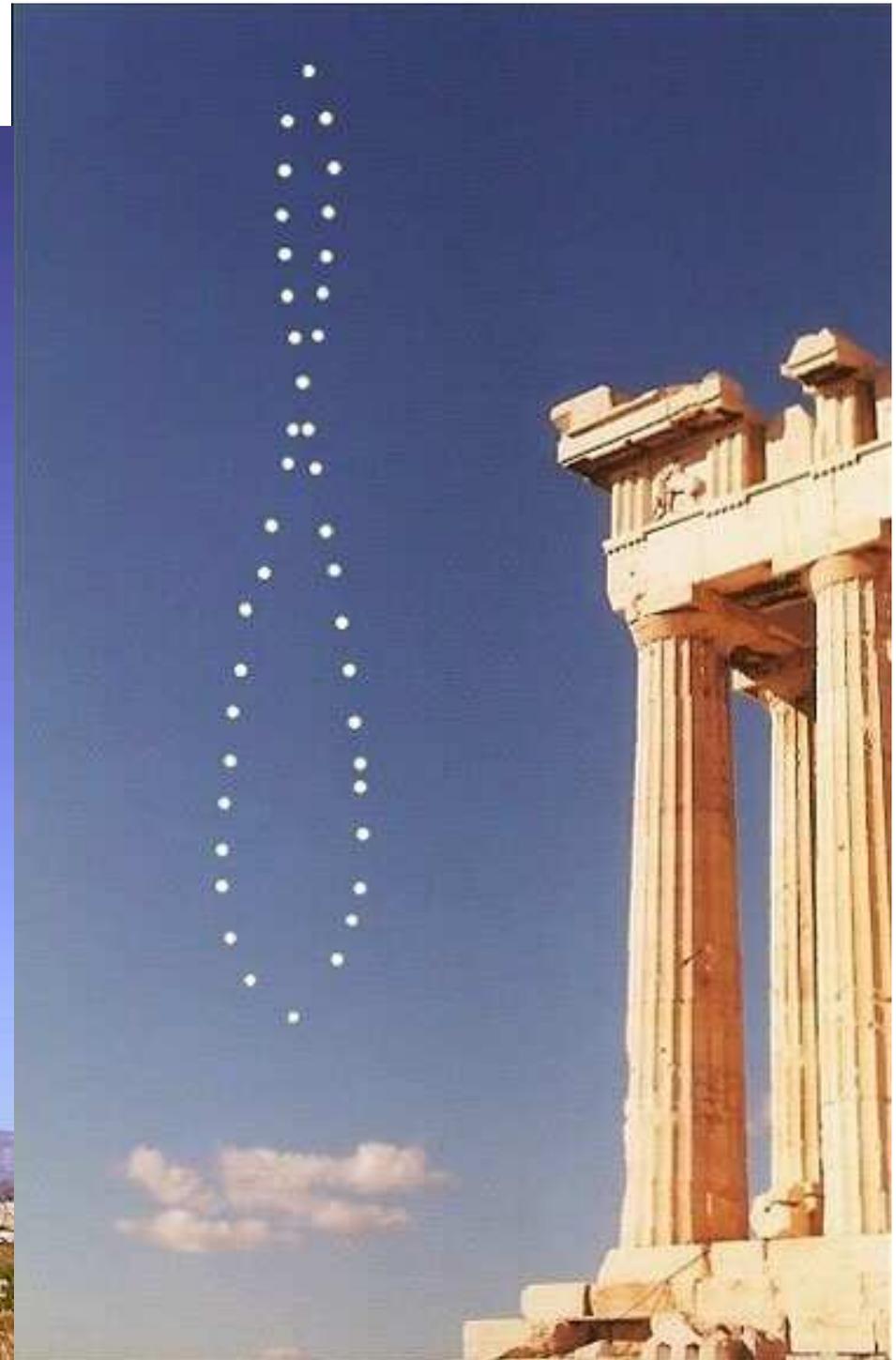
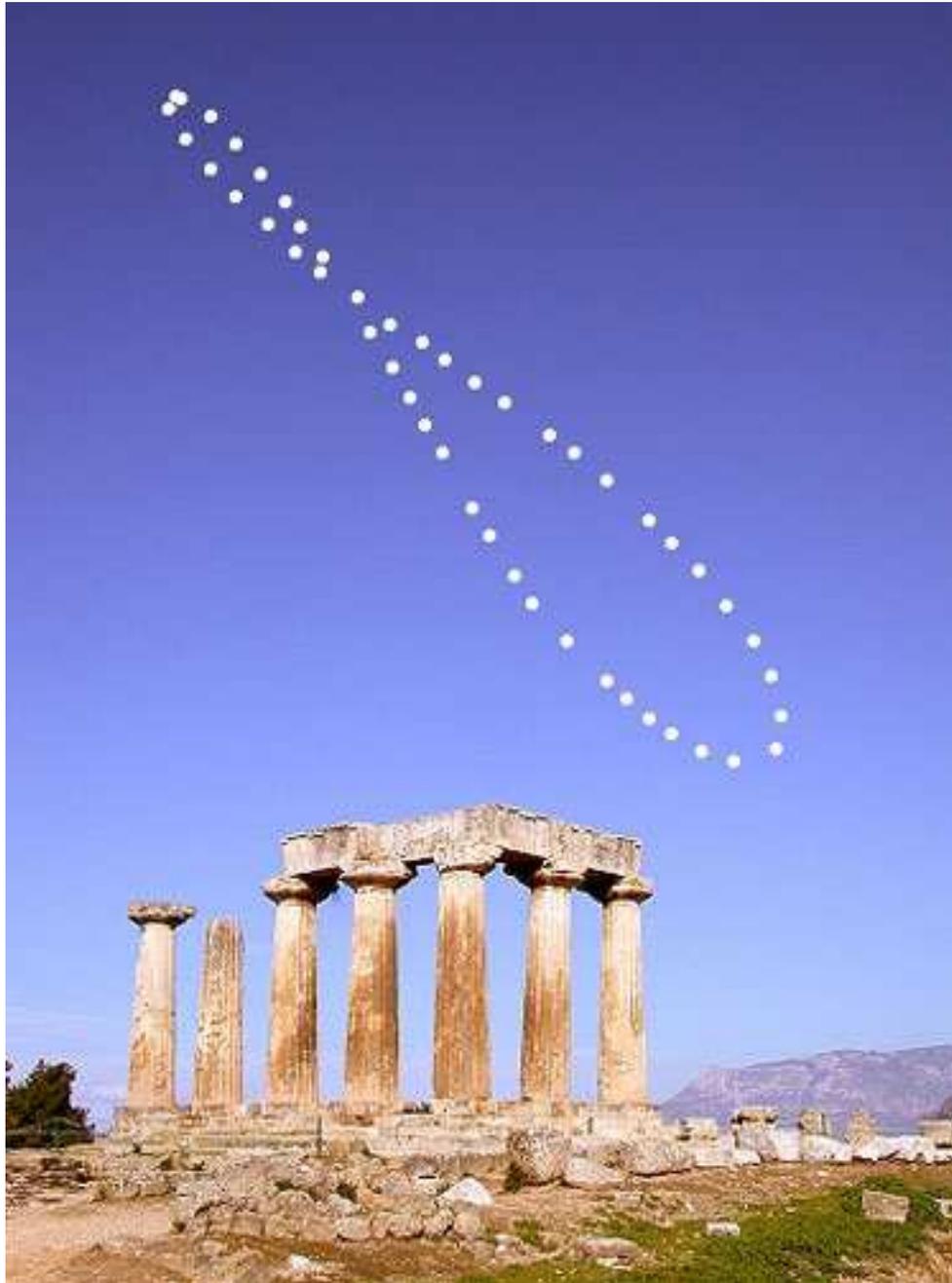


Analemma

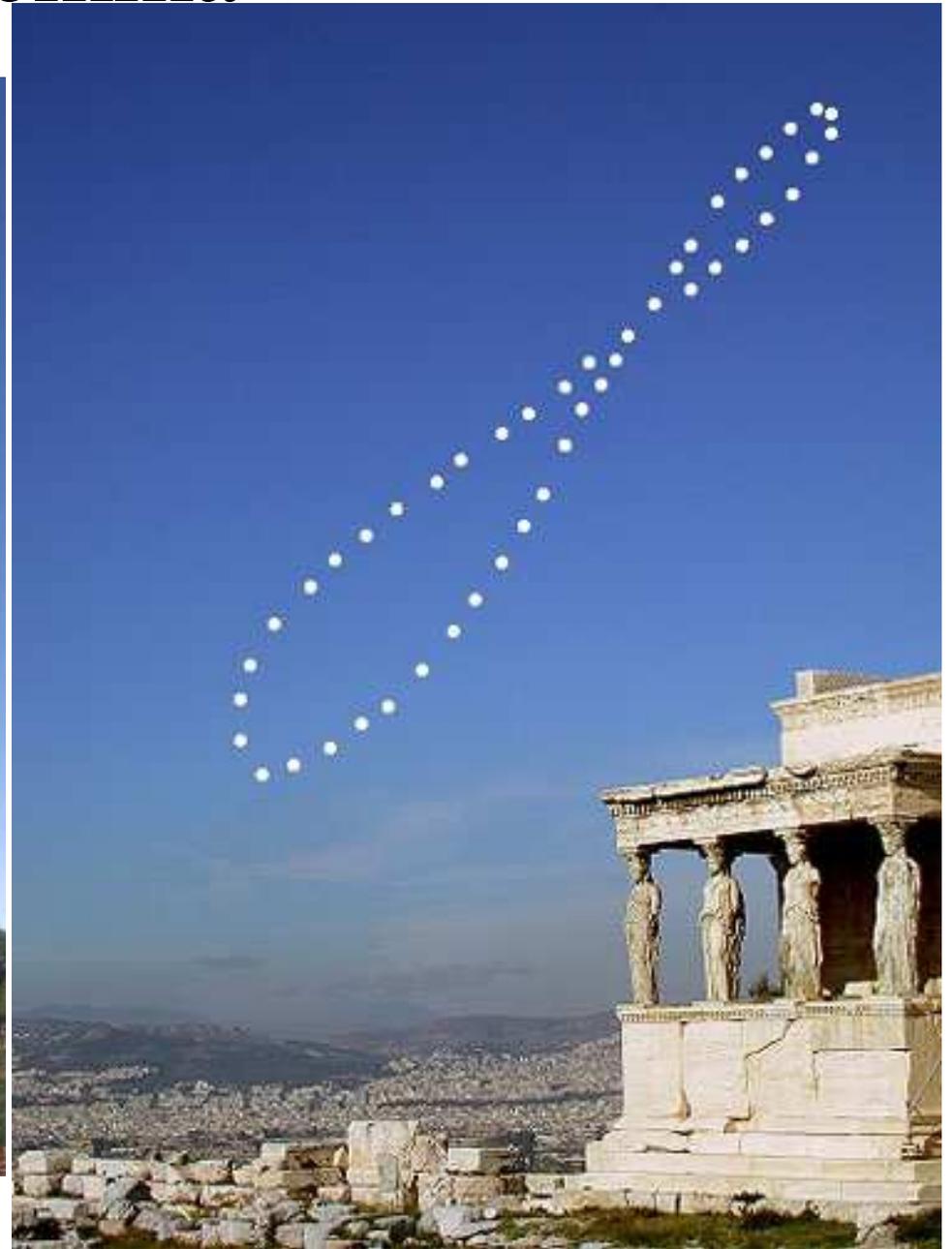
L'altezza del sole sull'orizzonte non è la stessa durante un anno.



Analemma



Analemma



Il ritmo delle stagioni

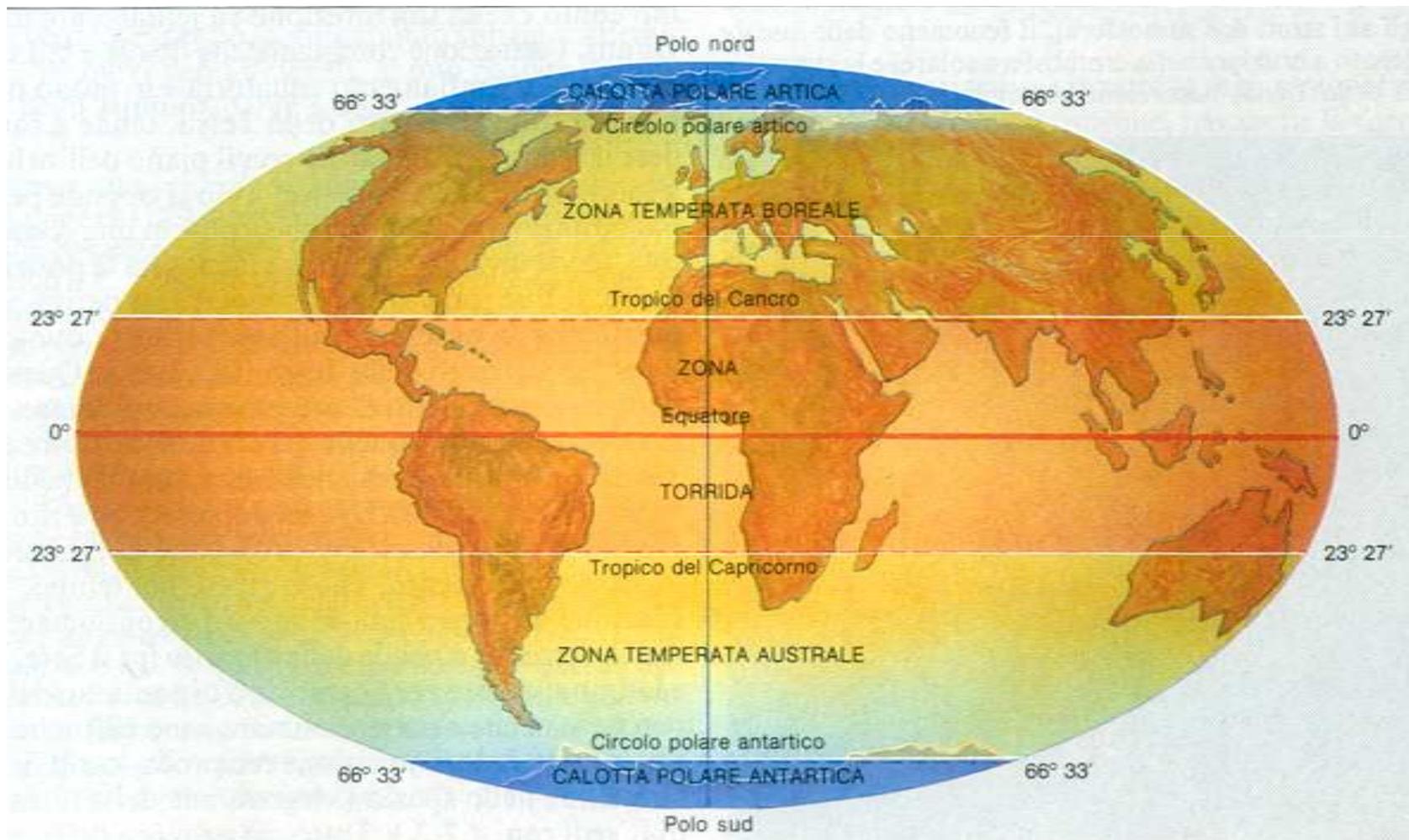
A causa della diversa velocità di rotazione che la Terra ha al perielio e all'afelio le stagioni non hanno la stessa durata.

Attualmente si ha:

<i>Emisfero Boreale</i>	<i>Emisfero Australe</i>	<i>dal - al</i>	<i>Durata</i>
Primavera	Autunno	21 marzo - 21 giugno	92d 21h
Estate	Inverno	21 giugno - 23 settembre	93d 9h
Autunno	Primavera	23 settembre - 22 dicembre	90d circa
Inverno	Estate	22 dicembre - 21 marzo	89d circa

Il ritmo delle stagioni

La rivoluzione della Terra ne consente la divisione in 5 zone caratterizzate da un diverso riscaldamento della superficie.

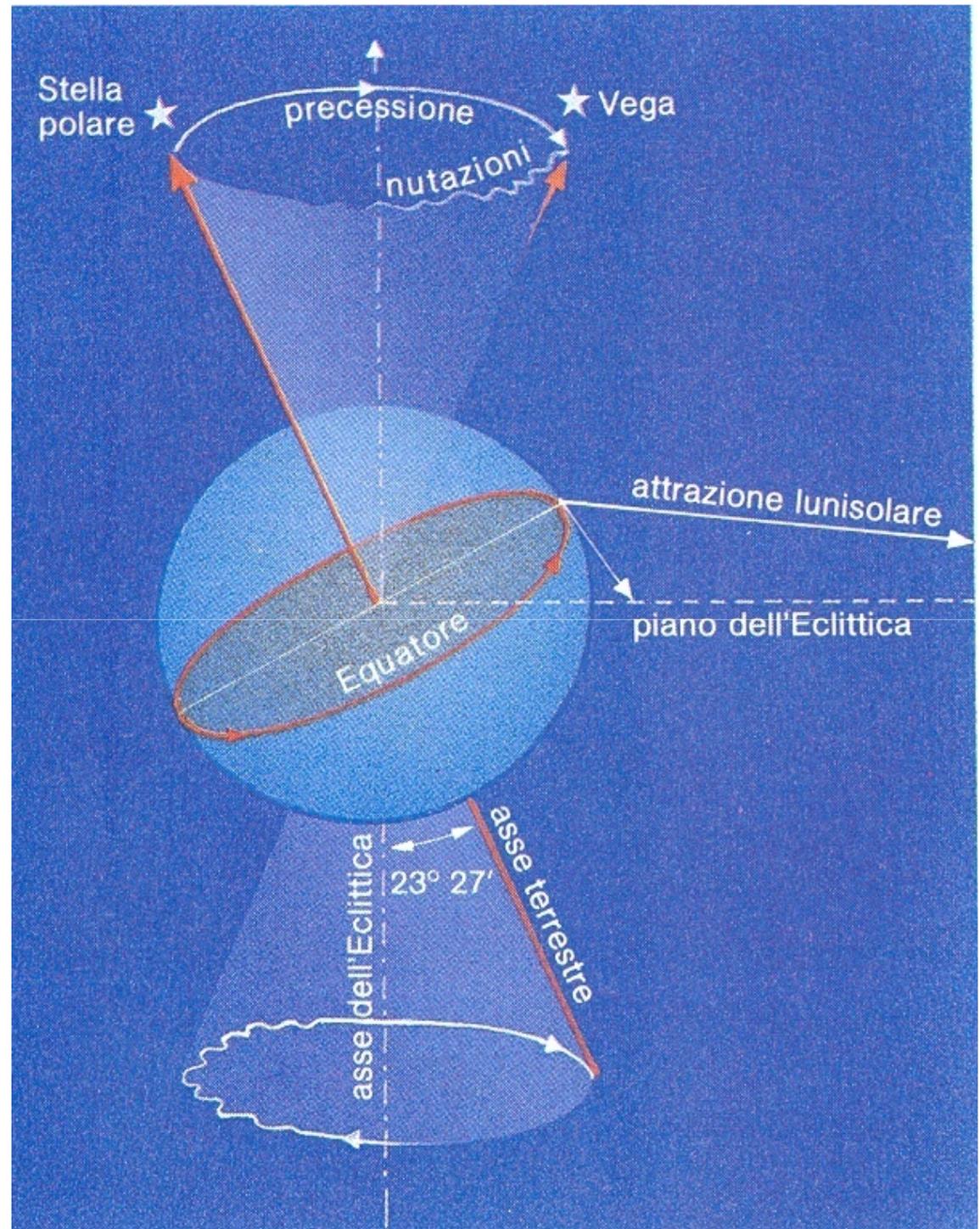


I moti secondari

Moto biconico

L'attrazione del Sole e della Luna sul rigonfiamento equatoriale della Terra produce il moto biconico detto anche *precessione lunisolare*.

Avviene in senso contrario a quello di rotazione terrestre e si compie in 25.700 anni circa; lo spostamento è di circa 50" l'anno.

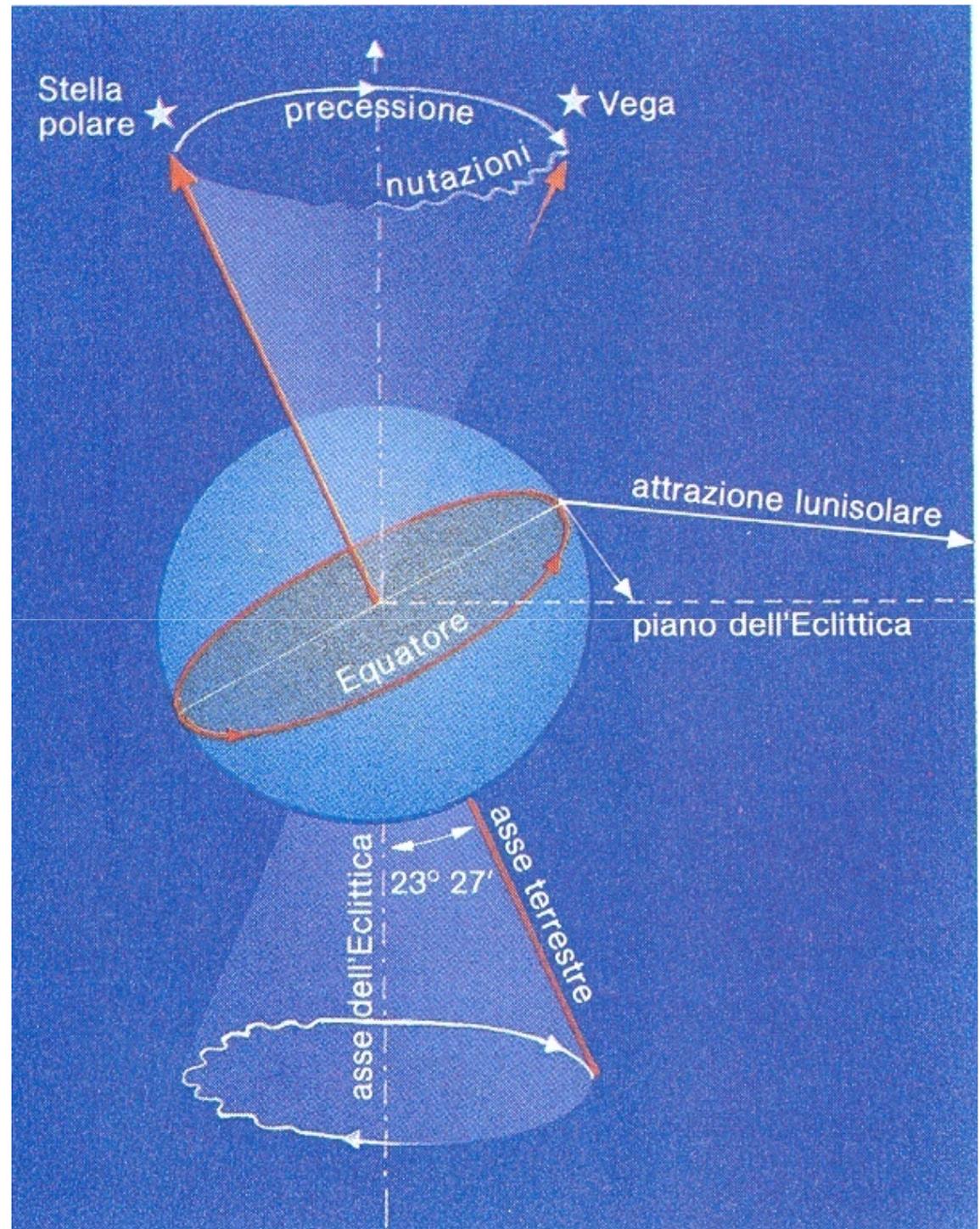


I moti secondari

Nutazione

Il moto biconico è perturbato da oscillazioni di ampiezza massima di $18,4''$ in un periodo di circa 18,6 anni.

Tali oscillazioni vengono dette **nutazioni** e sono causate dalla variazione della distanza Terra-Luna



I moti secondari

Variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre

L'asse terrestre, nell'arco di circa 40.000 anni, varia la sua inclinazione rispetto alla perpendicolare all'orbita della Terra, da un minimo di circa $21^{\circ}55'$ ad un massimo di circa $24^{\circ}20'$ e ritorno al minimo di $21^{\circ}55'$.

Questi sono i limiti estremi; raramente hanno andamenti regolari.

La variazione dell'inclinazione della Terra ha come primo effetto una variazione della declinazione dell'Eclittica e quindi una variazione dell'ampiezza delle fasce tropicali e di quelle entro i Circoli polari e comporta lo spostamento delle latitudini dei Circoli Polari e dei Tropici.

Attualmente l'inclinazione è di circa $23^{\circ}27'$ ed è in fase di diminuzione: la Terra si sta "raddrizzando" e si stanno restringendo sia le fasce tropicali, sia quelle polari.

I moti secondari

Polodia

L'asse di rotazione terrestre a causa soprattutto dello spostamento interno dei masse, non mantiene una direzione costante, ma si sposta lungo una linea irregolare detta *polodia*, approssimativamente entro un quadrato con lato di 20 metri.

Attenzione questo non significa che la direzione dell'asse può cambiare per questi fenomeni, cambiano solo i punti in cui l'asse "esce" dalla Terra, ovvero i punti sulla superficie del globo terrestre dove si trovano il Polo Nord e il Polo Sud geografici.

I moti secondari

Rotazione della linea degli apsi

A causa dell'attrazione sulla Terra degli altri pianeti del Sistema Solare, la linea degli Apsidi, osservata da sopra il Polo Nord presenta un movimento in senso antiorario con una velocità angolare di 11" ogni anno, in modo da compiere un giro completo in 117.000 anni.

Questo fa sì che l'istante del passaggio del Sole al perielio non sia sempre lo stesso, ma vari nel tempo (rispetto all'anno sidereo).

L'intervallo di tempo che intercorre tra due successivi passaggi del Sole al perielio viene detto *anno anomalistico*; la sua durata è di 365,25964 d = 365d 6h 13min 52,9s.

I moti secondari

Precessione degli equinozi

Lo spostamento della linea degli Apsidi va "incontro" allo spostamento della linea degli equinozi e ne abbrevia il periodo da circa 25.700 a 21.000 anni, conseguentemente gli equinozi ed i solstizi cadono ogni anno circa 01'01" in anticipo.

L'intervallo di tempo che intercorre tra due solstizi dello stesso nome (o anche tra due equinozi dello stesso nome) viene detto *anno tropico* e dura $365,2421897 \text{ d} = 365\text{d } 5\text{h } 48\text{min } 45,2\text{s}$, cioè circa 20min 24,3s in meno dell'anno sidereo.

La *Precessione degli Equinozi* è il risultato di due movimenti terrestri: mutamento di direzione nello spazio dell'asse di rotazione terrestre (moto biconico) e spostamento della linea degli Apsidi.

I moti secondari

Precessione degli equinozi

Conseguenza del moto di precessione è che il Polo Nord Celeste non cade sempre in corrispondenza della Stella Polare.

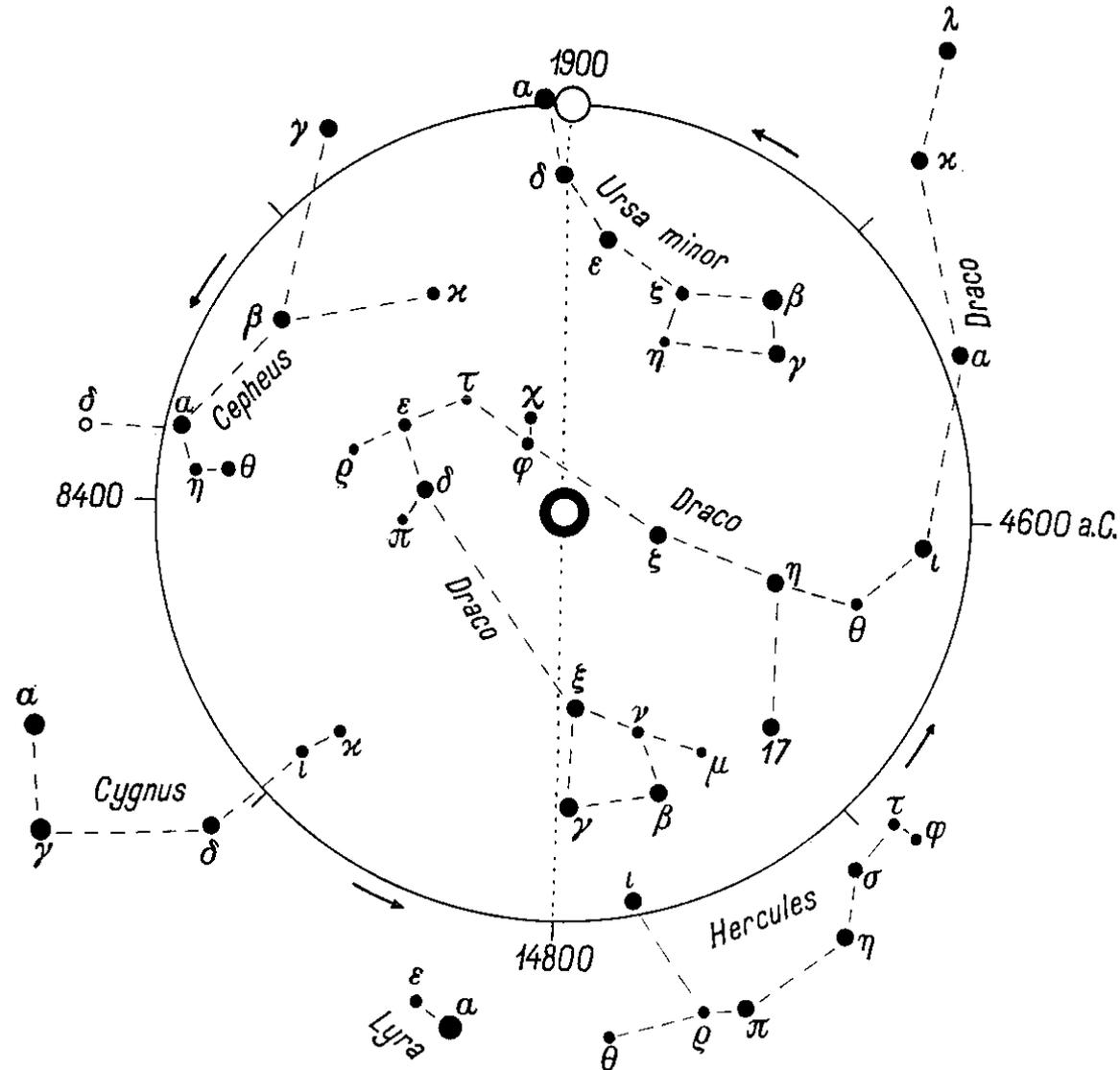
Quest'ultima, che è attualmente dista dal Polo poco più di mezzo grado, tra 13.000 anni ne sarà distante circa 47° e allora il Polo sarà indicato dalla stella Vega.

Un'altra conseguenza è che col tempo cambia la posizione che il Sole assume nei vari momenti dell'anno rispetto alle costellazioni dello Zodiaco.

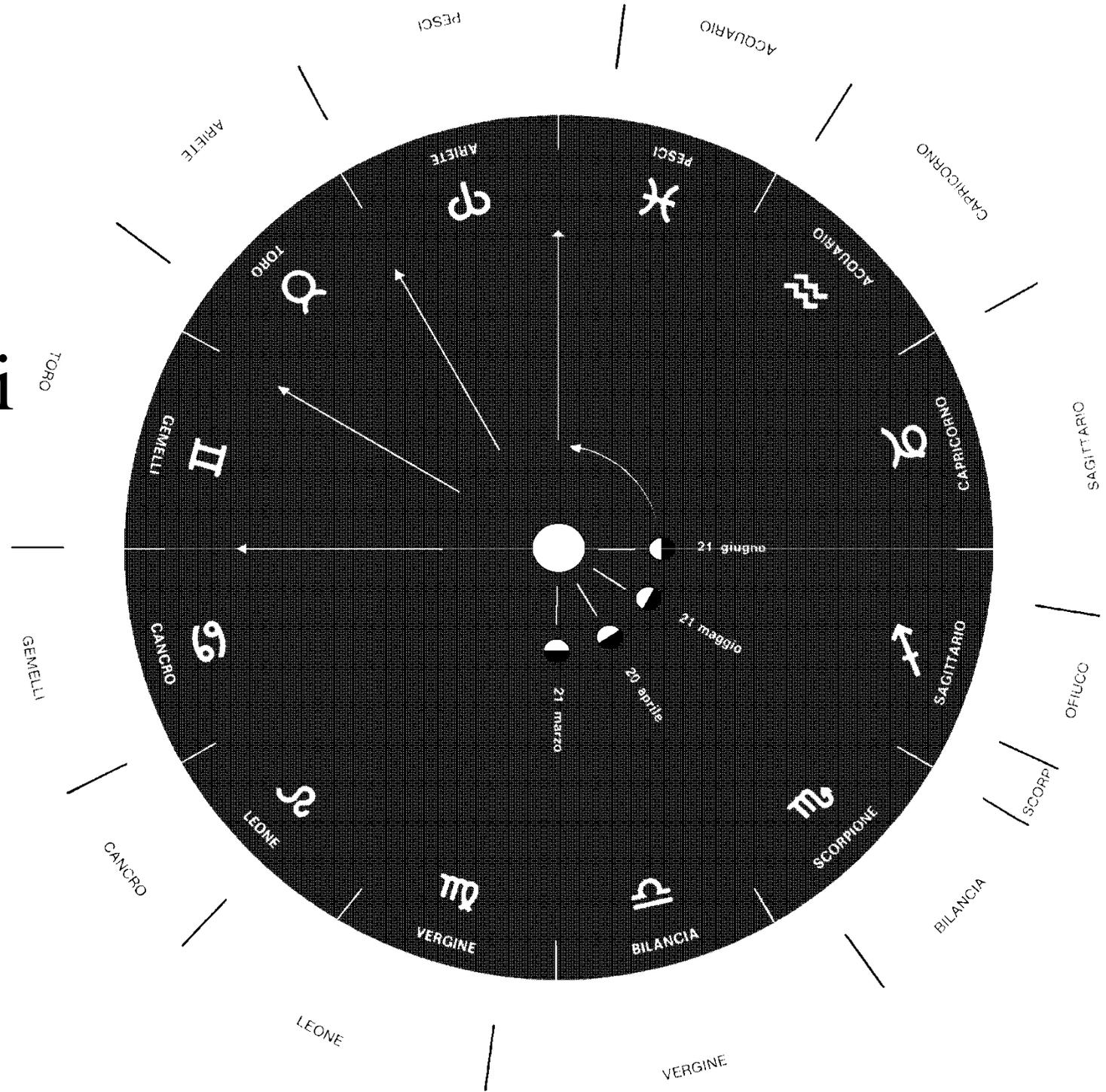
Mentre nel IV secolo a.C. all'inizio della primavera boreale il Sole si vedeva proiettato nella costellazione dell'Ariete, attualmente nello stesso periodo dell'anno lo si vede nella costellazione dei Pesci.

I moti secondari

Precessione degli equinozi



Preces- sione degli equinozi



I moti secondari

Variazione dell'eccentricità

L'azione gravitazionale dei corpi del Sistema Solare produce anche una variazione della forma dell'orbita terrestre che si manifesta con una *variazione dell'eccentricità* dell'orbita.

Pur non variando la lunghezza della linea degli apsidi, varia la distanza dei fuochi dell'ellisse dell'orbita terrestre.

Attualmente il valore dell'eccentricità è di circa 0,01671 che corrisponde ad una distanza tra i fuochi di circa 4 999 627 km.

In un periodo di 92.000 anni si passa da un massimo di circa 14.000.000 km (che corrisponde ad una eccentricità di circa 0,0655) ad un minimo di poco più di 1.000.000 km (pari ad una eccentricità di circa 0,0018).

I moti secondari

Moto di traslazione

Il moto di traslazione comprende l'insieme dei moti che la Terra compie a seguito del Sole e dalla Galassia.

Il moto del Sole rispetto al centro della Galassia che, secondo le attuali conoscenze, si compie in 225 000 000 di anni, alla velocità di 230 km/s;

Il moto di avvicinamento della Via Lattea alla galassia di Andromeda alla velocità di circa 40 km/s

Il moto dell'intero Gruppo Locale che si sta spostando alla velocità di 600 km/s e che è dovuto sia all'attrazione delle galassie dell'ammasso della Vergine, sia all'attrazione del superammasso di galassie in Idra-Centauro. Alcuni risultati inducono a credere che il tutto sia sottoposto all'attrazione di una vasta concentrazione di galassie, il Grande Attrattore.

Infine il moto di espansione dell'Universo.

I moti secondari

Moto di traslazione

GRUPPO LOCALE

c

ANDROMEDA

40 km/s

CENTRO DEL GRUPPO LOCALE +

40 km/s

b

230 km/s

VIA LATTEA

SUPERMASSIVO IN IDRA-CENTAURO

AMMASSO IN VERGINE

600 km/s

GRANDE ATTRATTORE

SISTEMA SOLARE

a

VENERE

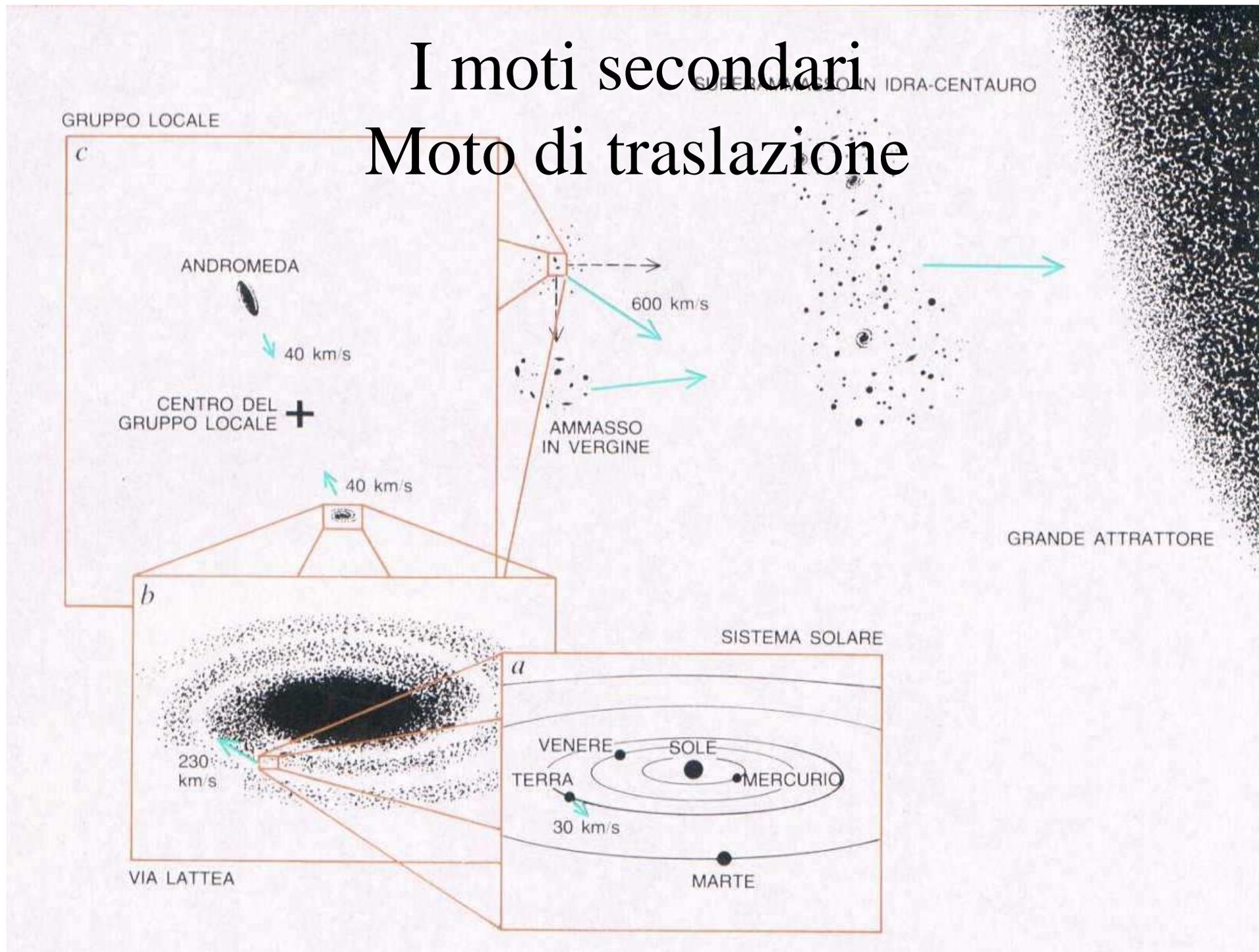
SOLE

TERRA

MERCURIO

30 km/s

MARTE



Conseguenze dei moti secondari

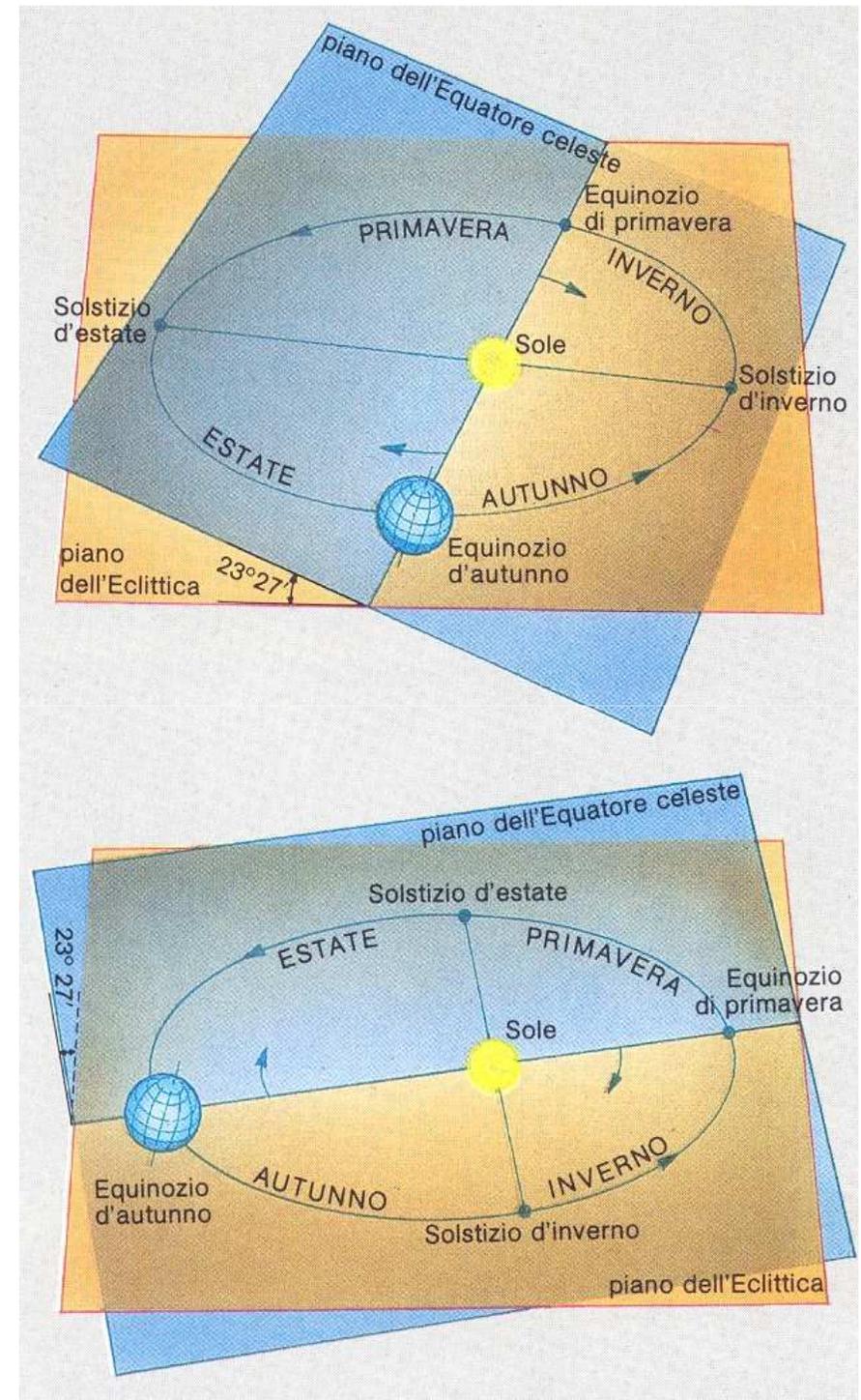
I moti millenari della Terra hanno importantissimi riflessi sul clima del nostro pianeta, poiché alterano nel tempo la distribuzione dell'insolazione secondo la latitudine e la stagione.

Data la lentezza con cui si svolgono questi movimenti, le variazioni climatiche che essi inducono sono estremamente graduali e pertanto sfuggono all'osservazione diretta.

Secondo la teoria di Milankovitch, i moti secondari sono da considerare come una delle cause principali delle glaciazioni, che si sono verificate verosimilmente cinque volte nel corso dell'ultima Era (il Quaternario o Neozoico, iniziato circa 2 milioni di anni fa) della storia del nostro pianeta.

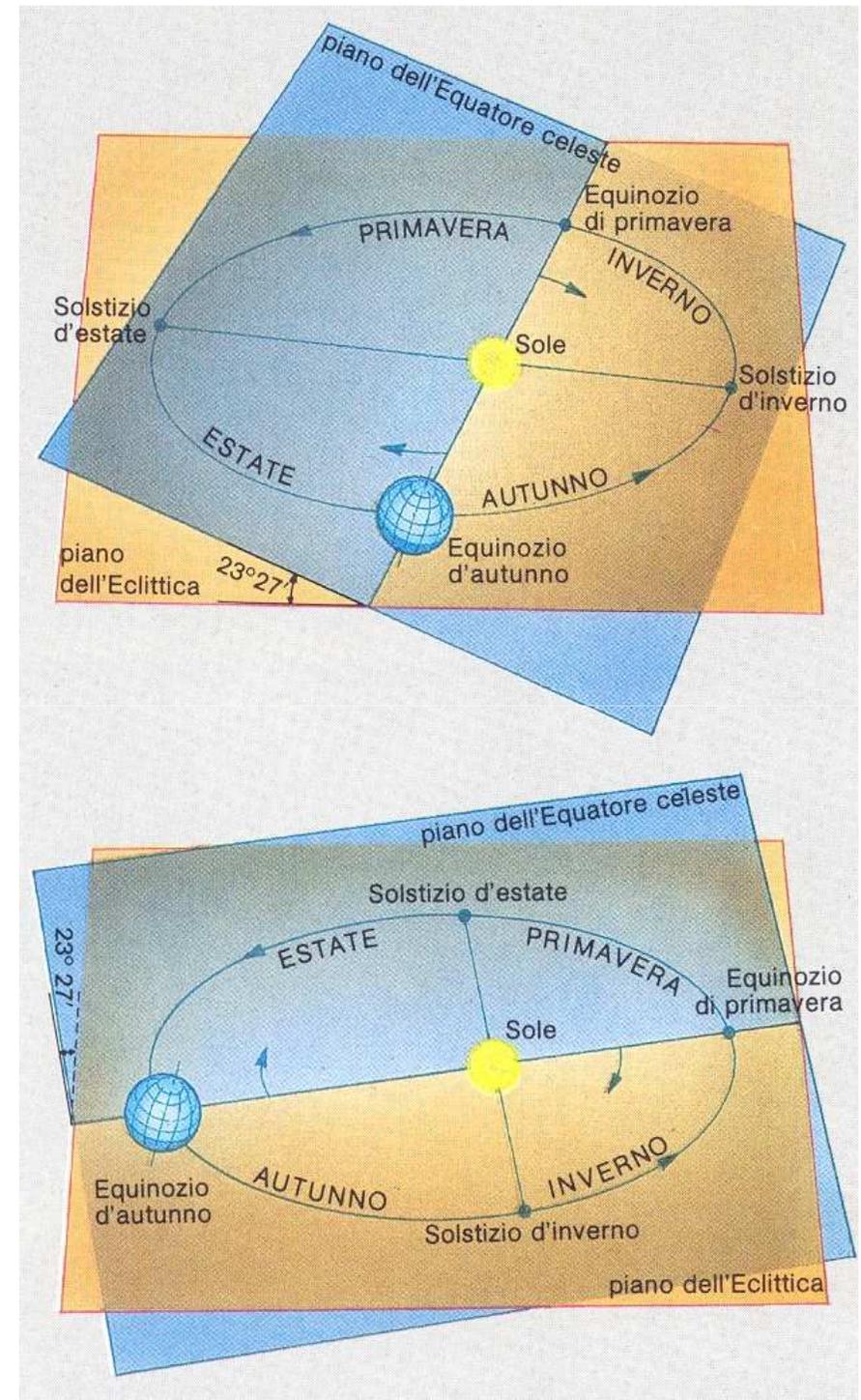
Conseguenze dei moti secondari

La durata di ogni stagione astronomica dipende dalla velocità con cui la Terra percorre il tratto di orbita corrispondente; poiché la precessione degli equinozi fa variare la posizione delle stagioni sull'orbita, ne deriva nel corso dei millenni anche una variabilità della loro durata.



Conseguenze dei moti secondari

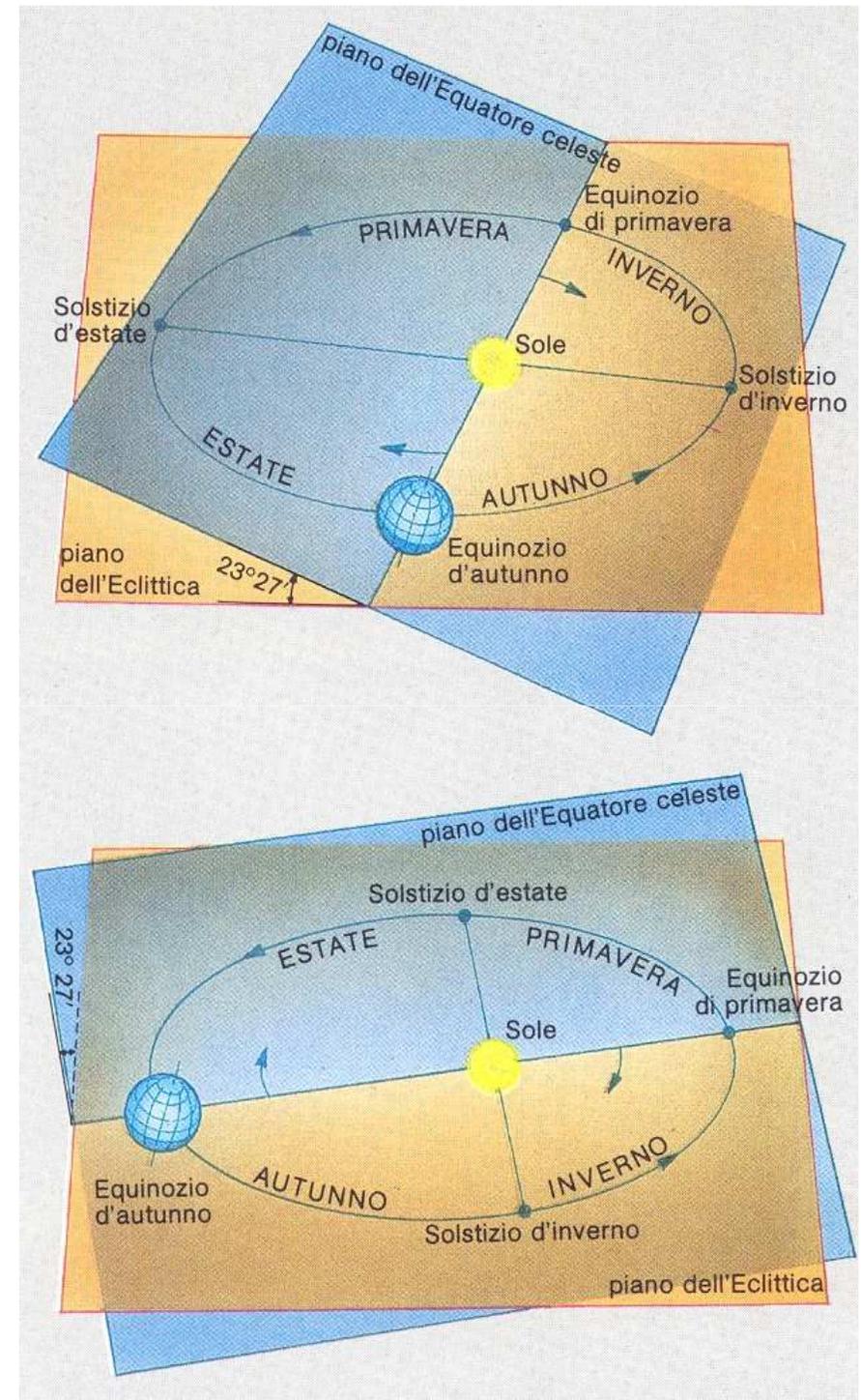
Attualmente il semestre autunno-inverno cade per il nostro emisfero boreale nel settore dell'orbita terrestre più vicino al perielio, dove la Terra ha una velocità di rivoluzione maggiore, e perciò esso dura circa 7 giorni e 6 ore in meno del semestre primavera-estate, che corrisponde al tratto di orbita più vicino all'afelio (dove la velocità della Terra è minore).



Conseguenze dei moti secondari

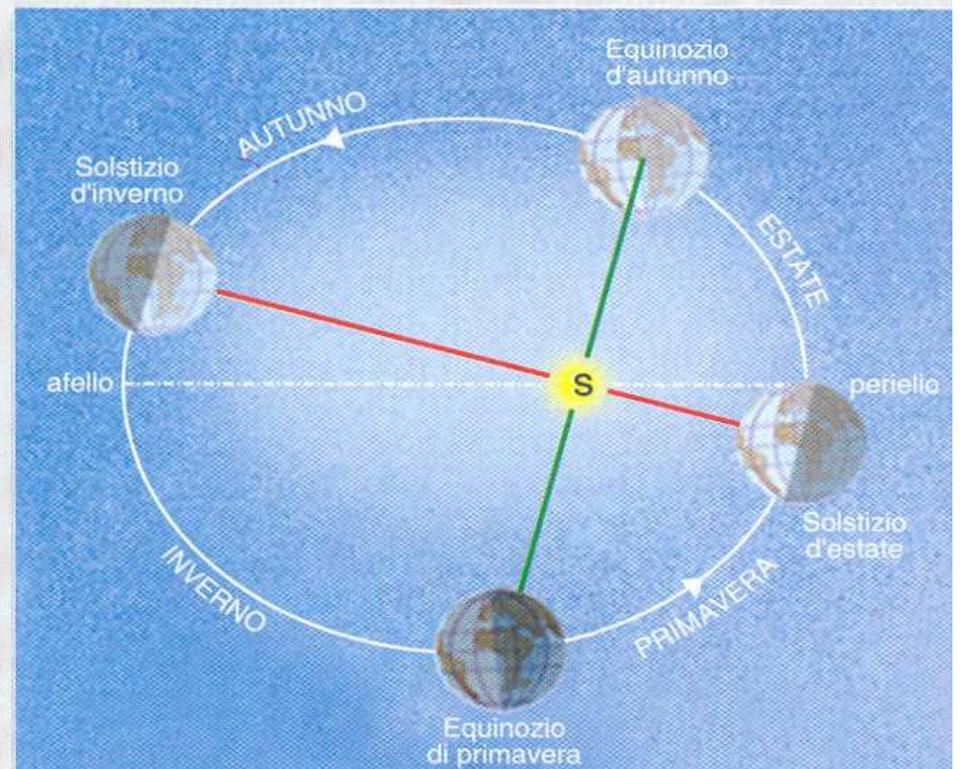
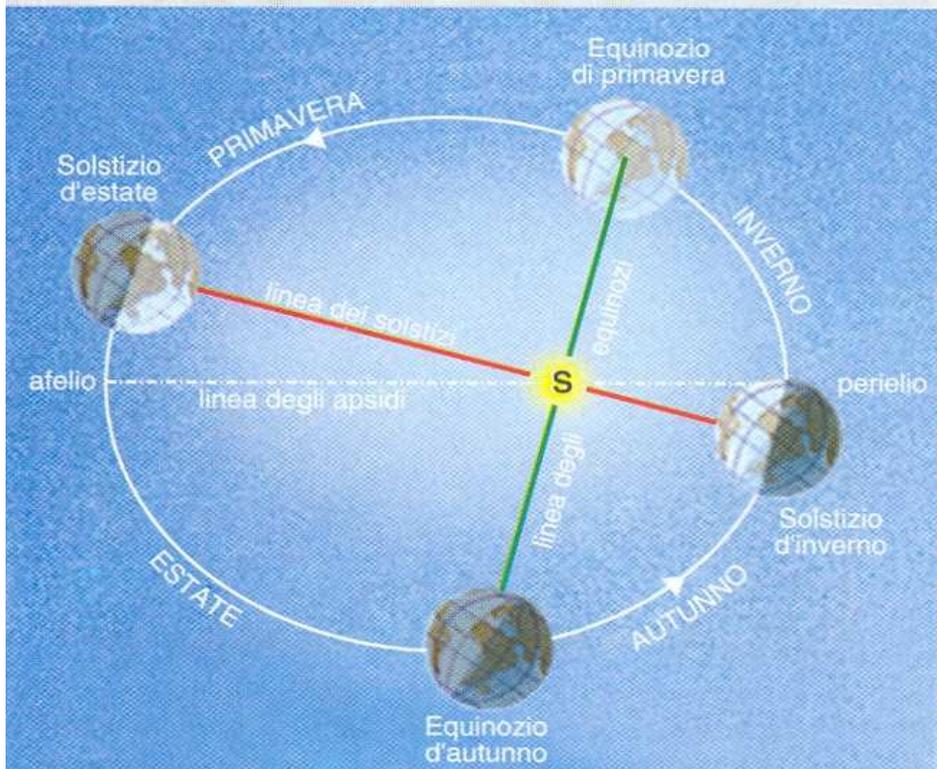
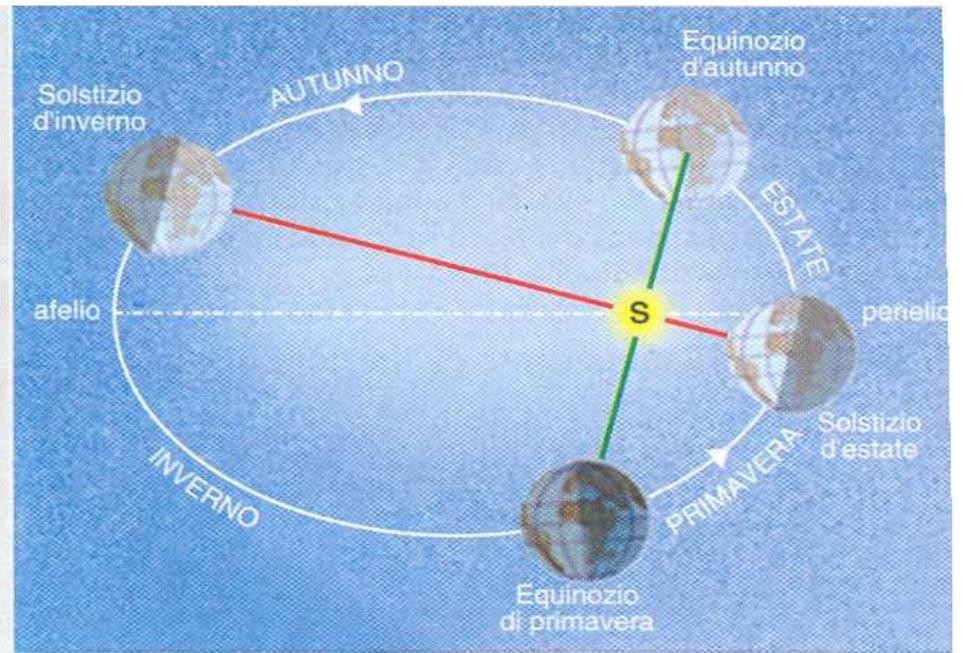
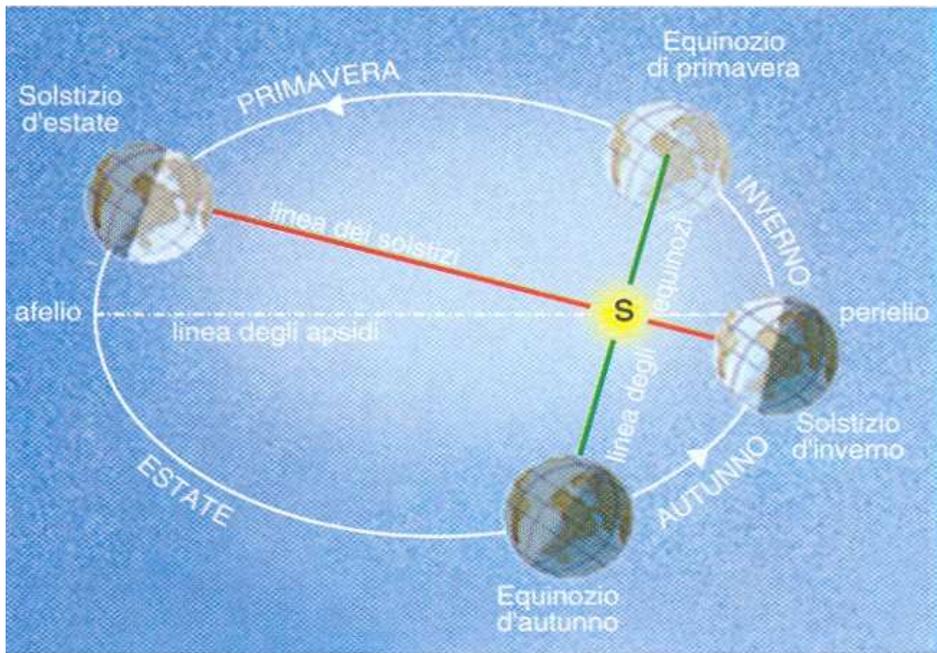
Fra 10.500 anni circa, quando la linea equinoziale avrà percorso mezzo giro, la situazione sarà opposta e l'emisfero boreale avrà il semestre freddo più lungo di quello caldo, mentre il contrario si avrà per l'emisfero australe.

Anche la variazione della distanza Terra-Sole influisce sul riscaldamento, sebbene in maniera minore.



Conseguenze dei moti secondari

L'oscillazione dell'escursione calorica prodotta dalla precessione degli equinozi varia di intensità con il tempo in conseguenza anche della variazione dell'eccentricità dell'orbita.

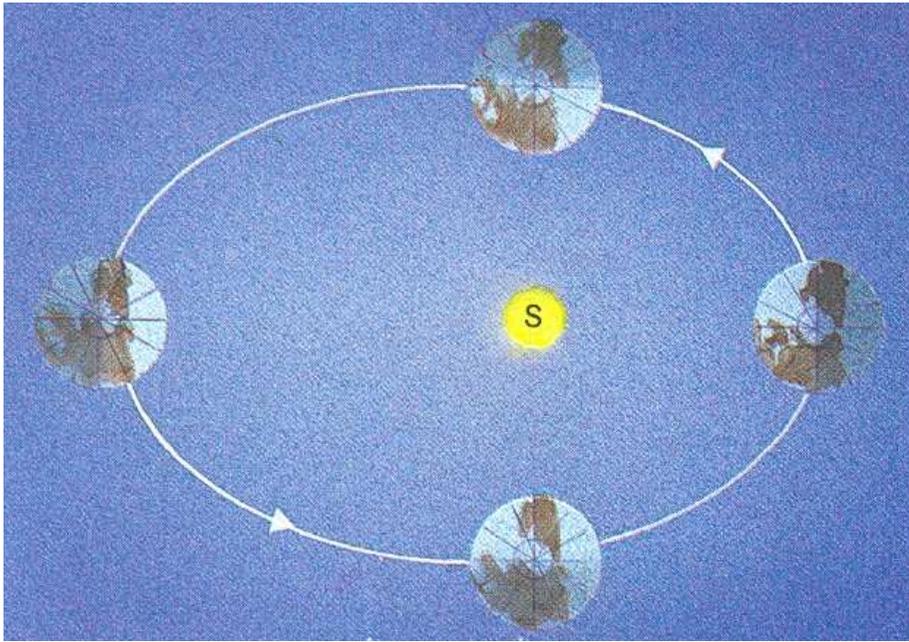


Conseguenze dei moti secondari

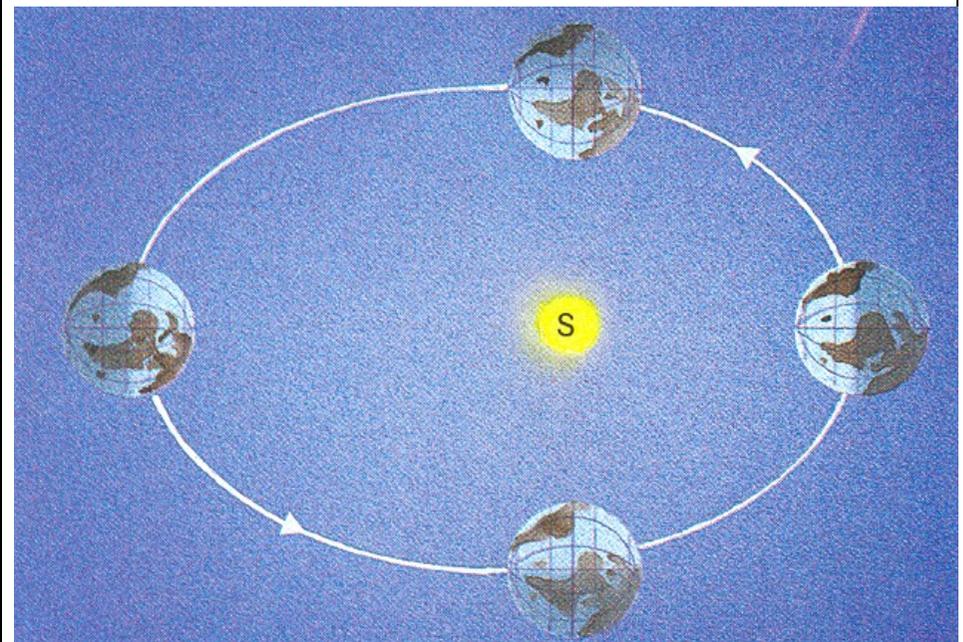
Anche il mutamento dell'inclinazione dell'asse terrestre produce importanti effetti sulle condizioni climatiche del nostro pianeta.

Quando l'inclinazione dell'asse assume i valori maggiori il contrasto stagionale diventa più marcato, mentre nel caso opposto tale contrasto si riduce sensibilmente.

Conseguenze dei moti secondari



Caso di una inclinazione nulla (visto dal Polo nord celeste); in questa situazione l'asse terrestre sarebbe perfettamente perpendicolare al piano dell'orbita. Le condizioni di illuminazione sarebbero sempre quelle che attualmente si verificano agli equinozi e le stagioni praticamente non esisterebbero affatto.



Caso di massima inclinazione, quello cioè in cui l'asse si troverebbe sullo stesso piano dell'orbita; in questa situazione nei solstizi si avrebbe una insolazione nulla all'Equatore, mentre ai poli il Sole risulterebbe allo Zenit per 24 ore consecutive: da ciò deriverebbero contrasti stagionali estremamente marcati.

Il tempo

Il tempo

Uno dei compiti più importanti dell'Astronomia classica è stato quello di definire e di determinare il tempo astronomico, sia perché necessario a diverse scienze, sia perché ciò rappresentava la più importante applicazione dell'Astronomia alla vita civile.

La misura del tempo può effettuarsi soltanto con la considerazione di determinati movimenti (se per esempio si ha a disposizione un movimento esattamente uniforme, basta la misura dello spazio percorso).

Il tempo atomico

Dal 1972 il tempo atomico è divenuto la scala ufficiale di tempo in fisica e in astronomia.

La base del tempo atomico è una rete di orologi atomici che nel loro insieme definiscono il Tempo Atomico Internazionale.

L'unità di tempo è il **secondo** (*s*) e nel Sistema Internazionale:

il secondo è pari a 9 192 631 770 periodi della radiazione emessa nella transizione fra i livelli iperfini $F = 4, M = 0$ e $F = 3, M = 0$ dello stato fondamentale dell'atomo di ^{133}Cs .

Ma prima?

Il tempo

La rotazione diurna avviene attorno ad un asse polare la cui direzione rispetto alle stelle (cioè in un riferimento inerziale) consideriamo fissa.

Considereremo costante in modulo la velocità angolare, e pertanto il vettore velocità di rotazione diurna $\vec{\omega}$ è considerato costante e collegato all'ellissoide matematico che approssima la figura terrestre e parallelo al semiasse minore.

Il moto annuo apparente del Sole rispetto alle stelle, di circa 1° /giorno verso Est, è il riflesso del moto di rivoluzione della Terra, descritto in prima approssimazione dalle prime due leggi di Keplero.

Il tempo

L'orbita di un pianeta intorno al Sole è ellittica con il Sole in uno dei due fuochi,
l'equazione polare è:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$$

dove p è una costante ed e l'eccentricità dell'orbita.

Il *semiasse maggiore* dell'orbita, a , e quello minore, b , sono dati dalle relazioni:

$$a = \frac{p}{1 - e^2} \qquad b = \frac{p}{\sqrt{1 - e^2}}$$

La direzione iniziale si fa di solito coincidere con quella del semiasse maggiore dell'orbita.

Quando il pianeta passa al perielio l'angolo iniziale è nullo;

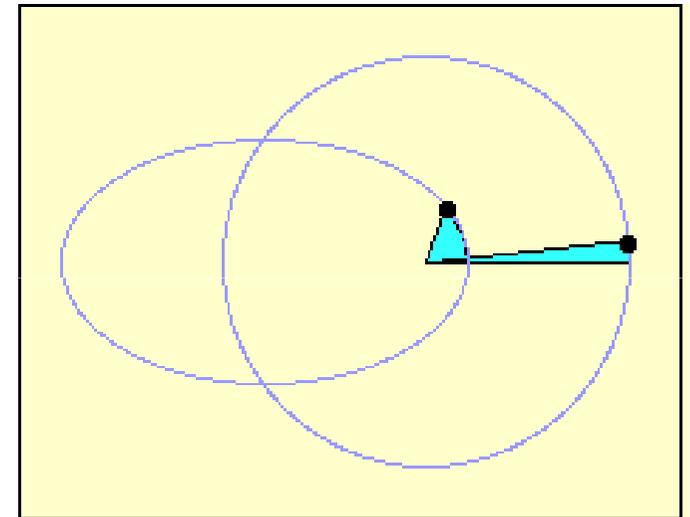
θ viene detta *anomalia vera*.

Il tempo

La velocità areale si mantiene costante:

$$dA = \frac{1}{2} r \cdot r dv = \frac{C}{2} dt$$

in cui dA è l'area elementare spazzata nel tempo dt dal raggio vettore r (la congiungente Terra-Sole), e C una opportuna costante.



Il tempo

La rotazione della Terra intorno al proprio asse e intorno la sole sono serviti per millenni a definire due scale astronomiche di tempo, una collegata con il valore dell'angolo di rotazione (*giorno*) e una con l'angolo lungo l'orbita (*anno*).

I valori istantanei dei due suddetti angoli possono quindi definire le scale di tempo astronomico.

Possiamo quindi in generale definire il tempo come l'angolo orario di un punto della sfera celeste e assumere l'intervallo di tempo corrispondente ad una intera rotazione della Terra come unità fondamentale per la misura del tempo.

Il tempo

La definizione di questa unità è semplice, ma non è facile fissarla praticamente.

L'asse di rotazione della Terra non è immobile rispetto alle stelle.

Per misurare la quantità di rotazione della Terra indipendentemente da ogni altro movimento, dovremo scegliere come indice per la misura dell'angolo corrispondente un punto fisso dell'equatore celeste (variabile rispetto ai punti fissi sulla sfera), ed allora fra due successive culminazioni di questo punto avverrà una rotazione completa della Terra.

Il corrispondente intervallo di tempo sarà l'unità di misura fondamentale del tempo.

Il tempo

Un punto fisso sull'equatore non può essere stabilito con facilità.

Nella pratica si assume come indice il punto γ , dato che è facilmente determinabile in ogni istante, ma anche esso è soggetto a piccoli movimenti dovuti alla precessione e alla nutazione.

La posizione del punto γ con riguardo al solo primo movimento è detta *equinozio medio*, mentre la posizione effettiva, dovuta ad ambedue i movimenti è detta *equinozio vero*.

Il tempo siderale

*Si assume come unità astronomica per la misura del tempo l'intervallo tra due successive culminazioni del punto γ e si indica questa unità col nome di **giorno siderale**.*

Questa unità non è costante, né uguale all'unità fondamentale che sarebbe il periodo di rotazione della Terra, ma le differenze sono così piccole che il giorno siderale può considerarsi praticamente come unità fondamentale.

Il movimento retrogrado dell'equinozio dovuto alla precessione, per effetto del quale le ascensioni rette delle stelle vanno generalmente crescendo con l'andare del tempo, è estremamente piccolo; in un anno lo spostamento del punto γ sull'equatore è di circa 50,26”.

Il tempo siderale

Dato che il movimento dell'equinozio è pressoché uniforme, se non vi fosse il movimento periodico dovuto alla nutazione, il giorno siderale potrebbe ritenersi costante.

Il movimento dell'equinozio dovuto a questo fenomeno è così piccolo che in pratica le variazioni di durata del giorno siderale sono trascurabili.

La parte più importante della nutazione ha un periodo di circa 19 anni ed il suo effetto complessivo è una variazione compresa fra circa +1 s e - 1 s nell'intero periodo.

Il giorno siderale ha inizio all'istante della culminazione del punto γ , ed è diviso in 24 ore siderali, l'ora siderale in 60 minuti di tempo siderale, il minuto in 60 secondi di tempo siderale.

A causa dei movimenti dell'equinozio si può distinguere il *tempo siderale uniforme* o *medio*, legato all'equinozio medio, dal *tempo siderale vero*, determinato dall'equinozio vero.

Il tempo solare vero

Il *giorno solare vero* è l'intervallo di tempo che trascorre tra due successive culminazioni (superiori o inferiori) del Sole (centro del disco solare) in meridiano, ovvero l'intervallo di tempo durante il quale l'angolo orario del Sole varia di 360° .

La culminazione superiore si dice anche *mezzogiorno vero*, la culminazione inferiore *mezzanotte vera*.

Il giorno solare viene diviso in 24 ore di tempo solare, ogni ora in 60 minuti, ogni minuto in 60 secondi.

Si dice poi *tempo solare vero* di un luogo l'angolo orario del Sole (centro), nel luogo stesso aumentato di 12h, cioè l'angolo orario contato dalla culminazione inferiore del Sole.

Fino al 1925 il tempo solare era semplicemente l'angolo orario del Sole vero e quindi si iniziava a contare al mezzogiorno.

Il tempo solare vero

La posizione osservata del Sole non è quella effettivamente occupata, che viene chiamata *posizione vera*, ma una posizione leggermente deviata dall'aberrazione (un fenomeno che vedremo più avanti).

Conseguentemente, se ci si riferisce al Sole osservato, bisognerebbe parlare di *giorno solare apparente* e *tempo solare apparente*; per il primo però la cosa non ha importanza, in quanto si tratta di un intervallo di tempo e la deviazione ora detta è pressoché costante per periodi piuttosto lunghi.

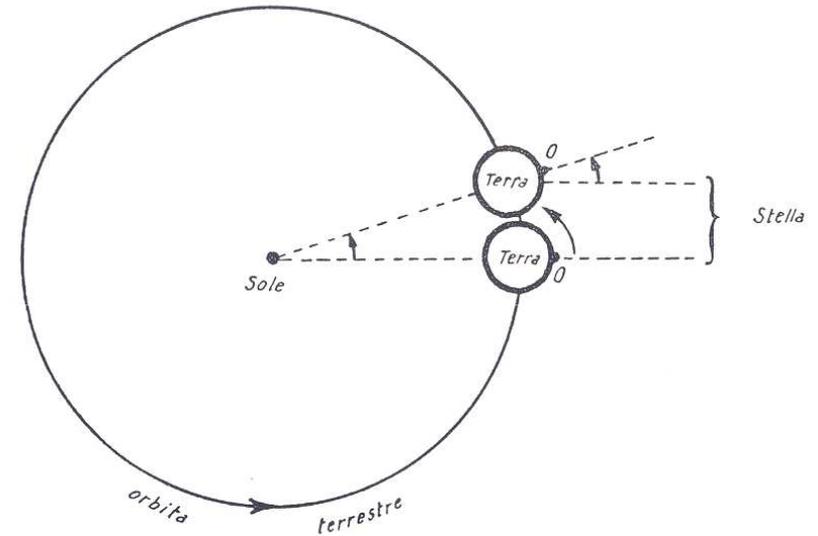
Nelle definizioni date sopra e in quanto segue considereremo il sole vero, cioè la posizione osservata corretta per il fenomeno ora detto.

Il tempo solare vero

Il giorno siderale e il giorno solare vero sono di differente durata e ciò perché il Sole si sposta sulla sfera celeste in ogni giorno di circa un grado, rispetto alle stelle fisse, nella direzione opposta al moto diurno della sfera. Ogni giorno il Sole passerà al meridiano con un certo ritardo rispetto alle stelle; ritardo che corrisponde al tempo impiegato dal Sole a passare il meridiano, cioè a circa 4 minuti (di tempo siderale).

Il giorno solare vero è di circa 4 minuti più lungo di quello siderale.

Viceversa, una stella che in un dato giorno passa in meridiano insieme al Sole, nel giorno successivo anticiperà il suo passaggio di circa 4 minuti; questo intervallo di tempo è stato chiamato l'*accelerazione delle (stelle) fisse*.



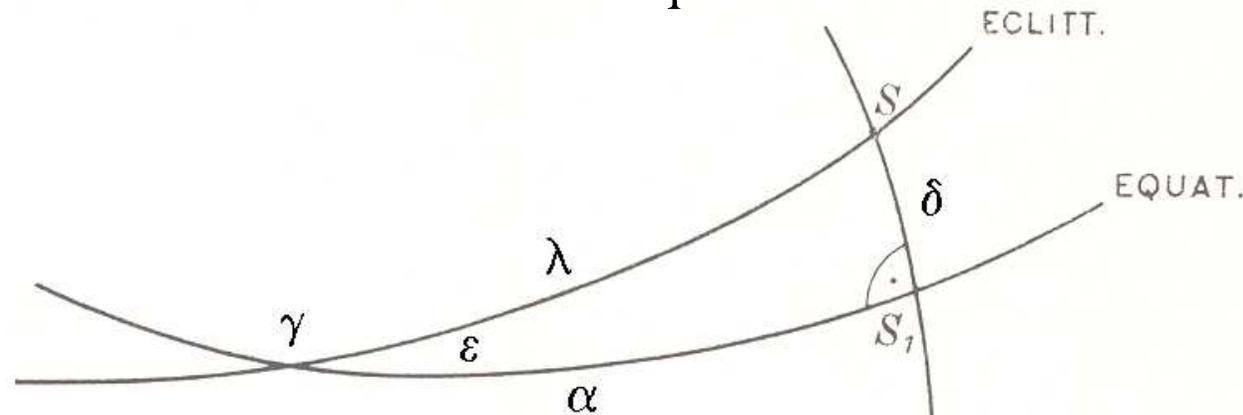
Il tempo solare vero

L'indice che segna il tempo solare vero è l'intersezione del circolo orario del Sole con l'equatore celeste.

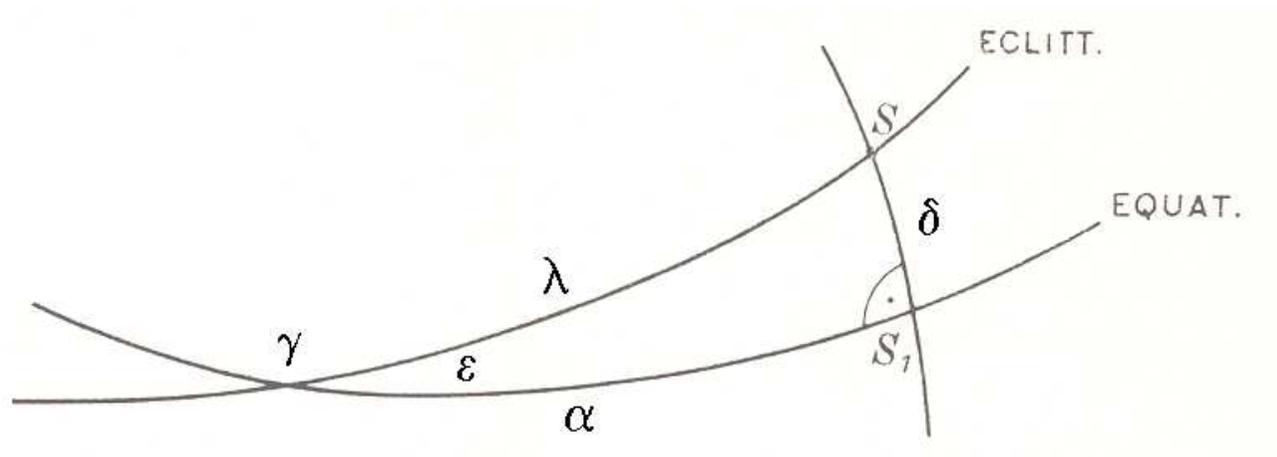
Per il moto del Sole fra le stelle, questo punto si sposta sull'equatore nel senso delle ascensioni rette crescenti, ma il suo moto non è uniforme, per cui il giorno solare vero non è una unità costante.

Ciò avviene per due motivi:
la velocità angolare del Sole nel suo moto intorno alla Terra, e quindi il suo moto apparente sopra l'eclittica, è variabile;

l'orbita apparente del Sole, cioè l'eclittica, non coincide con l'equatore, ma è inclinata su questo.



Il tempo solare vero



Sia λ la longitudine eclittica del Sole, α la sua ascensione retta ed ε l'obliquità dell'eclittica, dal triangolo sferico γSS_1 si ha

$$\tan \alpha = \tan \lambda \cdot \cos \varepsilon$$

Derivando

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\cos \varepsilon}{1 - \operatorname{sen}^2 \lambda \operatorname{sen}^2 \varepsilon} \cdot \frac{d\lambda}{dt}$$

Il tempo solare vero

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\cos \varepsilon}{1 - \operatorname{sen}^2 \lambda \operatorname{sen}^2 \varepsilon} \cdot \frac{d\lambda}{dt}$$

L'ascensione retta del Sole rappresenta la differenza fra tempo siderale e tempo solare vero,

questa non cresce proporzionalmente al tempo e quindi la durata del giorno solare vero è continuamente variabile, per il fatto che i due fattori di cui si compone la variazione di α sono variabili.

La longitudine eclittica del sole può essere ricavata determinandone la declinazione δ in diverse epoche dell'anno a partire dalla relazione

$$\operatorname{sen} \lambda = \frac{\operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen} \varepsilon}$$

E si può dimostrare che il termine $d\lambda/dt$, che è la velocità del Sole sopra l'eclittica non cresce proporzionalmente al tempo.

Il tempo solare vero

Dalle osservazioni si ha che la velocità angolare del Sole sull'eclittica è massima intorno alla longitudine di 282° , e minima nella direzione opposta, cioè alla longitudine di 102° .

Nella prima di queste posizioni il Sole percorre al giorno un arco di eclittica di $61',1$, che corrisponde ad una differenza di $4m\ 4s$, nella seconda posizione il Sole percorre $57',2$, corrispondenti a $3m\ 49s$.

Da ciò segue che per il fatto del moto non uniforme sull'eclittica, il giorno solare nel primo caso (che si verifica ai primi di gennaio) è circa $15\ s$ più lungo che nel secondo caso (che ha luogo al principio di luglio).

Il tempo solare vero

In secondo luogo, anche se $d\lambda/dt$ fosse costante, non lo sarebbe $d\alpha/dt$, in quanto il coefficiente di $d\lambda/dt$ non lo è a causa dell'inclinazione dell'eclittica.

La variazione diurna media dell'ascensione retta del Sole è di 3m 57s ed altrettanto può dirsi per la variazione media della longitudine; perciò la variazione effettiva dell'ascensione retta del Sole vero, per il solo fatto della obliquità, sarà intorno agli equinozi circa 4m 16s ed ai solstizi circa 3m 37s al giorno.

Per questo secondo fattore dunque il giorno solare più lungo (agli equinozi) è di circa 39 s più lungo del giorno più corto dell'anno (ai solstizi).

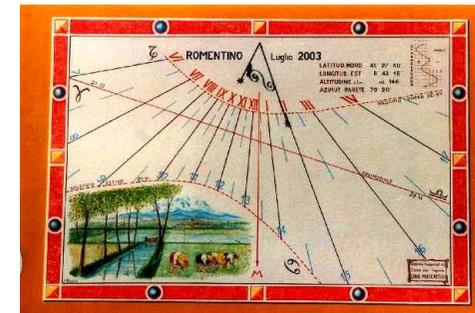
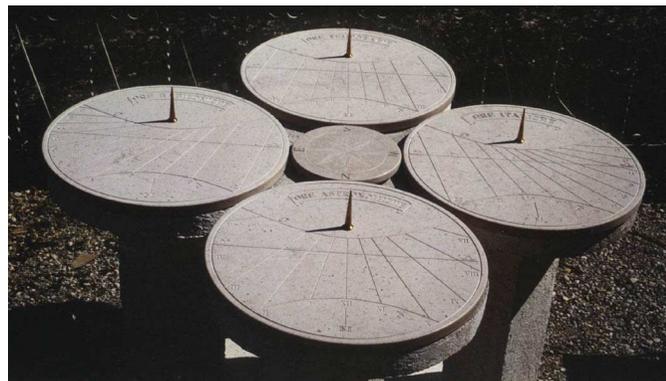
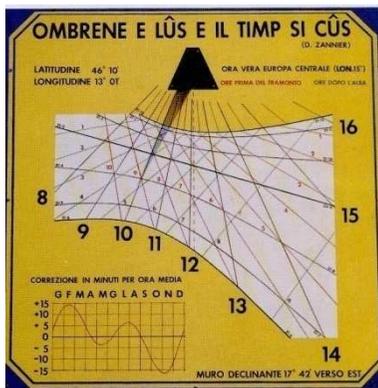
Il tempo solare vero

I due fenomeni ora descritti si compongono in uno, ma dato che sono sfasati la differenza tra il giorno solare vero più lungo e quello più corto arriva a circa 52s.

Il primo ha luogo a metà dicembre, il secondo alcuni giorni prima dell'equinozio d'autunno.

Il progressivo sommarsi di queste differenze conduce all'**equazione del tempo**.

Il tempo solare vero non può quindi essere seguito dai comuni orologi costruiti meccanicamente: esso è invece indicato dagli orologi solari, nei quali uno stilo, fissato su una superficie esposta al Sole, proietta la propria ombra.



Il tempo solare medio

Per usi civili si deve usare una unità costante al posto del giorno vero variabile, si introduce allora il **giorno solare medio**, la cui durata è la media esatta di tutte le lunghezze dei giorni veri in un anno.

Per il calcolo di questa durata media è necessario conoscere il numero esatto di giorni solari in un anno, ma per definire completamente il giorno medio (vale a dire anche l'istante del suo inizio e la misura del tempo che ne deriva) è necessario stabilire un legame tra esso e il tempo vero.

Allo scopo si utilizzano due Soli ipotetici: il **Sole fittizio** che si suppone percorrere l'eclittica di moto uniforme e il **Sole medio** che si suppone muoversi uniformemente sopra l'equatore.

Entrambi compiono il moto annuo nello stesso tempo del Sole vero.

Il secondo sarà libero dai due inconvenienti del Sole vero e sarà l'indice per un tempo basato sul giorno medio.

Il tempo solare medio

A causa della diversa velocità del sole vero nel suo percorso, qualunque sia la posizione del Sole fittizio rispetto al vero in un certo istante, nel loro cammino i due Soli verranno a coincidere in due soli punti dell'eclittica, diametralmente opposti.

Si definisce allora più precisamente il Sole fittizio come quel punto che (percorrendo l'eclittica con moto uniforme) passa al perigeo e all'apogeo insieme al Sole vero.

Se indichiamo con L la longitudine del Sole fittizio, detta *longitudine media del Sole* (**attenzione, non è la longitudine del Sole medio**), la differenza $\lambda - L$ tra questa e la longitudine vera, ovvero l'angolo fra le direzioni del Sole vero e del Sole fittizio, è detta *equazione del centro*, sarà positiva quando il Sole vero precede quello fittizio e negativa nel caso opposto, mentre la variazione dL/dt sarà costante.

Detta A l'ascensione retta del Sole fittizio si può scrivere l'equazione

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\cos \epsilon}{1 - \sin^2 L \sin^2 \epsilon} \cdot \frac{dL}{dt}$$

Il tempo solare medio

Essendo dL/dt costante la durata del giorno solare dipende solo dall'obliquità.

dA/dt è minimo per $L = 0^\circ$ e $L = 180^\circ$

dA/dt è massimo per $L = 90^\circ$ e $L = 270^\circ$

$dA/dt = dL/dt$ quando

$$\frac{\cos \varepsilon}{1 - \sin^2 L \sin^2 \varepsilon} = 1$$

Ossia:

$$L = 46^\circ 14'$$

$$L = 133^\circ 46'$$

$$L = 226^\circ 14'$$

$$L = 313^\circ 46'$$

Il tempo solare medio

Il secondo Sole ipotetico si fa poi passare agli equinozi contemporaneamente col Sole fittizio.

Il giorno solare medio può definirsi anche come l'intervallo di tempo compreso fra due successive culminazioni del Sole medio; la culminazione superiore del Sole medio è detta anche *mezzogiorno medio*, la culminazione inferiore *mezzanotte media*.

Il giorno medio incomincia alla mezzanotte media e l'angolo orario del Sole medio aumentato di 12h misura il tempo medio locale trascorso dal principio del giorno medio.

Il giorno medio è diviso in 24 ore medie, l'ora media in 60 minuti ed il minuto in 60 secondi di tempo medio.

Equazione del tempo

La differenza tra l'ascensione retta del Sole medio e quella del Sole vero α è detta equazione del tempo; essendo l'ascensione retta del Sole medio uguale alla longitudine media L del Sole (longitudine del Sole fittizio), l'equazione del tempo è

$$E = L - \alpha$$

L'equazione del tempo può dirsi anche la differenza tra il tempo solare vero ed il tempo medio

$$***E = tempo vero - tempo medio***$$

L'equazione del tempo è la quantità che occorre aggiungere, col rispettivo segno, al tempo medio per ottenere quello vero.

Detta λ la longitudine vera del Sole, può anche scriversi

$$L - \alpha = (\lambda - \alpha) - (\lambda - L)$$

Il secondo termine a destra è ***l'equazione del centro***, il primo la ***riduzione all'eclittica***.

Equazione del tempo

L'equazione del tempo si scrive:

$$E = A \sin L + B \cos L + C \sin 2L + D \cos 2L + \dots$$

dove i coefficienti A, B, C, D,... sono ben determinati per ogni epoca (i primi sono quelli che incidono di più e sono sensibilmente variabili col tempo), ed L si calcola per qualunque istante t con la formula

$$L = n(t - t_0)$$

n è la velocità angolare media del Sole sull'eclittica e t_0 l'istante del suo passaggio al punto γ .

Equazione del tempo

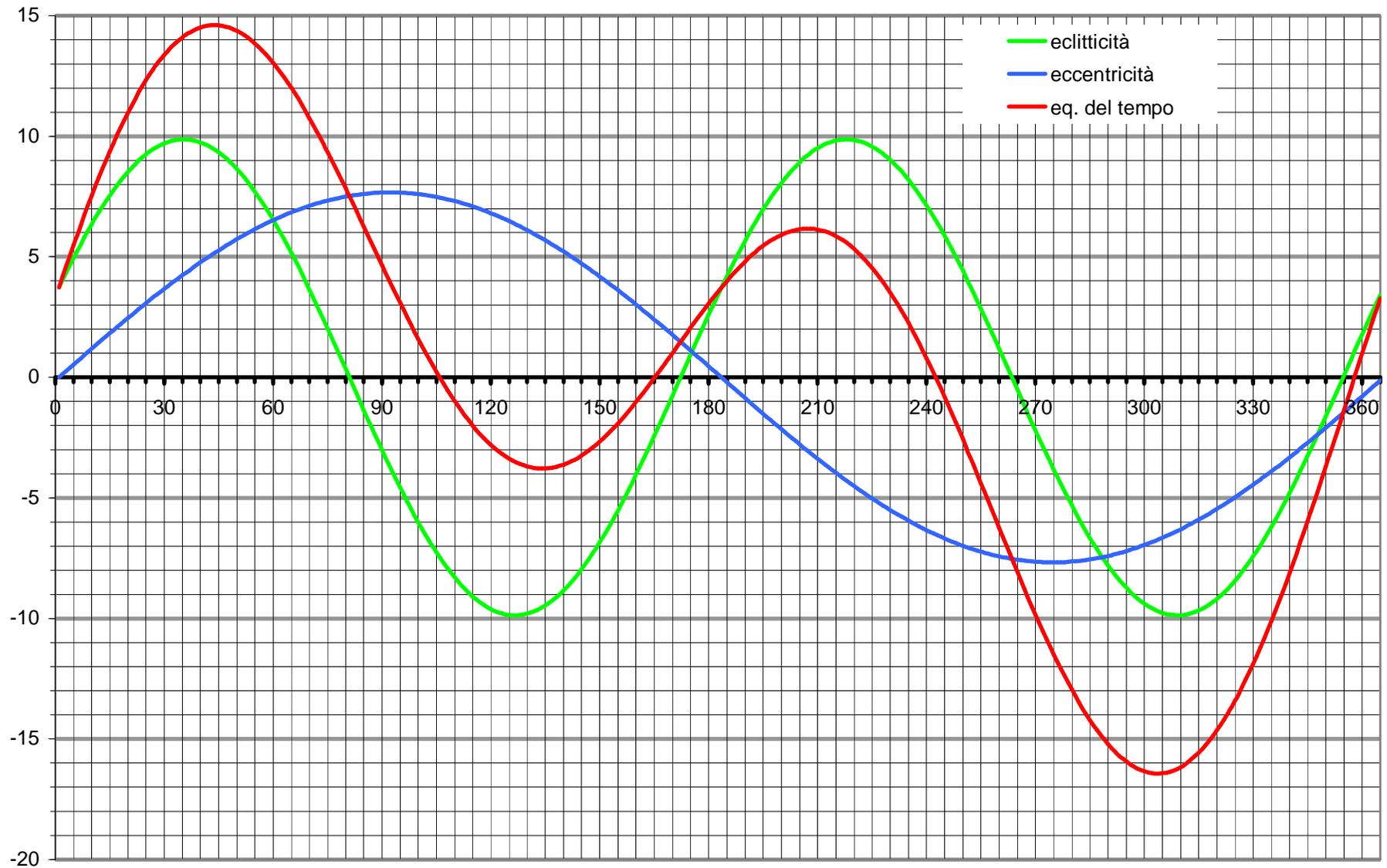
In molti calcoli si può utilizzare l'approssimazione:

$$E = -9,87 \sin [2g (N - 81)] + 7,67 \sin [g (N - 1)]$$

Dove E è espressa in minuti, $g = 360^\circ/365$ se gli angoli sono espressi in gradi, oppure $g = 2\pi/365$ se gli angoli sono espressi in radianti.

N è il numero del giorno, per esempio: $N = 1$ per il 1° gennaio, $N = 2$ per il 2 gennaio e così via.

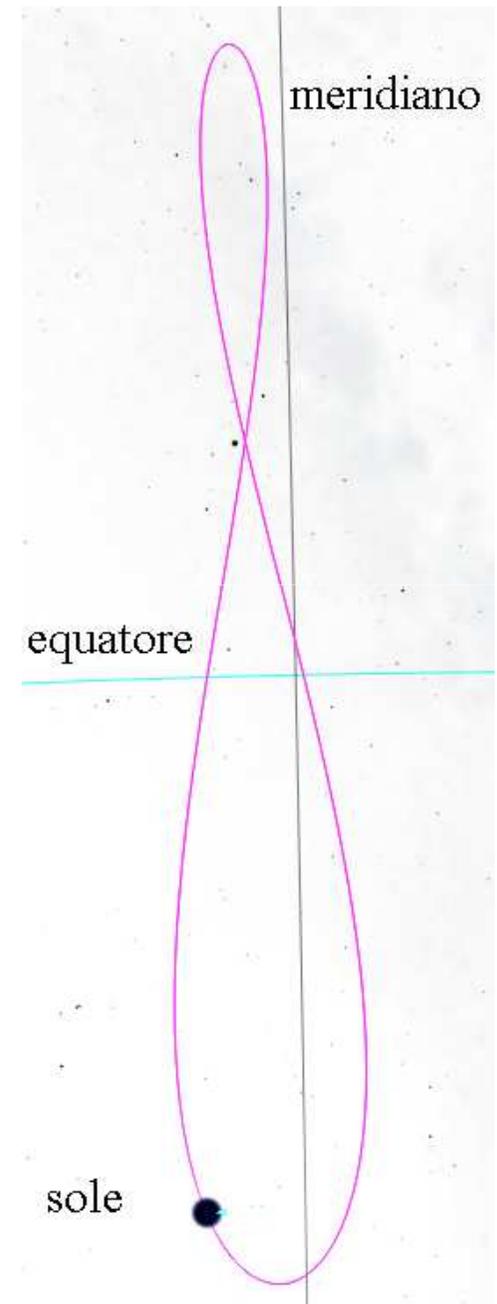
Equazione del tempo



Equazione del tempo

L'equazione del tempo arriva ad un valore massimo in anticipo di circa 14 minuti verso metà febbraio, ad un valore massimo in ritardo di circa 16 minuti nei primi giorni di novembre; in queste due epoche dunque il Sole sarà in meridiano rispettivamente alle 12h 14m e alle 11h 44m di tempo medio.

La stessa equazione si annulla 4 volte all'anno, e precisamente a metà aprile, metà giugno, al principio di settembre ed a Natale, nelle quali epoche dunque il Sole passerà in meridiano alle 12h precise di tempo medio.



Tempo locale

Il tempo siderale, il tempo solare vero ed il tempo solare medio, dipendendo dal meridiano del luogo di osservazione, sono tutti tempi locali.

Se si confrontano infatti due orologi, ambedue a tempo siderale o medio, di due località diverse si trova che le loro indicazioni differiscono.

La differenza è uguale alla differenza delle longitudini geografiche dei due luoghi.

Reciprocamente si può dunque determinare la differenza di longitudine di due luoghi confrontando le indicazioni relative allo stesso istante di due orologi che si trovano nei due luoghi.

I due orologi devono segnare lo stesso tempo, ma è indifferente che essi segnino tempo siderale o tempo medio.