



Laurea triennale in Fisica
a.a. 2019 - 2020

FONDAMENTI DI ASTROFISICA

LEZIONE 3

Prof. Angelo Angeletti

angelo.angeletti@virgilio.it

www.angeloangeletti.it

**La Terra:
parametri fisici
e
moti principali**

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

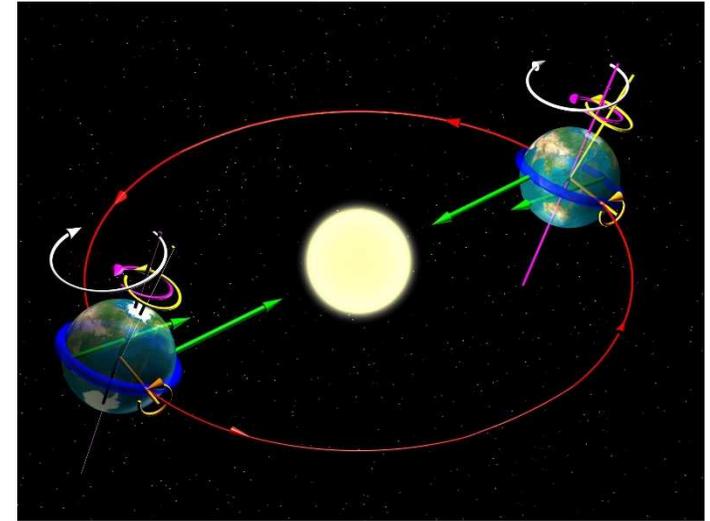
Rotazione della linea degli apsidi

Precessione degli equinozi

Variazione della distanza tra i fuochi

Moto di traslazione

Conseguenze dei moti millenari della Terra



Il moto di rotazione della Terra

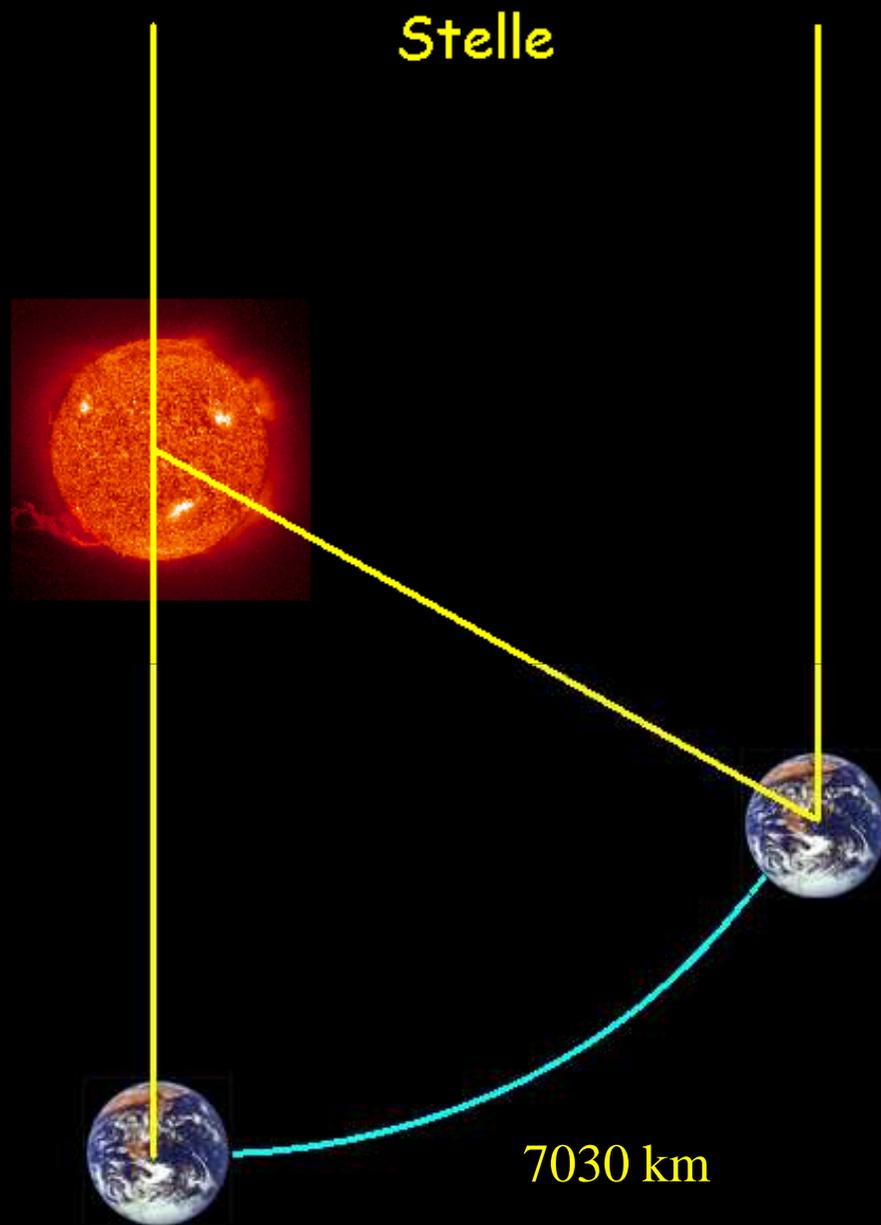
È il moto che la Terra compie intorno al proprio asse, da ovest verso est, cioè in senso inverso all'apparente moto diurno della Sfera Celeste e del Sole.

Il periodo di rotazione è di 23,9344726 ore = 23h 56min 4,0905s.

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 dei giorni di circa **1,5 millisecondi 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 (**circa 3,82 cm all'anno**).

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

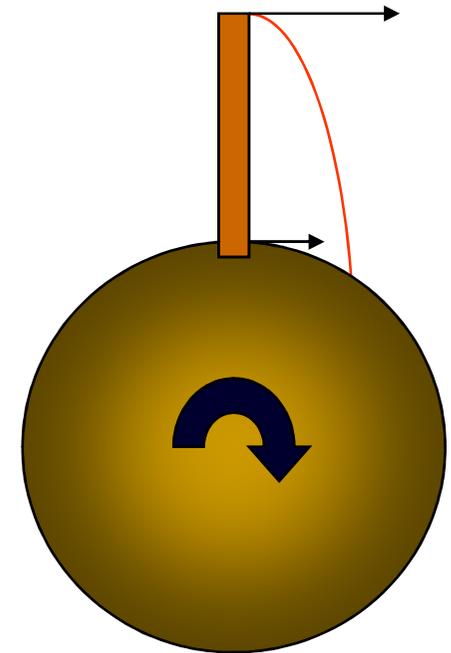
Prove della rotazione

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
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*.

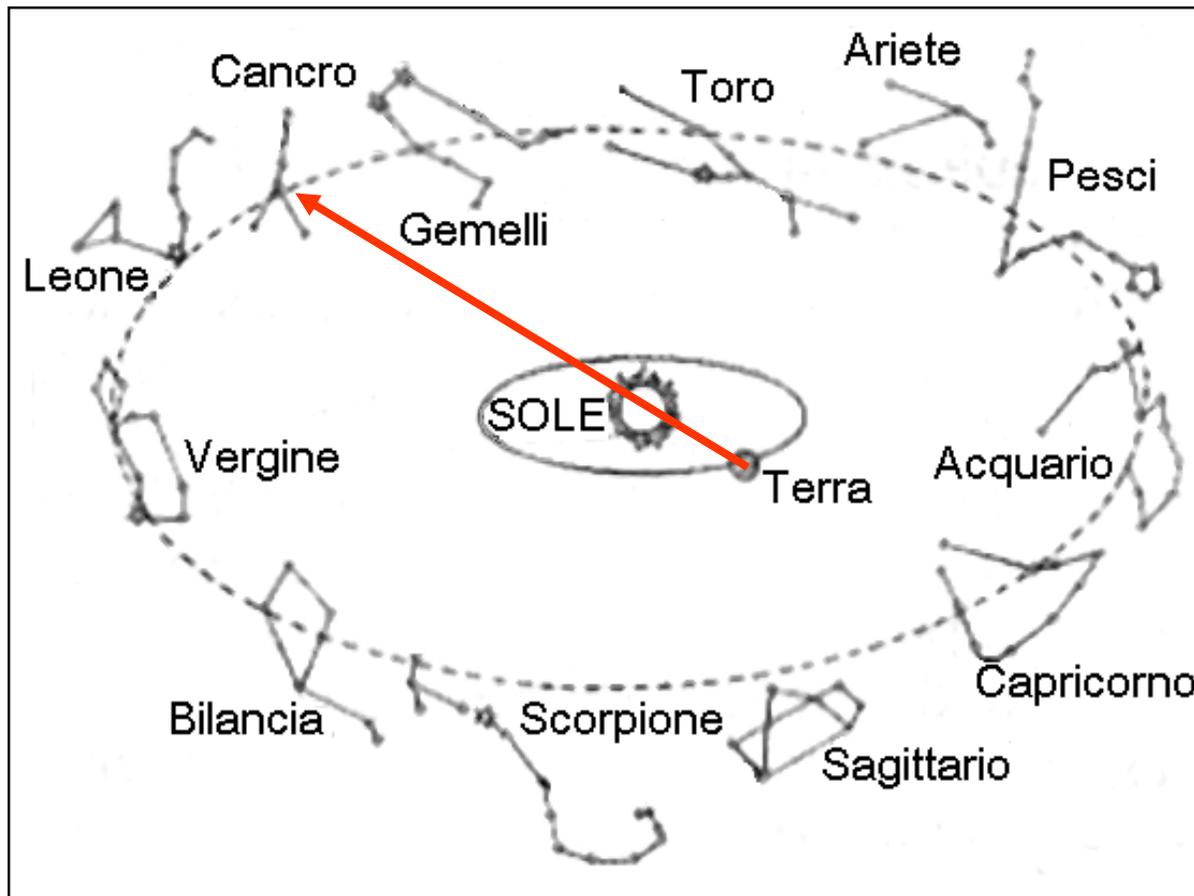
L'asse di rotazione della Terra è inclinato di $66^{\circ}33'$ rispetto al piano dell'orbita ($23^{\circ}27'$ rispetto alla normale a tale piano).

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.

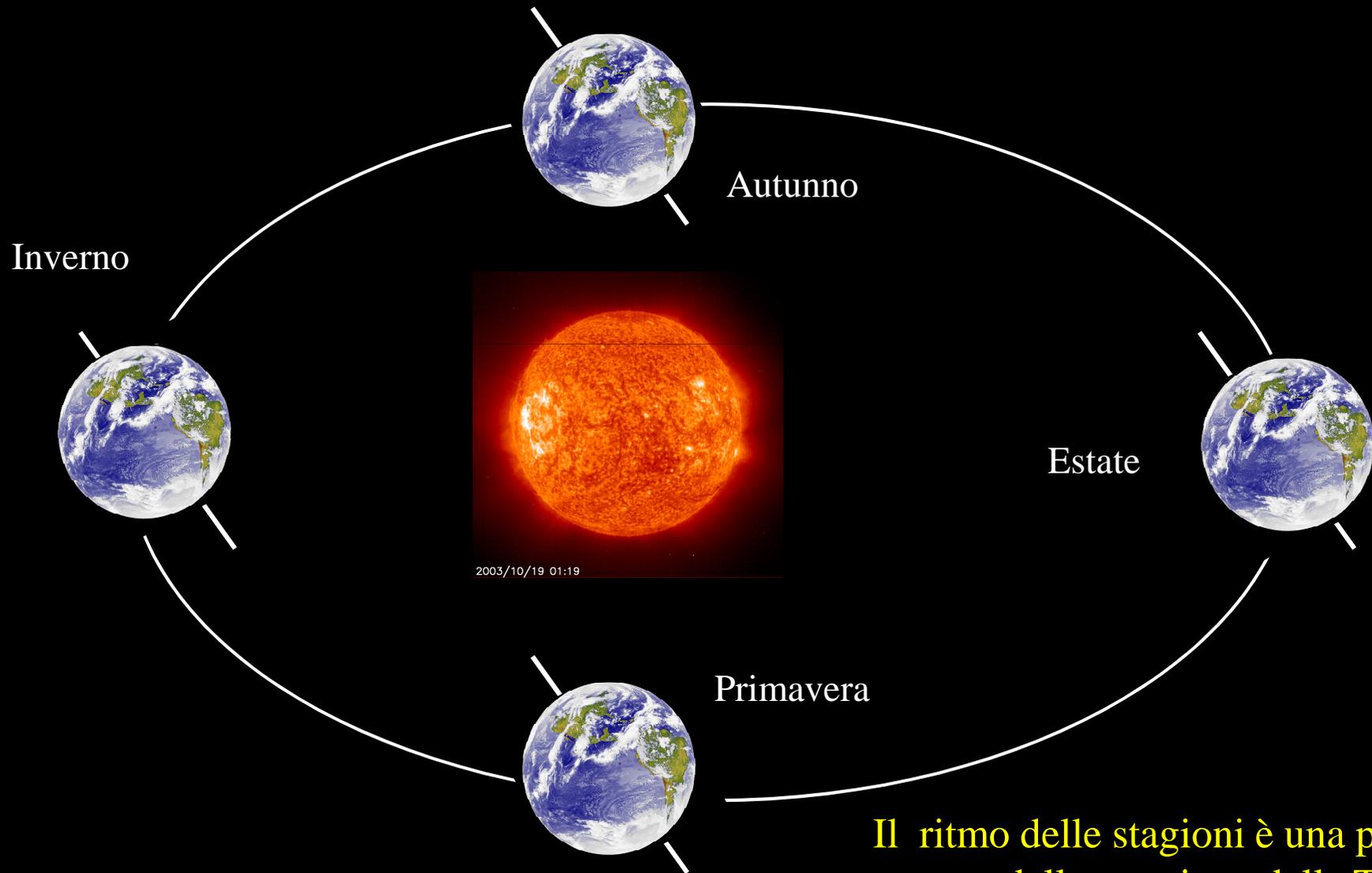
Periodicità annua di alcuni gruppi di stelle cadenti.

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

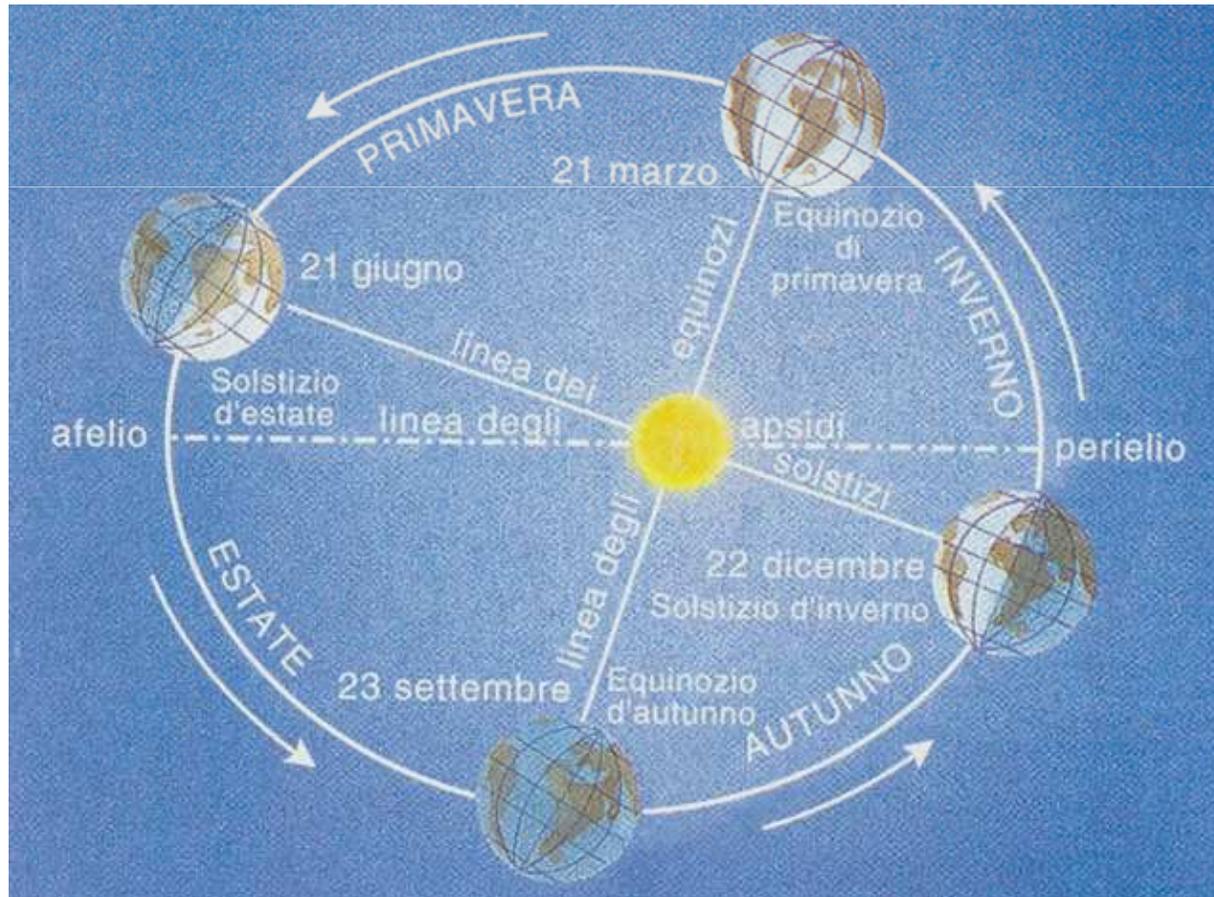


Il ritmo delle stagioni è una prova della rotazione della Terra.

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:

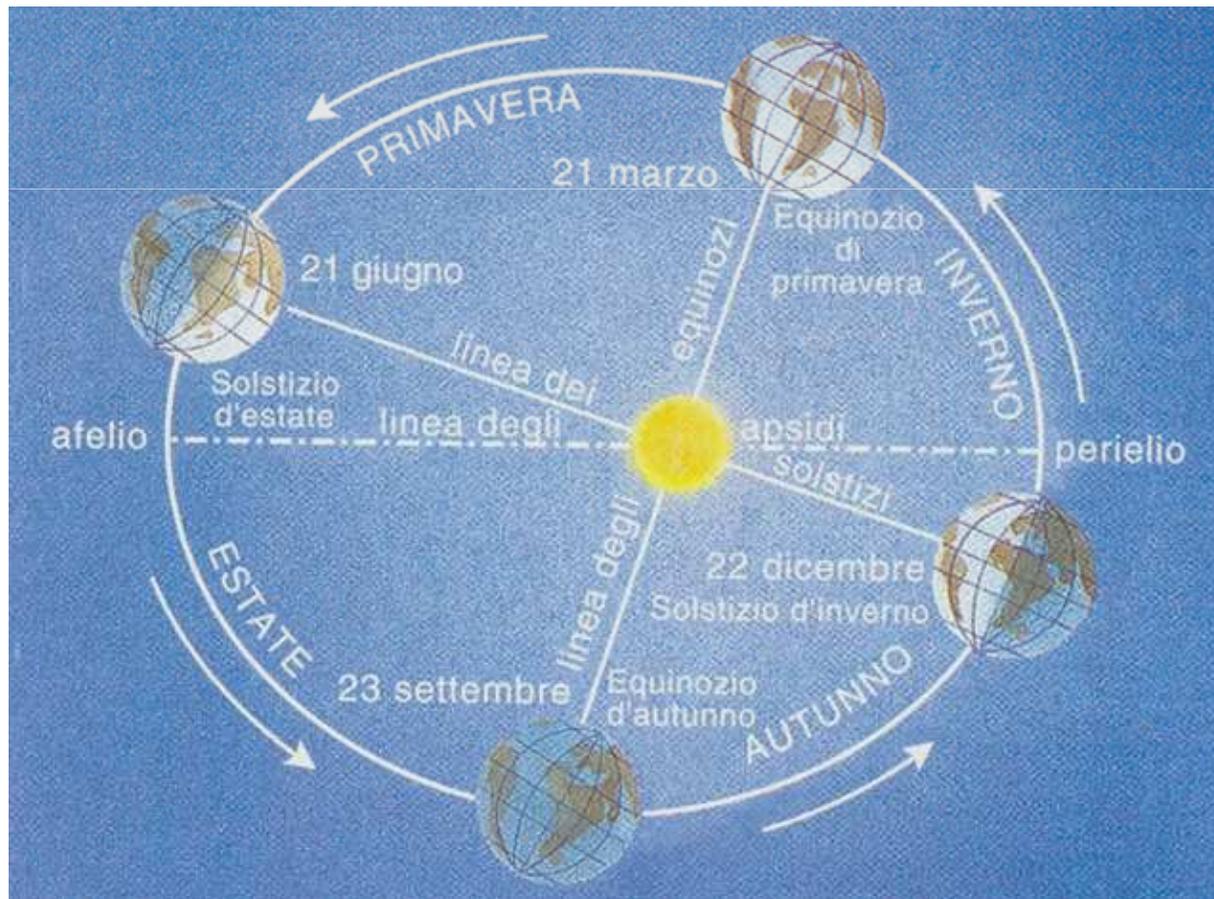
il 21 marzo (*equinozio di primavera*) e il 23 settembre (*equinozio d'autunno*).



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.

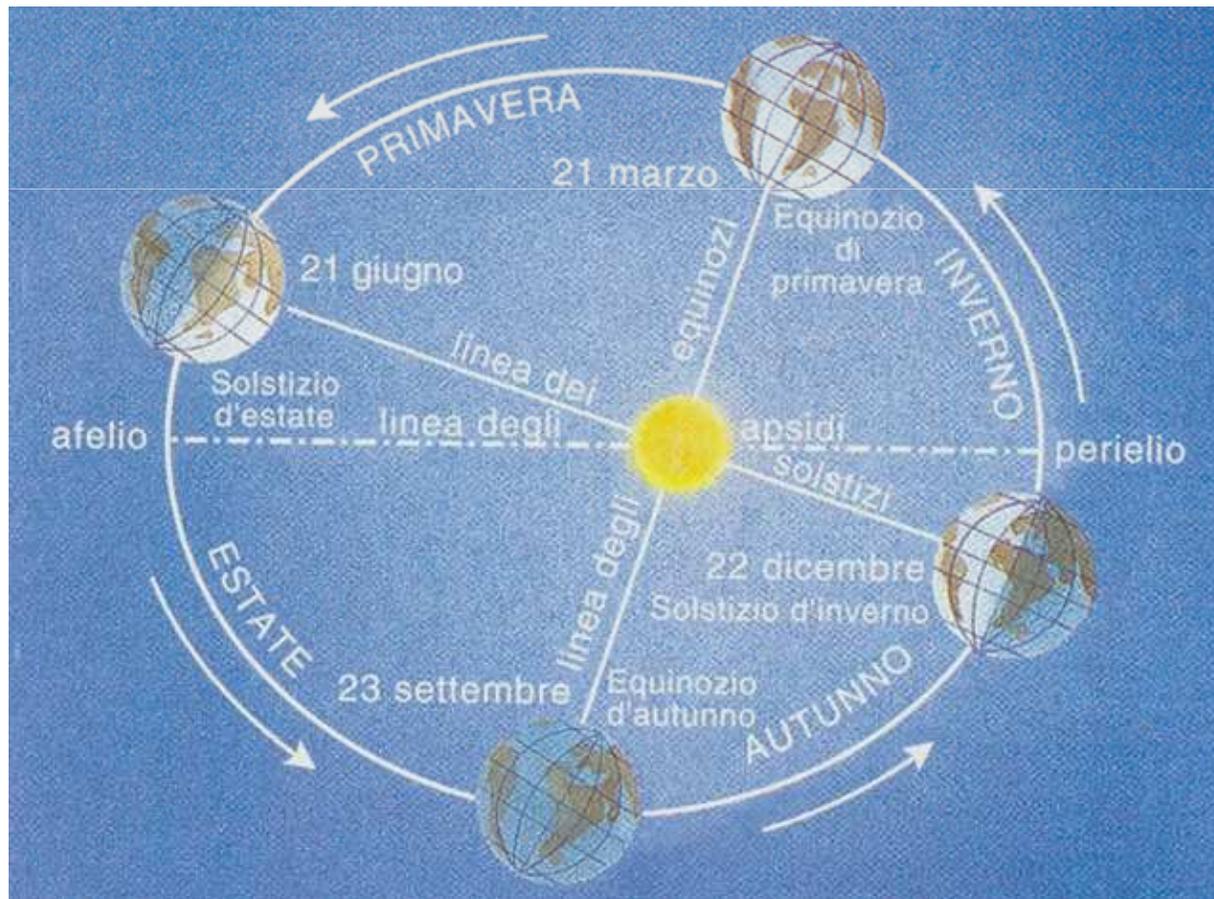
È il giorno del *solstizio d'estate*.



Il ritmo delle stagioni

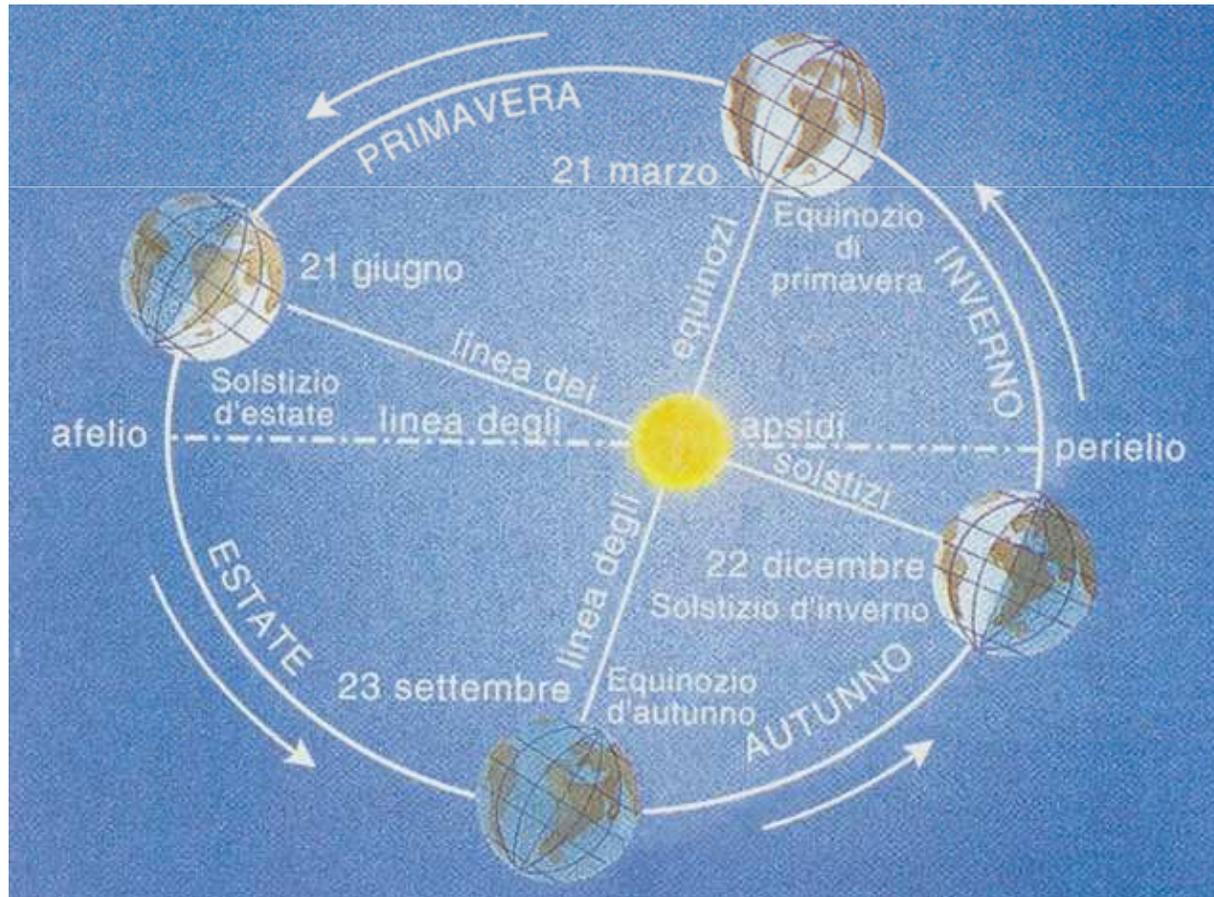
Il 22 dicembre il sole è allo zenit nei punti che si trovano sul parallelo 23° 27' Sud (tropico del Capricorno) e in tutti i punti a sud di esso raggiunge la massima altezza dell'anno sull'orizzonte nord.

È il giorno del *solstizio d'inverno*.



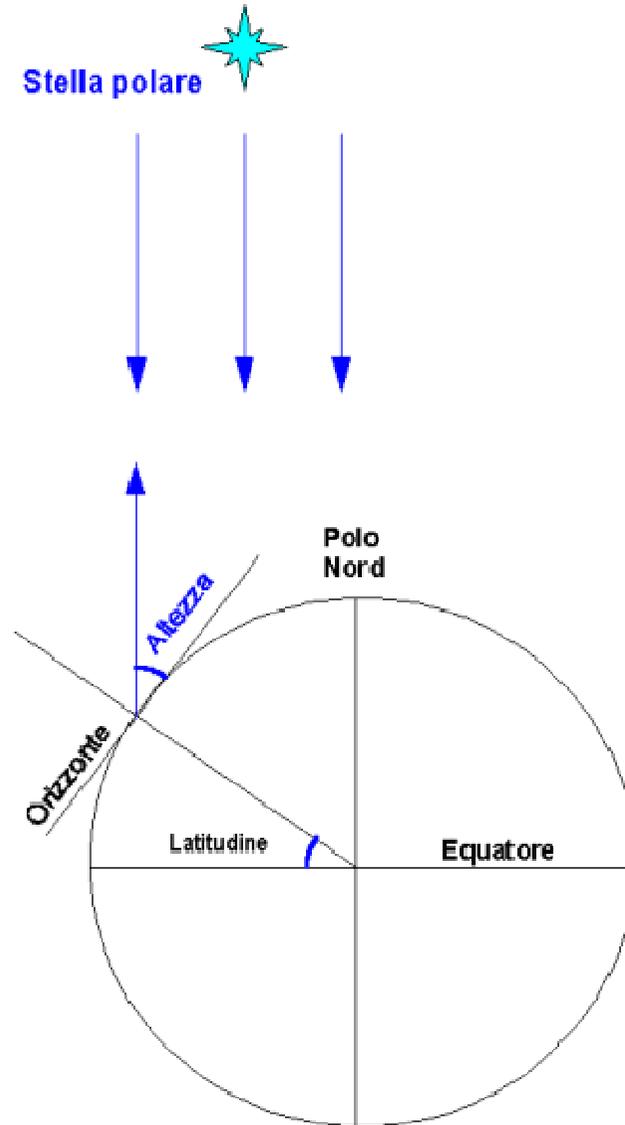
Il ritmo delle stagioni

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

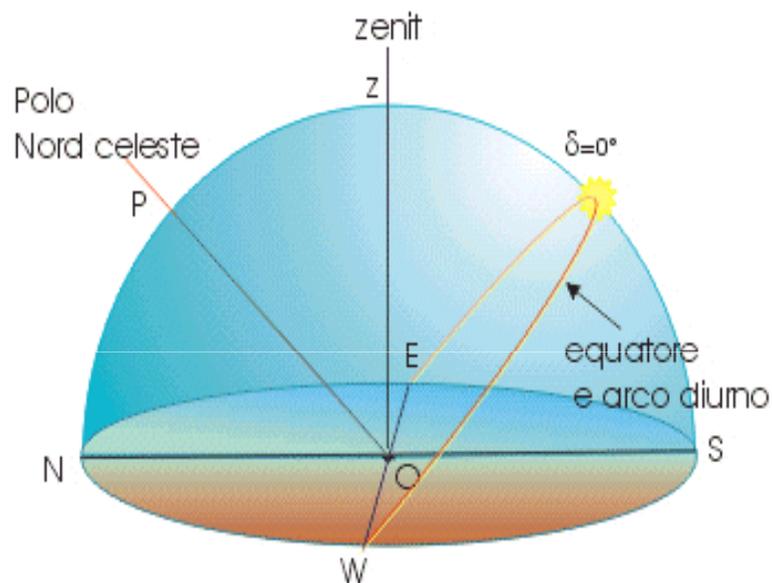
Altezza del Polo Nord Celeste sull'orizzonte



$$h = \varphi$$

Il ritmo delle stagioni

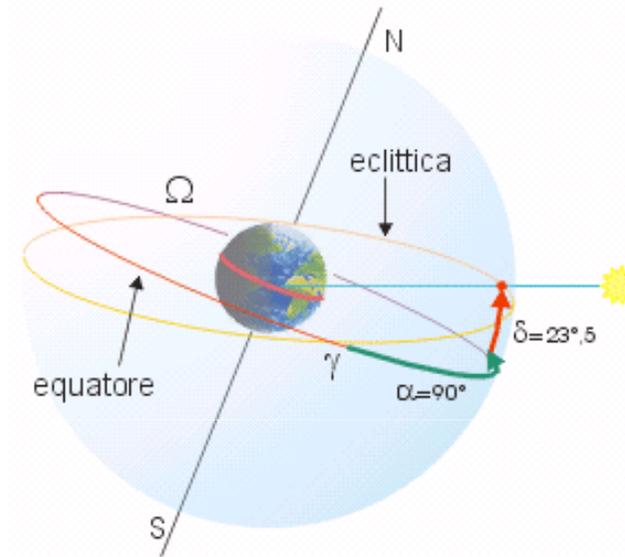
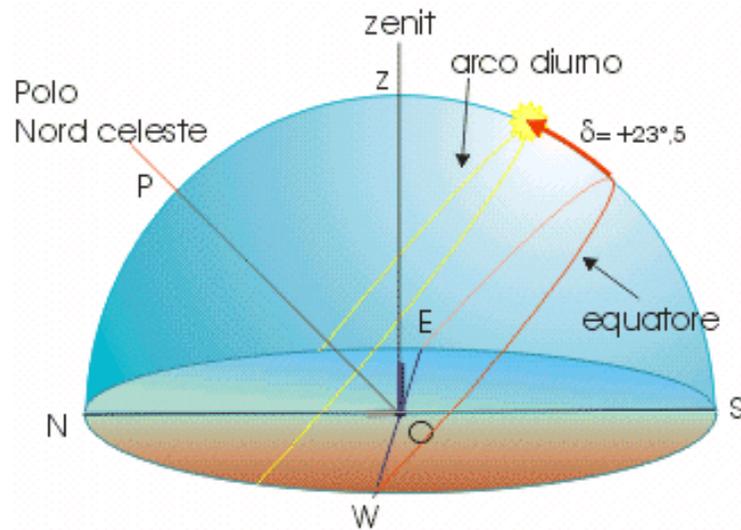
Come si vede il cielo all'equinozio



- 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

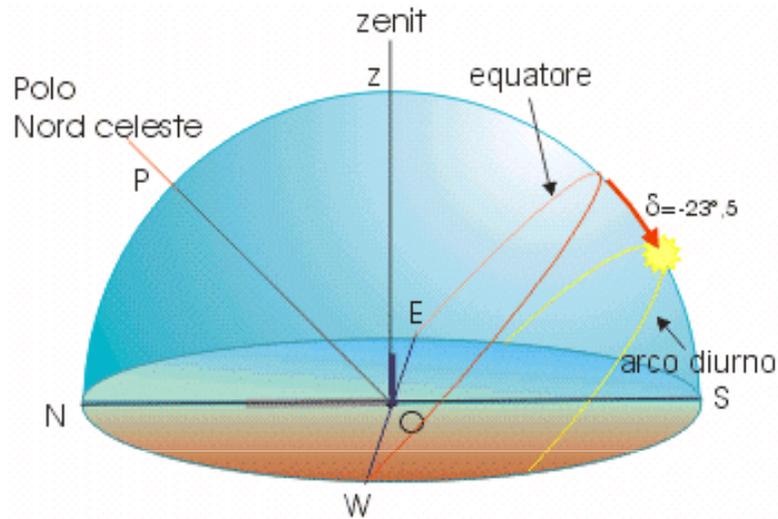


Coordinate equatoriali del Sole:
 $\delta = +23^\circ,5$ $\alpha = 90^\circ$

- 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.

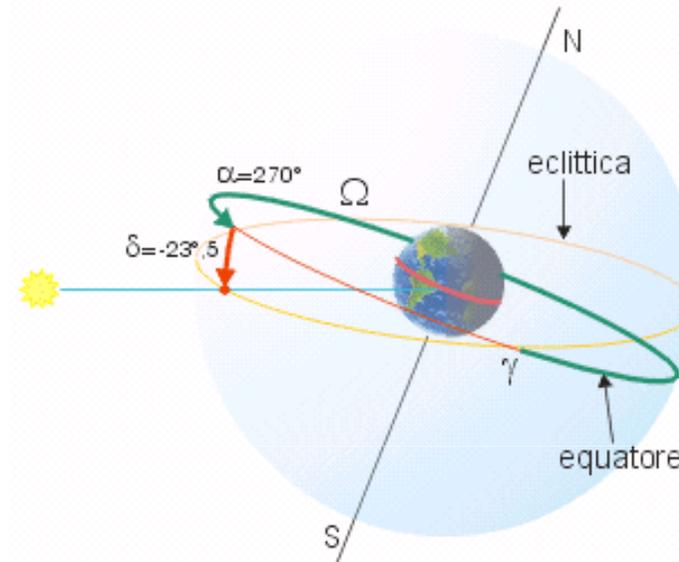
Il ritmo delle stagioni

Come si vede il cielo al solstizio d'inverno



Coordinate equatoriali del Sole:

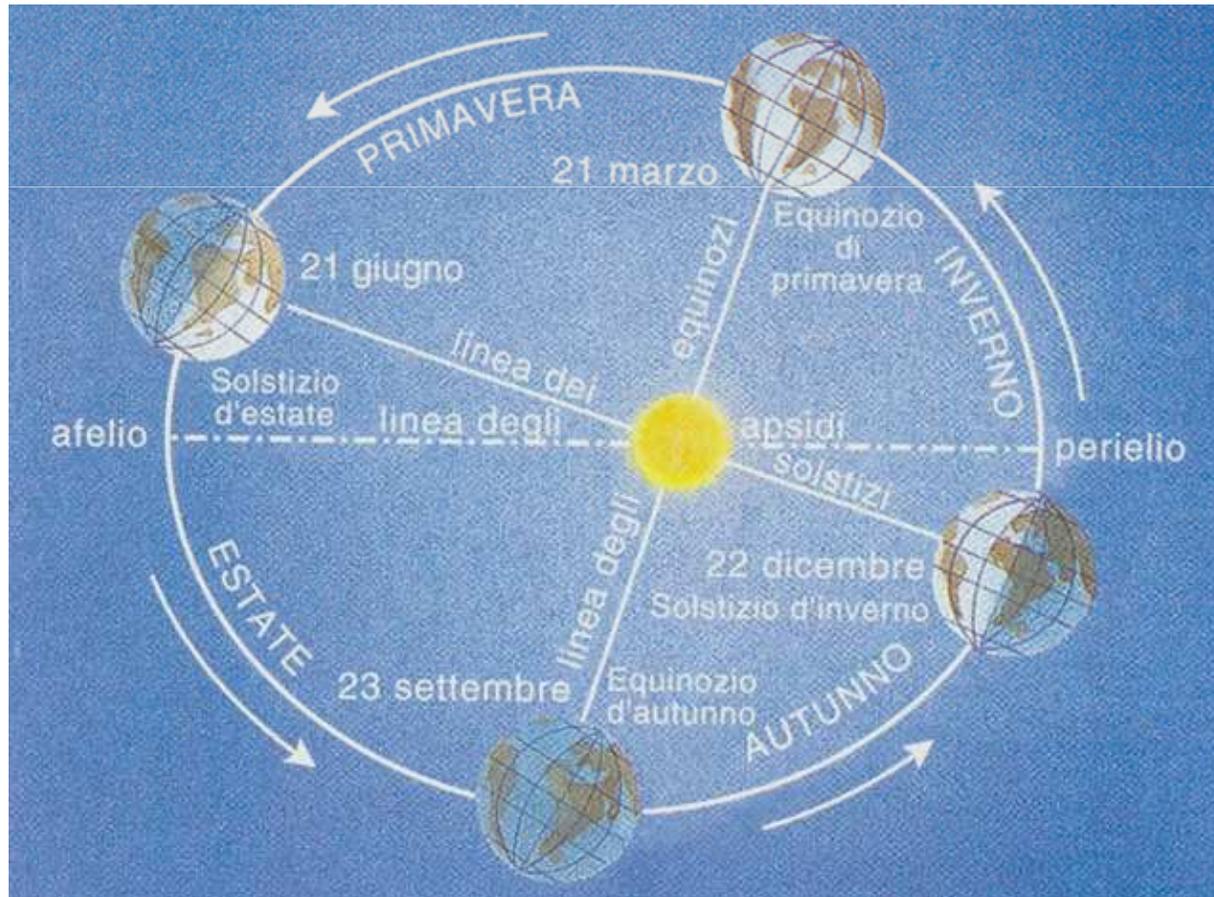
$$\delta = -23,5^\circ \quad \alpha = 270^\circ$$



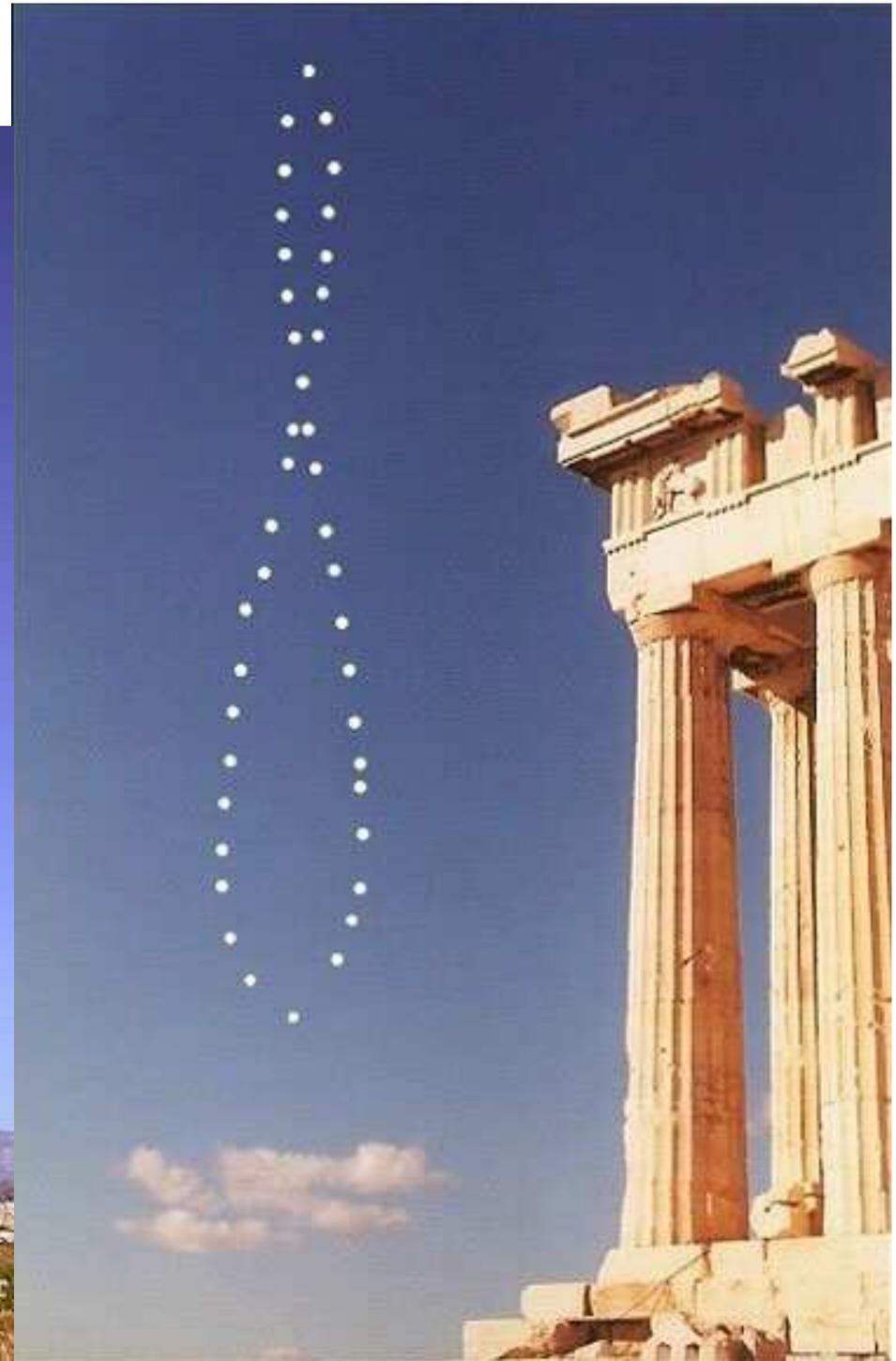
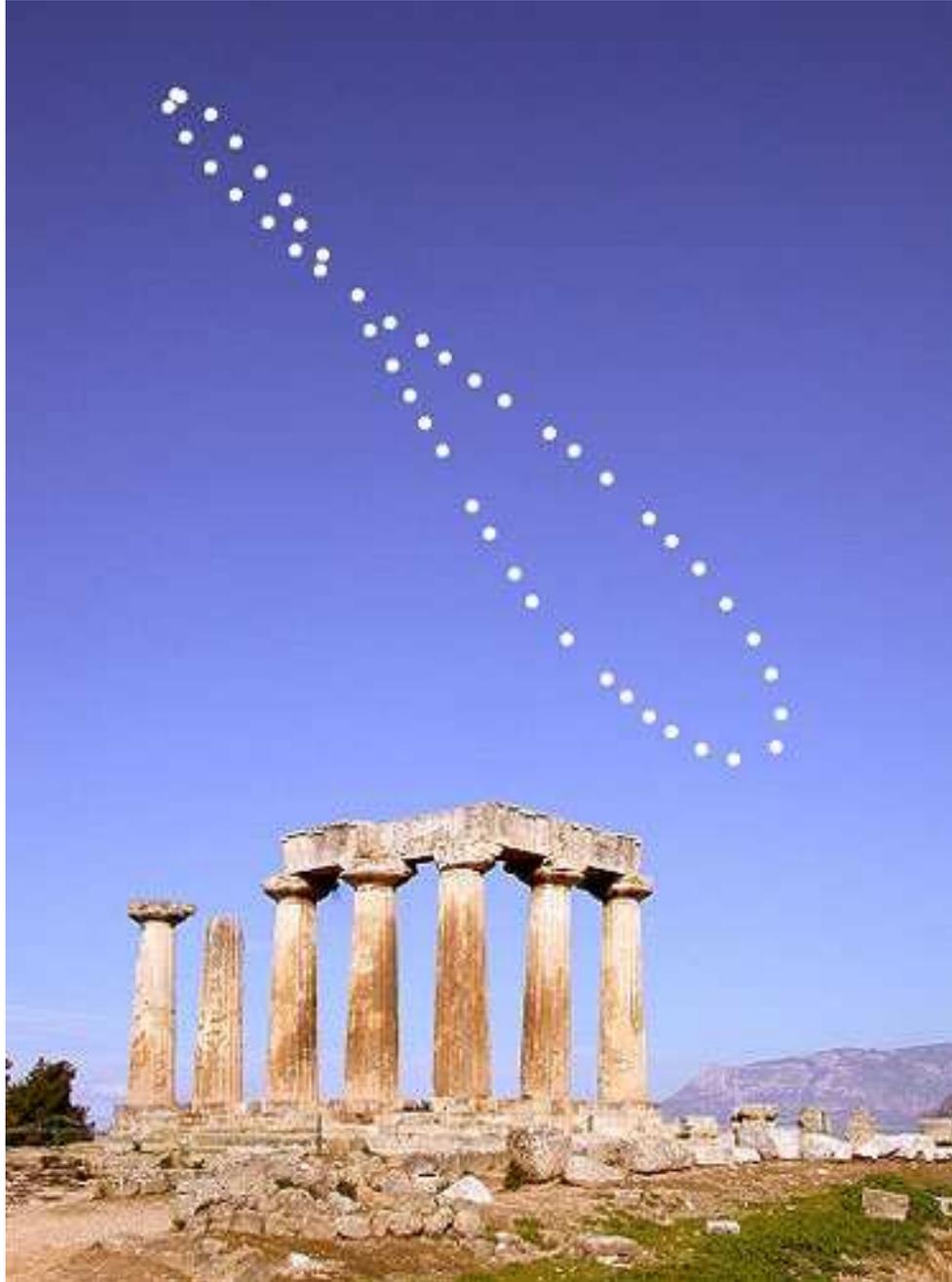
- Il Sole sorge a sud-est tramonta a sud-ovest
- Il Sole raggiunge la sua minima declinazione e la sua minima altezza sull'orizzonte $(90 - \varphi - 23,5)^\circ$.
- L'arco diurno è più breve che in qualsiasi altro periodo dell'anno.
- Gli oggetti proiettano ombre lunghe

Il ritmo delle stagioni

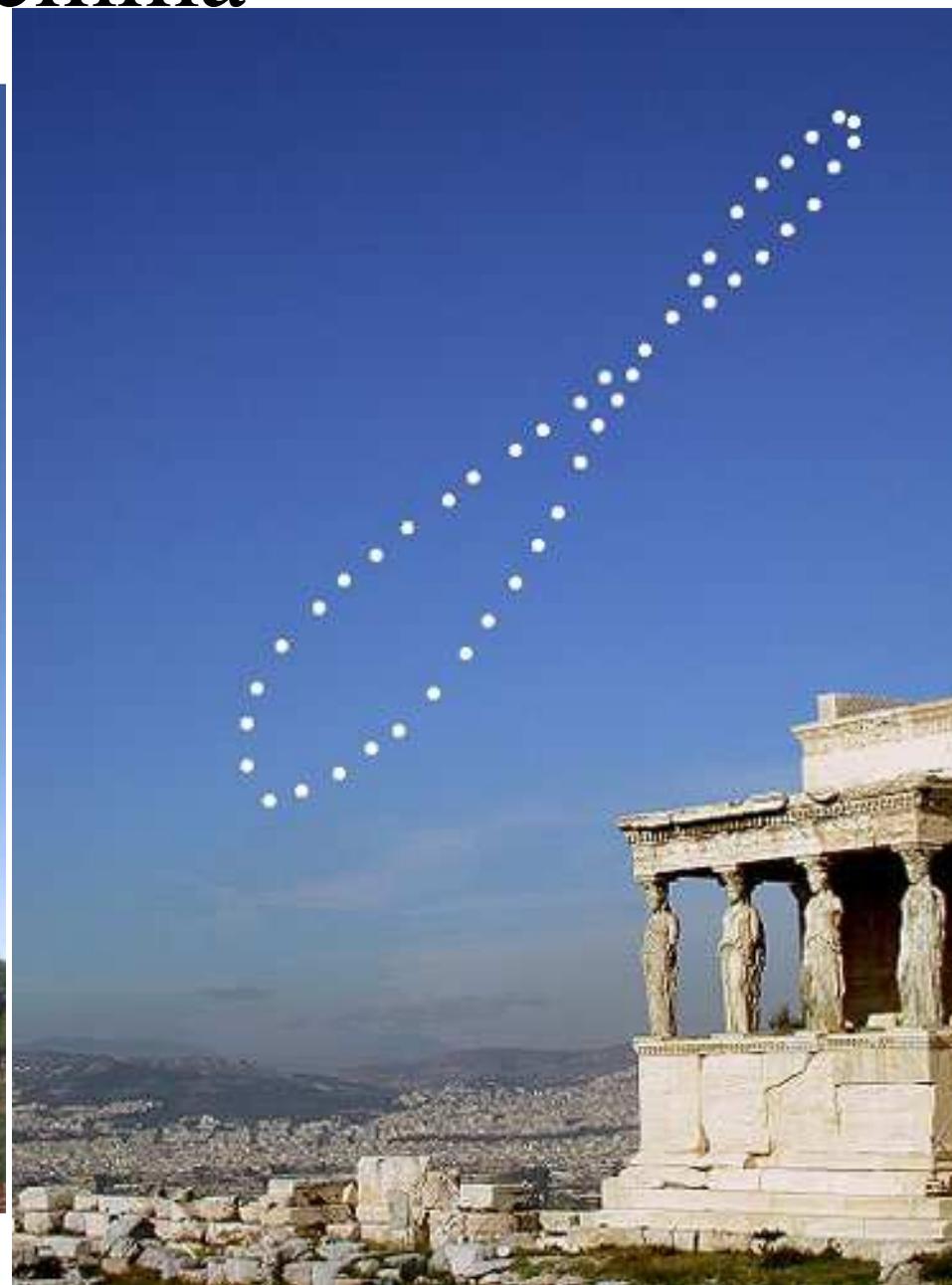
La linea che unisce il perielio all'afelio si chiama *linea dei nodi*, oppure *linea degli apsidi*.



Analemma



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.

Quest'anno si avrà:

<i>Emisfero Boreale</i>	<i>Emisfero Australe</i>	<i>dal - al</i>	<i>Durata</i>
Primavera	Autunno	20 marzo – 20 giugno	92d 18h
Estate	Inverno	20 giugno – 22 settembre	93d 16h
Autunno	Primavera	22 settembre – 21 dicembre	89d 20h
Inverno	Estate	21 dicembre – 20 marzo 2021	89d

Il ritmo delle stagioni

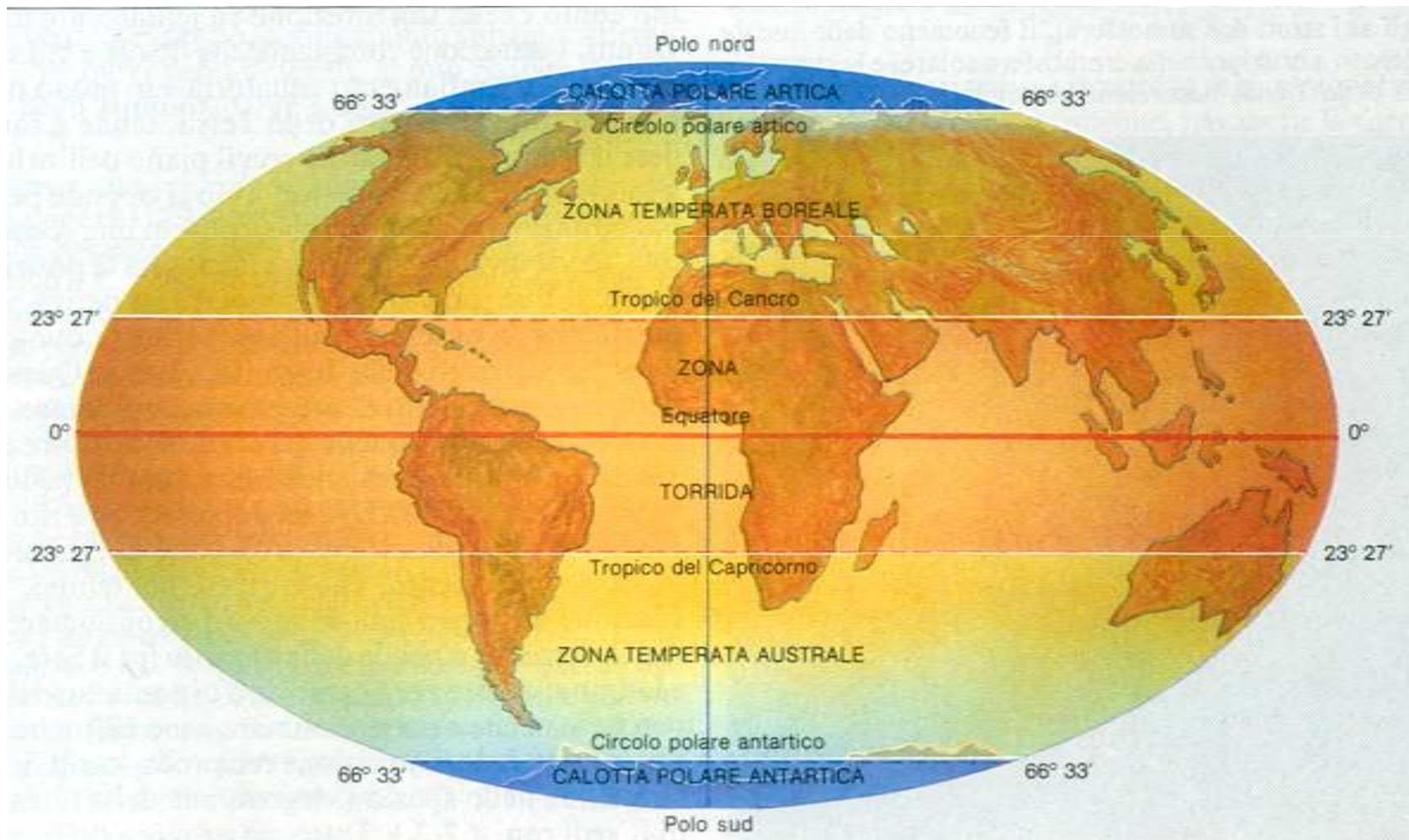
Anno	Equinozio di primavera	Solstizio d'estate	Equinozio d'autunno	Solstizio d'inverno
2016	20 marzo ore 04:30	20 giugno 22:34	22 settembre ore 14:21	21 dicembre 10:44
2017	20 marzo ore 10:29	21 giugno 04:24	22 settembre ore 20:02	21 dicembre 16:28
2018	20 marzo ore 16:15	21 giugno 10:07	23 settembre ore 01:54	21 dicembre 22:22
2019	20 marzo ore 21:58	21 giugno 15:54	23 settembre ore 07:50	22 dicembre 04:19
2020	20 marzo ore 03:50	20 giugno 21:44	22 settembre ore 13:31	21 dicembre 10:02
2021	20 marzo ore 09:37	21 giugno 03:32	22 settembre ore 19:21	21 dicembre 15:59
2022	20 marzo ore 15:33	21 giugno 09:14	23 settembre ore 01:04	21 dicembre 21:48
2023	20 marzo ore 21:24	21 giugno 14:58	23 settembre ore 06:50	22 dicembre 03:27
2024	20 marzo ore 03:06	20 giugno 20:51	22 settembre ore 12:44	21 dicembre 09:20
2025	20 marzo ore 09:01	21 giugno 02:42	22 settembre ore 18:19	21 dicembre 15:03

Riferito all'emisfero nord.

L'ora è in Tempo Universale.

Il ritmo delle stagioni

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

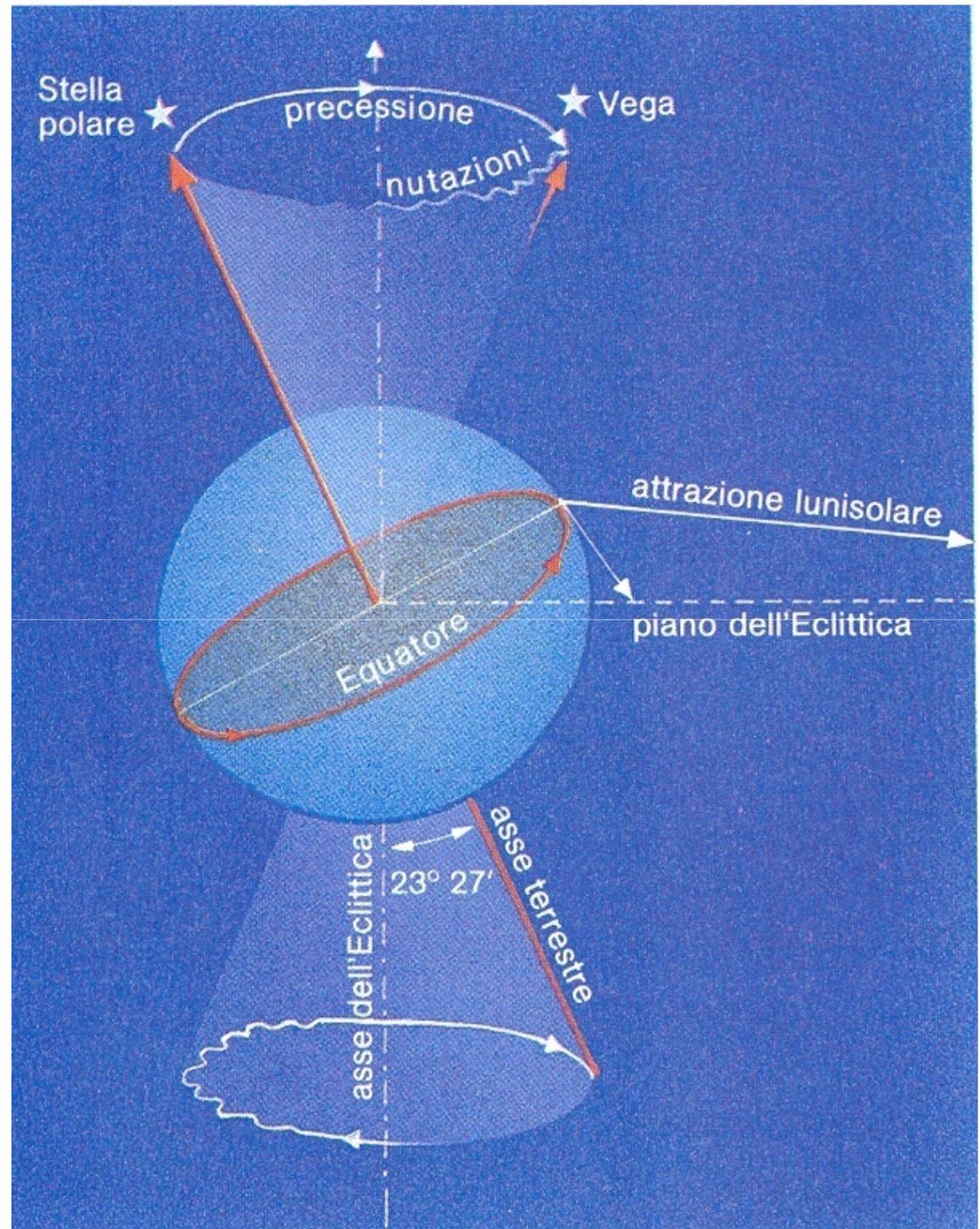


I moti secondari

Moto biconico

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

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

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 apsidi

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

$$365,25964 \text{ d} = 365\text{d } 6\text{h } 13\text{min } 52,9\text{s}.$$

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.

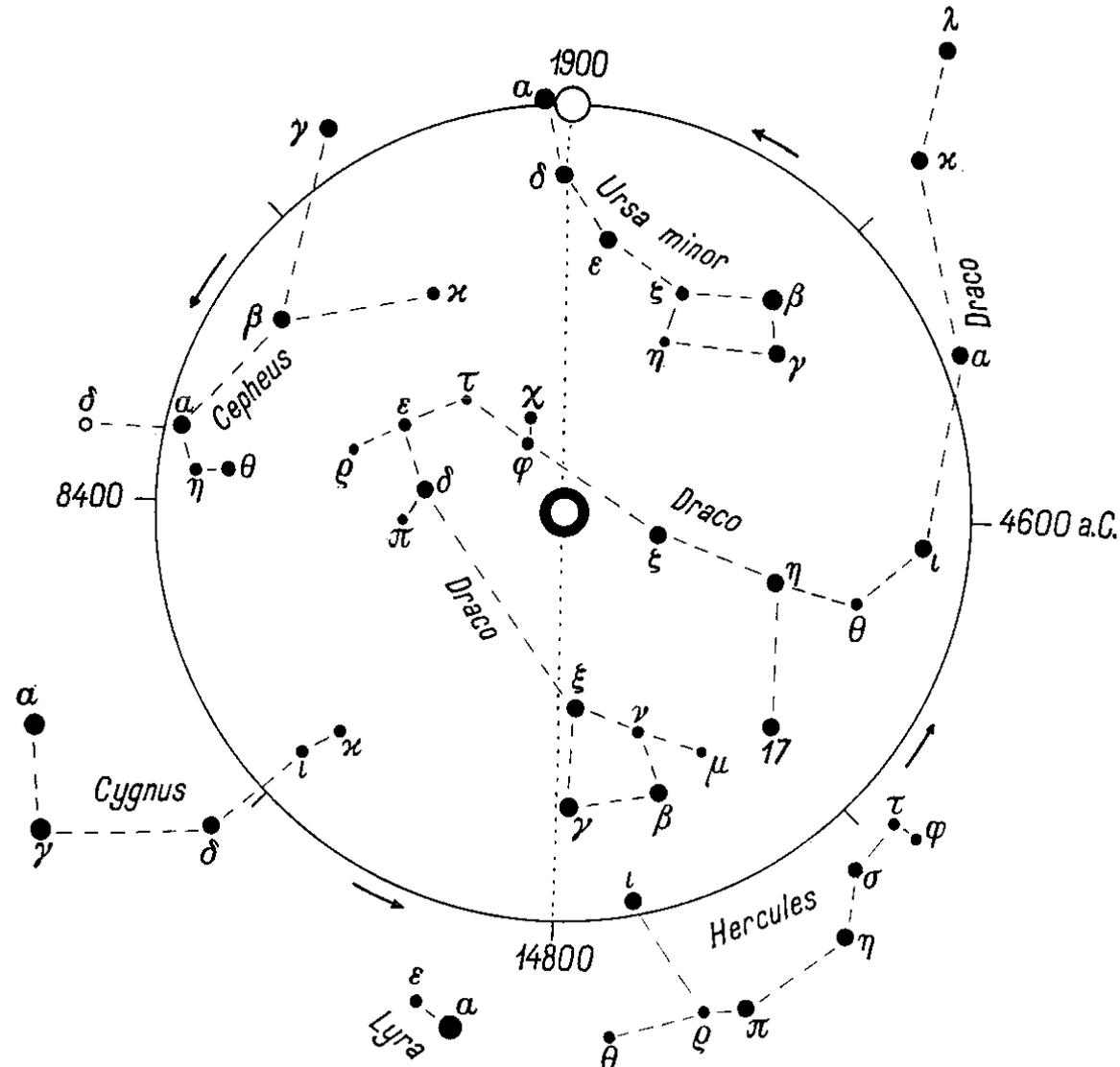
Quest'ultima, che è attualmente dista dal Polo poco più di mezzo grado, tra 13.000 anni ne sarà distante circa 47° e allora il Polo sarà indicato dalla stella Vega.

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



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

600 km/s

AMMASSO IN VERGINE

SUPERMASSO IN IDRA-CENTAURO

GRANDE ATTRATTORE

b

230 km/s

VIA LATTEA

SISTEMA SOLARE

a

VENERE

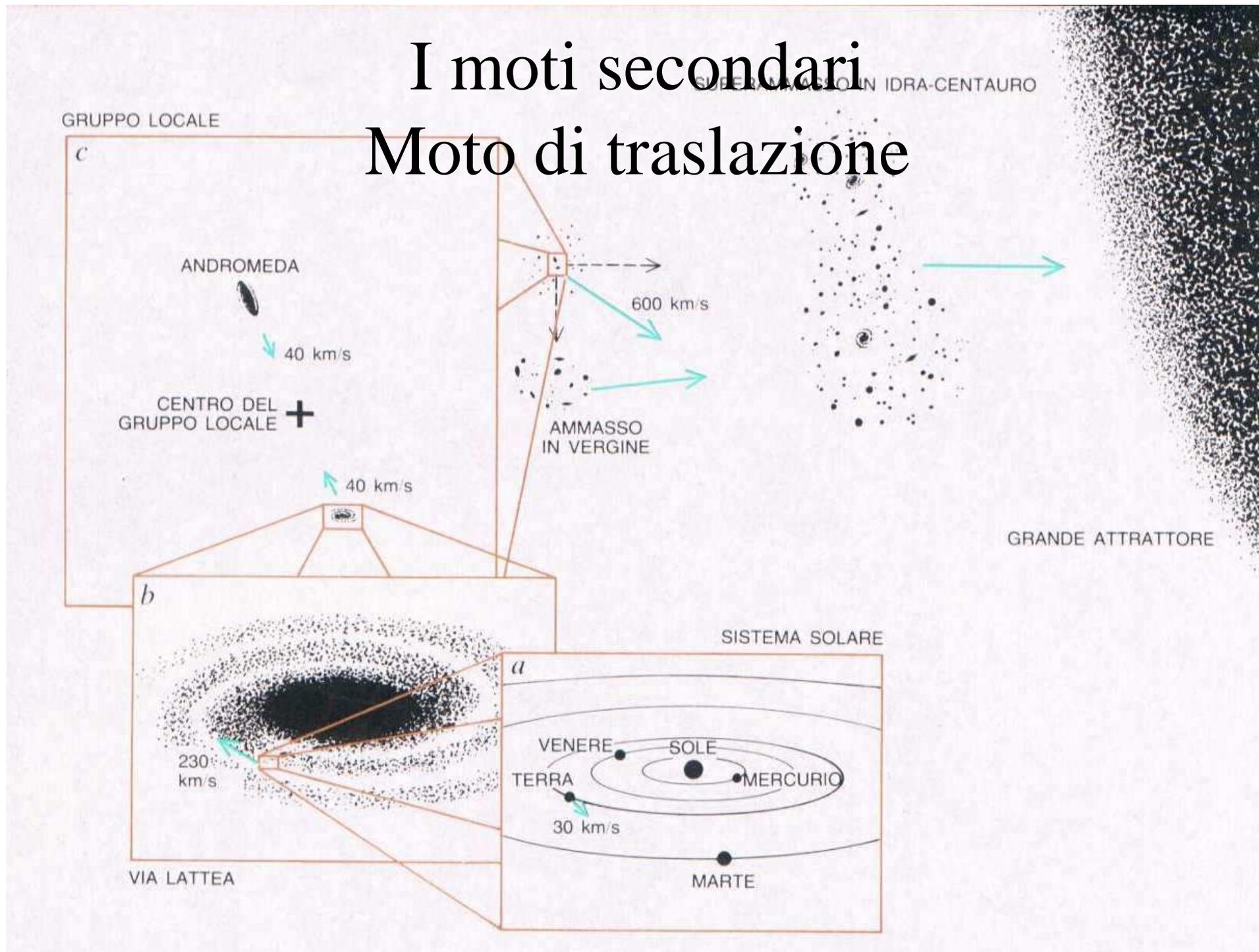
SOLE

TERRA

MERCURIO

30 km/s

MARTE



Conseguenze dei moti secondari

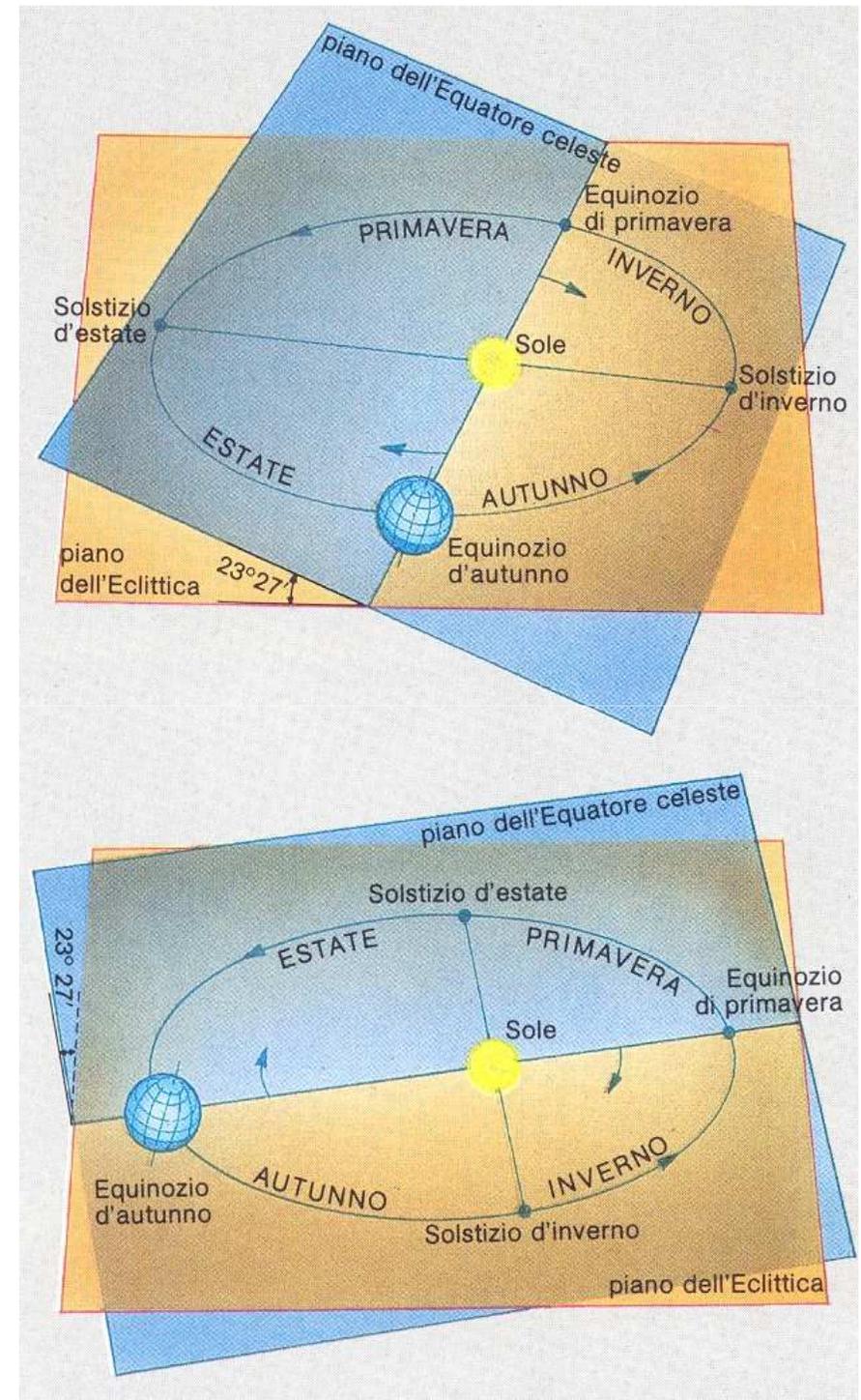
I moti millenari della Terra hanno importantissimi riflessi sul clima del nostro pianeta, poiché alterano nel tempo la distribuzione dell'insolazione secondo la latitudine e la stagione.

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.

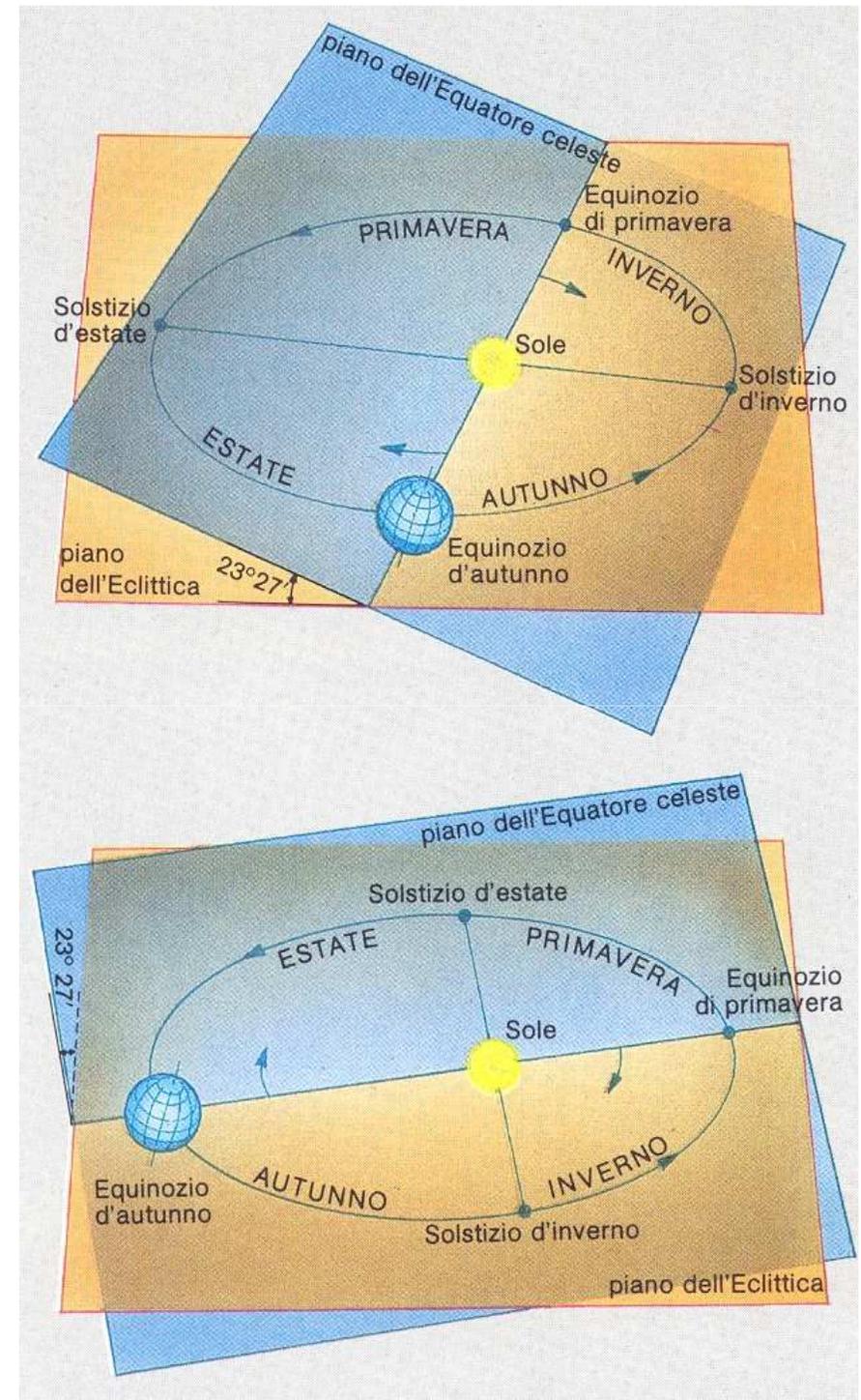
Conseguenze dei moti secondari

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

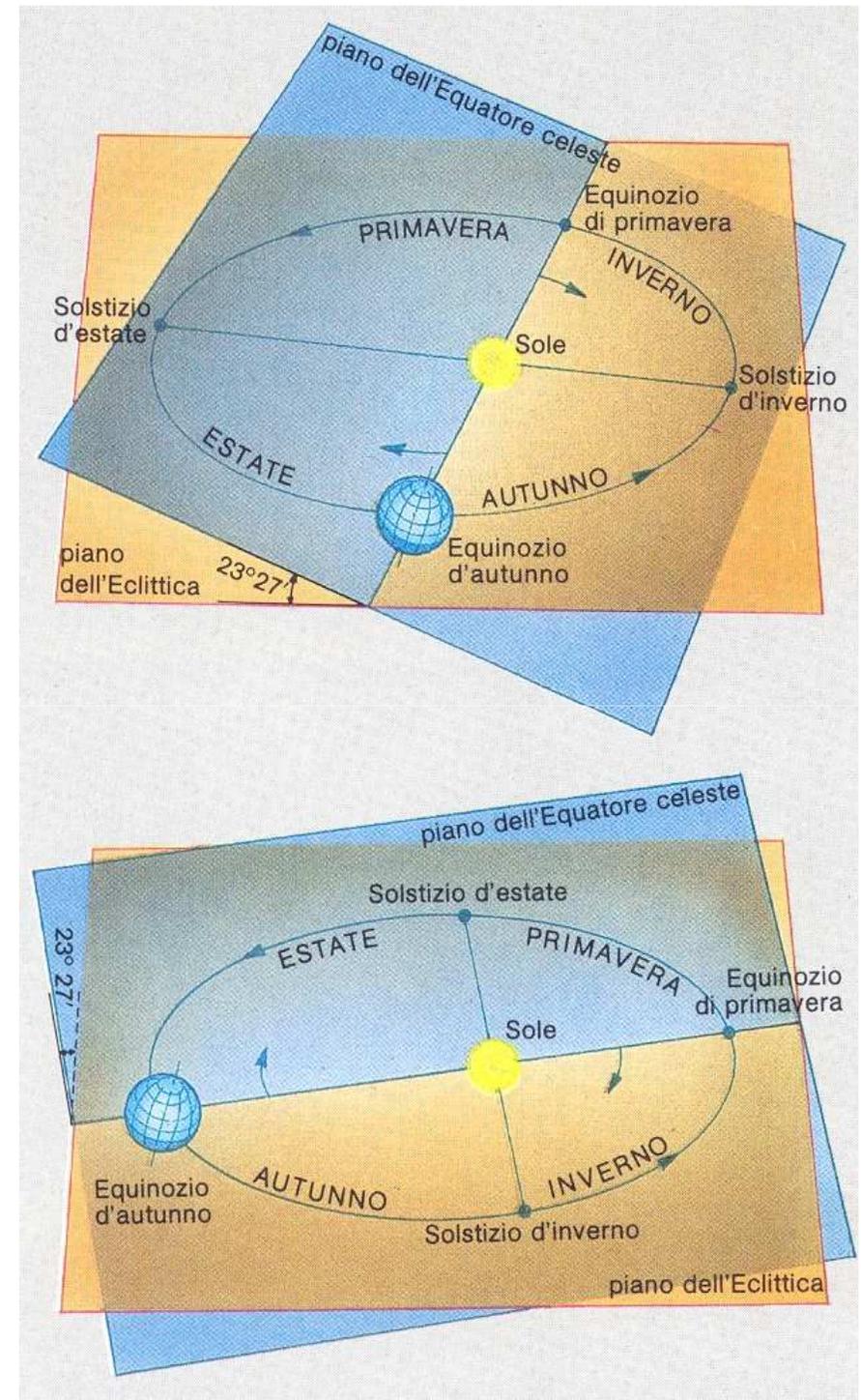
Attualmente il semestre autunno-inverno cade per il nostro emisfero boreale nel settore dell'orbita terrestre più vicino al perielio, dove la Terra ha una velocità di rivoluzione maggiore, e perciò esso dura circa 7 giorni e 6 ore in meno del semestre primavera-estate, che corrisponde al tratto di orbita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



Conseguenze dei moti secondari

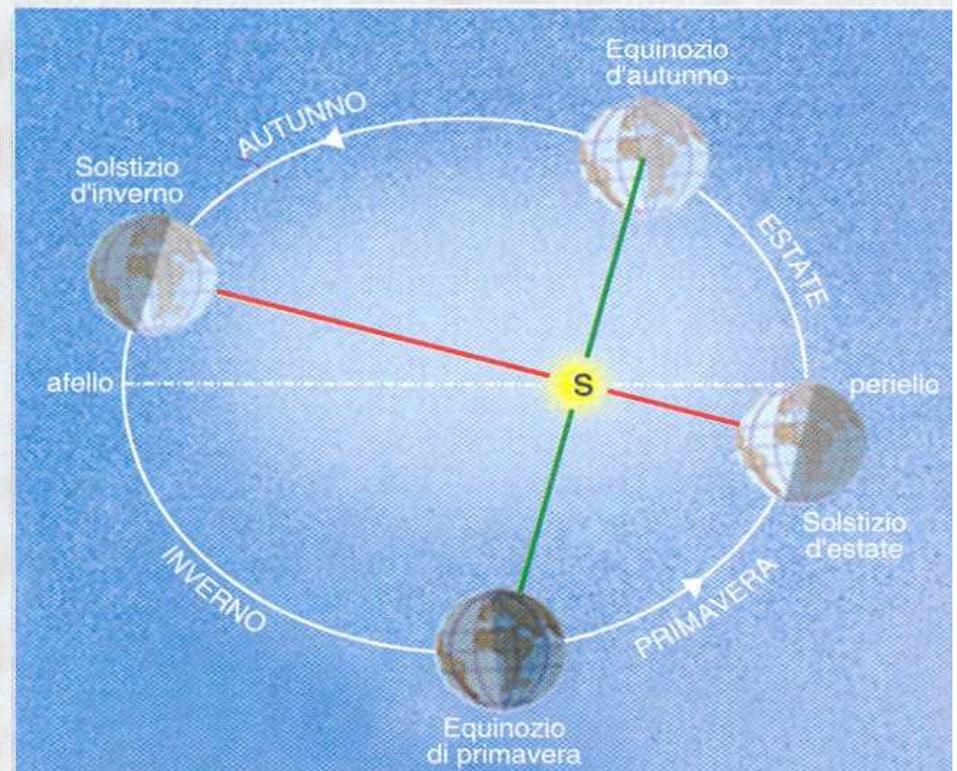
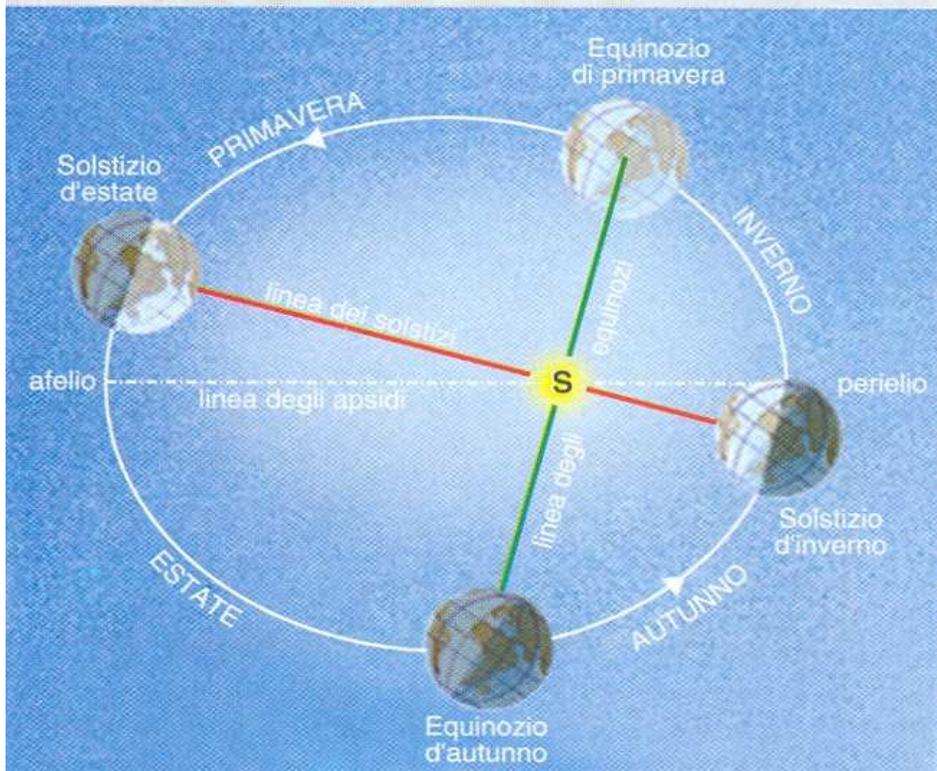
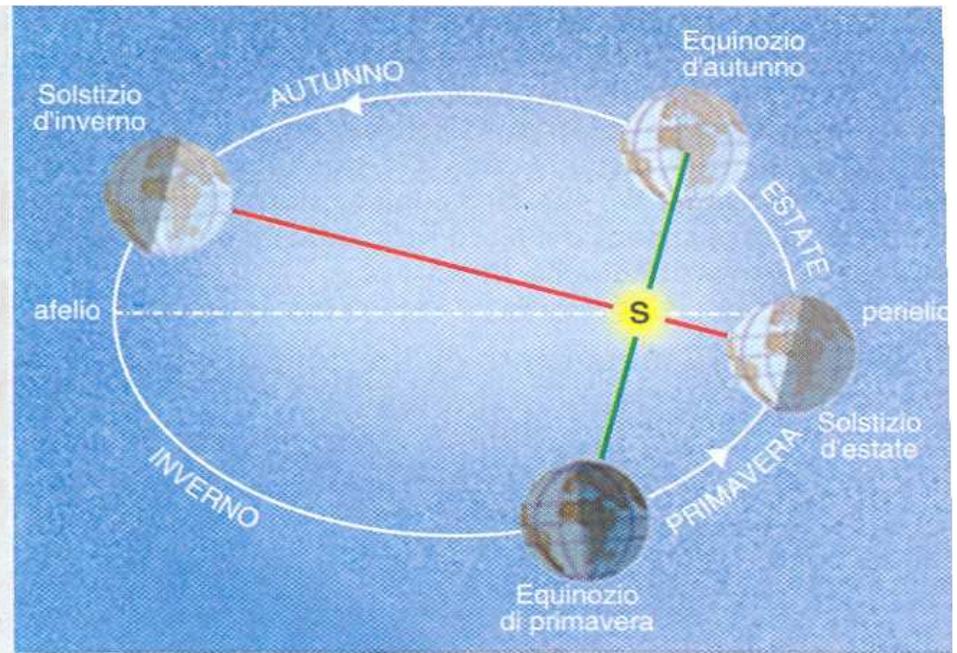
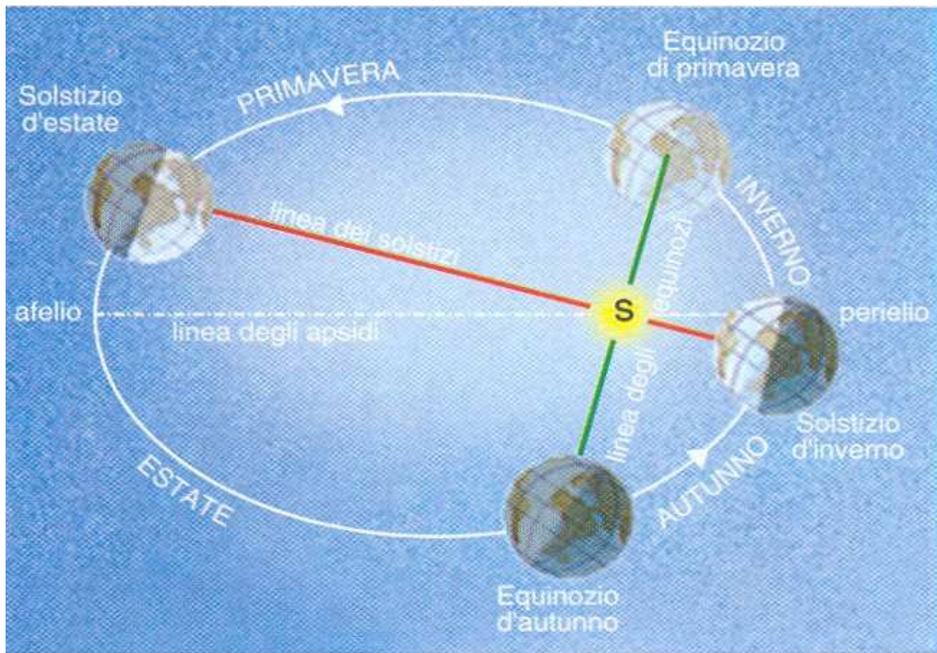
Fra 10.500 anni circa, quando la linea equinoziale avrà percorso mezzo giro, la situazione sarà opposta e l'emisfero boreale avrà il semestre freddo più lungo di quello caldo, mentre il contrario si avrà per l'emisfero australe.

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.