



The slide features a dark cosmic background with various galaxies and stars. At the top, there is a header with the logo of the Osservatorio Astronomico di Brera on the left, the text 'Istituto Nazionale di Astrofisica' in the center, and the INAF logo on the right. The main title 'Universe in bloom' is written in a stylized font, followed by the subtitle 'The motions of the Earth and the Solar System'. The author's name 'Mario Carpino' and email 'Mario.Carpino@brera.inaf.it' are listed on the left. The date '22 ottobre 2014' is in the bottom right corner.

Istituto Nazionale di Astrofisica
Osservatorio astronomico di Brera

INAF
ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA
NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS

Universe in bloom
**I moti della Terra
e il Sistema Solare**

Mario Carpino
Mario.Carpino@brera.inaf.it

22 ottobre 2014

Lezione introduttiva sui movimenti della Terra (rotazione e rivoluzione), le eclissi, i sistemi di coordinate astronomiche e la misura del tempo; con una breve descrizione della struttura del Sistema Solare.

Sommario

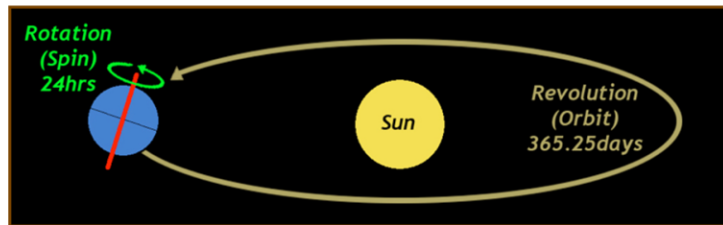
1. I movimenti della Terra
2. Coordinate astronomiche
3. La misura del tempo
4. Il Sistema Solare

1

I movimenti della Terra

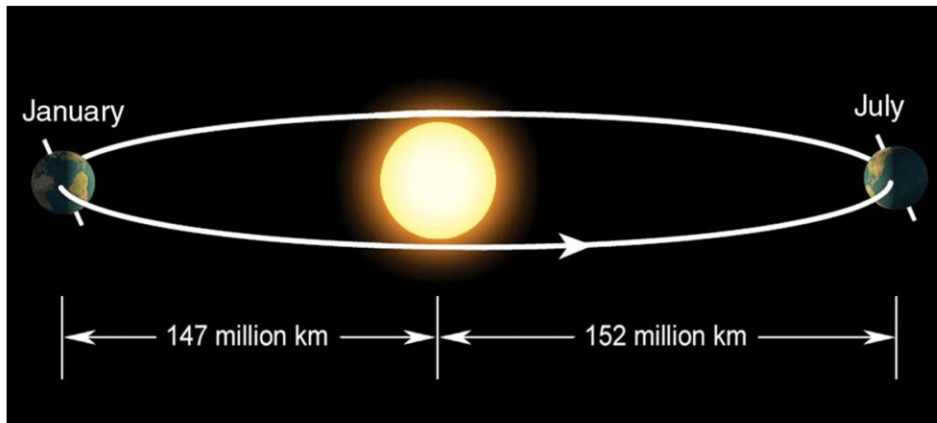
I movimenti della Terra

- moto di *rotazione* attorno al proprio asse ("come una trottola")
- moto di *rivoluzione* attorno al Sole (traslazione lungo l'orbita)



Tradizionalmente si distingue nei movimenti della Terra tra un *movimento di rotazione* della Terra attorno al proprio asse (come una trottola) e un *movimento di rivoluzione*, cioè la traslazione della Terra lungo la sua orbita ellittica attorno al Sole. I due movimenti possono essere descritti separatamente, per comodità di spiegazione e di studio, ma nella realtà avvengono contemporaneamente: la Terra ruota su stessa *mentre* si muove attorno al Sole.

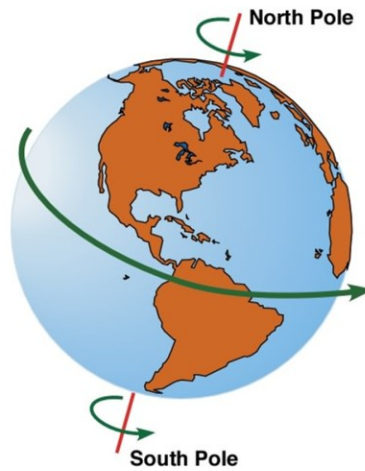
I movimenti della Terra



Movimento di rivoluzione attorno al Sole

Il movimento di rivoluzione della Terra attorno al Sole (anno) ha un periodo di 365.2563 giorni, cioè poco più di 365 giorni e un quarto. Il fatto che la durata dell'anno non sia un numero intero di giorni determina l'esigenza di alternare nel calendario anni di 365 giorni con anni di 366 giorni (anni bisestili), al ritmo di approssimativamente uno ogni quattro anni; ogni tanto bisogna poi eliminare un anno bisestile (anni *secolari*) per tener conto dell'eccesso di 0.0063 giorni rispetto ai 365 giorni e un quarto. L'orbita della Terra è leggermente ellittica e la sua distanza dal Sole varia nel corso dell'anno: il punto di massimo avvicinamento si ha all'inizio di gennaio.

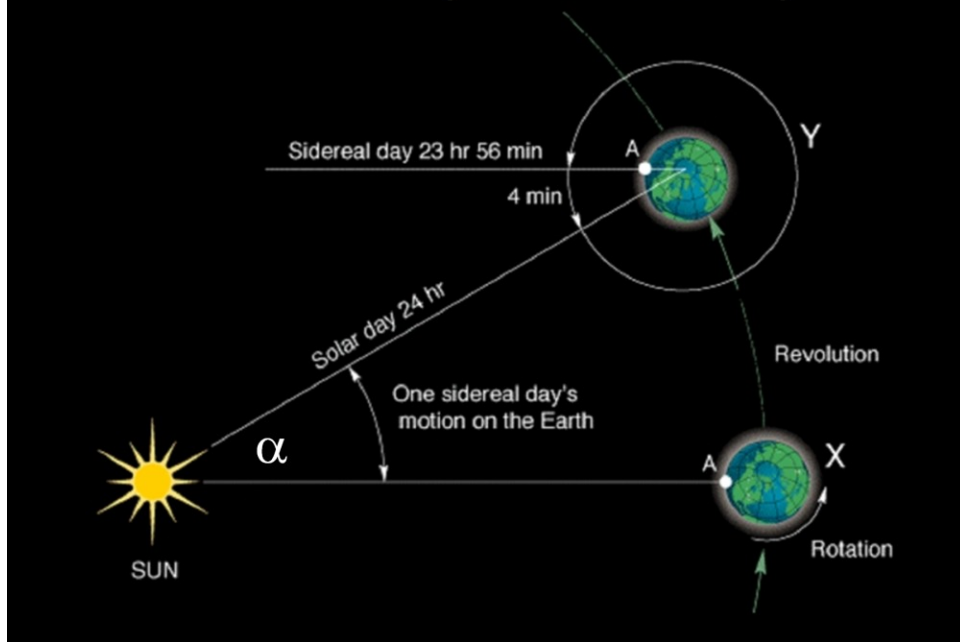
I movimenti della Terra



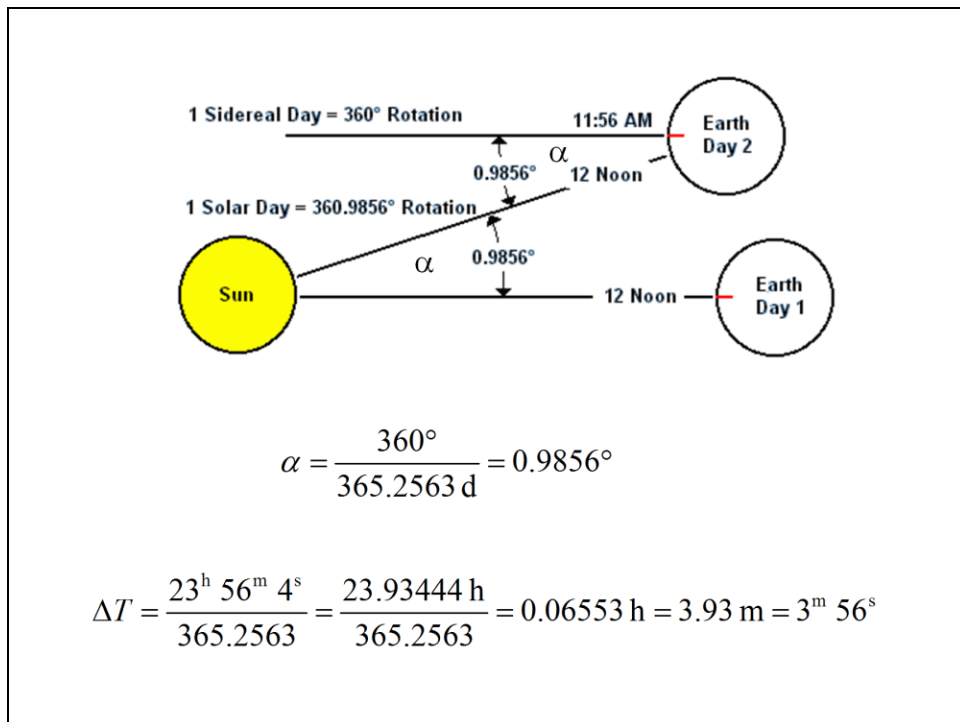
Movimento di rotazione della Terra attorno al suo asse

Il movimento di rotazione della Terra rispetto alla volta celeste (alle stelle fisse) si svolge attorno a un asse che passa per il centro della Terra e interseca la superficie terrestre in corrispondenza dei due poli.

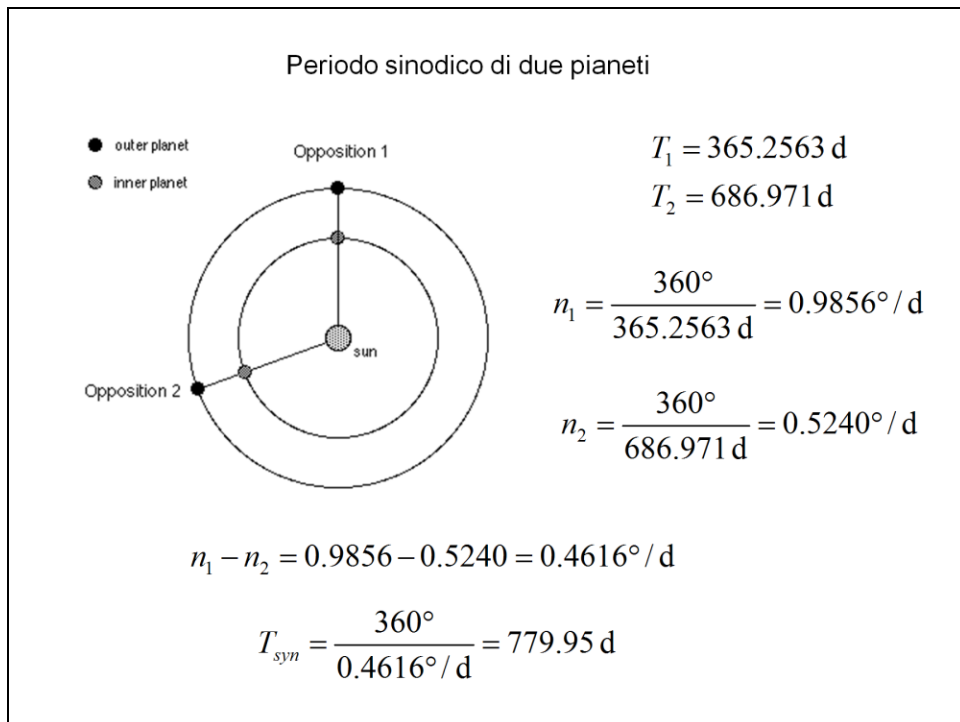
Sidereal Day vs. Solar Day



Il movimento di rotazione della Terra rispetto alla volta celeste (alle stelle fisse) ha un periodo di $23^h 56^m 4^s$ e si chiama *giorno siderale*. Il giorno di 24 ore che tutti usiamo è il *giorno solare*, cioè il periodo di rotazione calcolato rispetto alla posizione del Sole. I due giorni hanno durata leggermente diversa perché il Sole si muove rispetto alle stelle fisse (si tratta ovviamente di un moto apparente, dal punto di vista di un osservatore terrestre: naturalmente è la Terra che si muove rispetto al Sole). Facendo riferimento alla figura, supponiamo che all'istante iniziale (posizione *X*) il punto *A* della Terra punti verso il Sole. Nel passaggio da *X* a *Y* la Terra compie una rotazione completa *siderale* (cioè rispetto alle stelle fisse) e, dopo $23^h 56^m 4^s$, il punto *A* si trova rivolto verso la stessa direzione nello spazio. Tuttavia nel frattempo la Terra si è spostata lungo la propria orbita da *X* a *Y* e quindi il Sole si trova in una direzione differente; quindi la Terra deve ancora ruotare di un piccolo angolo α perché il punto *A* sia ancora rivolto verso il Sole, e ciò richiede ancora quei 4 minuti che fanno la differenza tra la durata del giorno solare e quella del giorno siderale.



È facile calcolare direttamente l'angolo α e la differenza tra giorno solare e giorno siderale. Infatti l'angolo α è l'angolo percorso in un giorno dalla Terra lungo la propria orbita. Poiché in un anno (365.2563 d) la Terra fa un giro completo attorno al Sole (360°), in un giorno essa percorre un angolo $\alpha = 360^\circ/365.2563 = 0.9856^\circ$. Poiché la Terra compie una rotazione completa attorno al proprio asse (ancora 360°) in 23.93444 ore, per ruotare di questo angolo aggiuntivo α avrà bisogno di un tempo uguale a $1/365.2563$ di giorno siderale, cioè quei circa 4 minuti che mancano alle 24 ore esatte. Naturalmente il fatto che il giorno solare duri esattamente 24 ore non è una coincidenza: le unità di tempo (il giorno e l'ora) sono state scelte in base alla durata del giorno *solare*: le persone regolano la propria vita in base alla posizione del Sole (all'alternanza di luce e buio) e non sulla posizione delle stelle. Tuttavia gli astronomi usano spesso anche il tempo siderale, e nelle cupole dei telescopi degli osservatori astronomici c'erano sempre orologi a pendolo che battevano il tempo siderale. Un orologio che batte il tempo siderale anticipa circa 4 minuti al giorno rispetto a un orologio civile (solare): i due orologi segnano lo stesso tempo solo una volta all'anno (e precisamente il giorno dell'equinozio d'autunno).

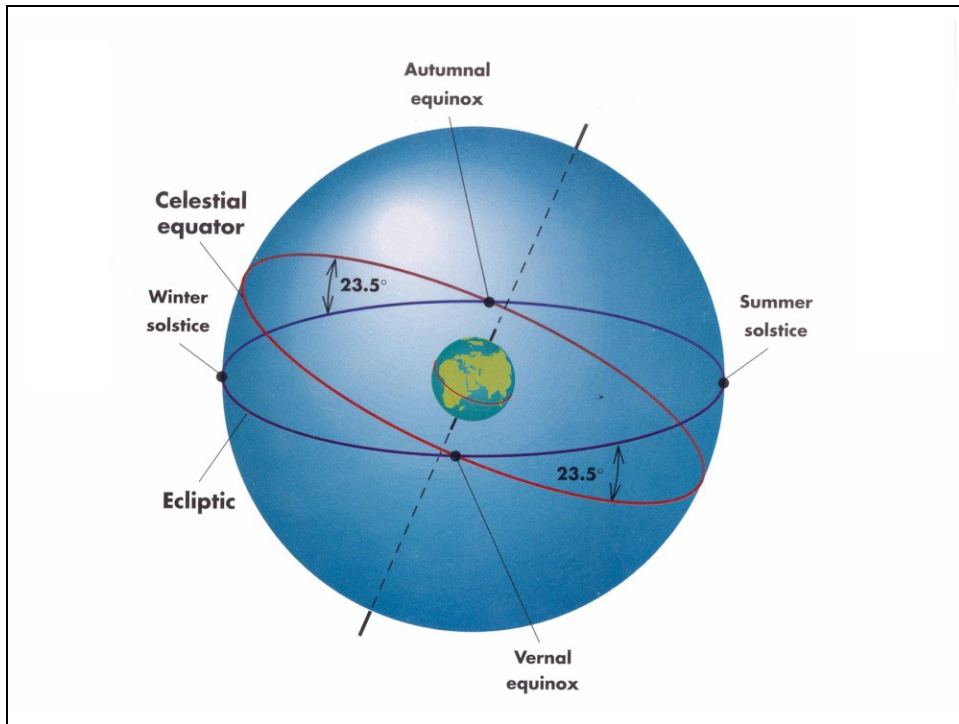


La relazione tra giorno siderale e giorno solare è un esempio particolare della relazione che esiste tra *periodo siderale* e *periodo sinodico* di un fenomeno celeste. Consideriamo ad esempio due pianeti che si muovono attorno al Sole e che hanno periodi di rivoluzione *siderale* (cioè i periodi dopo i quali ritornano allo stesso punto dell'orbita *rispetto alle stelle fisse*) rispettivamente T_1 e T_2 . Vogliamo calcolare ora qual è il periodo (chiamato *periodo sinodico*) che intercorre tra due successivi allineamenti Sole-pianeta 1-pianeta 2. Poiché il primo pianeta percorre $n_1 = 360^\circ/T_1$ gradi al giorno e il secondo pianeta $n_2 = 360^\circ/T_2$ gradi al giorno (rispetto alle stelle fisse), la distanza angolare tra i due pianeti cambierà di $n_1 - n_2$ gradi al giorno, e il periodo sinodico sarà pari a $T_{syn} = 360^\circ/(n_1 - n_2)$. L'esempio numerico riportato nell'immagine si riferisce al calcolo del periodo sinodico tra la Terra e Marte: Marte è in *opposizione* con la Terra (cioè dalla parte opposta al Sole, una condizione in cui è facilmente osservabile) ogni 780 giorni, cioè circa 2 anni e 2 mesi. A questo punto è forse facile capire che il giorno solare può essere considerato come il periodo di rotazione sinodica della Terra rispetto alla posizione del Sole.

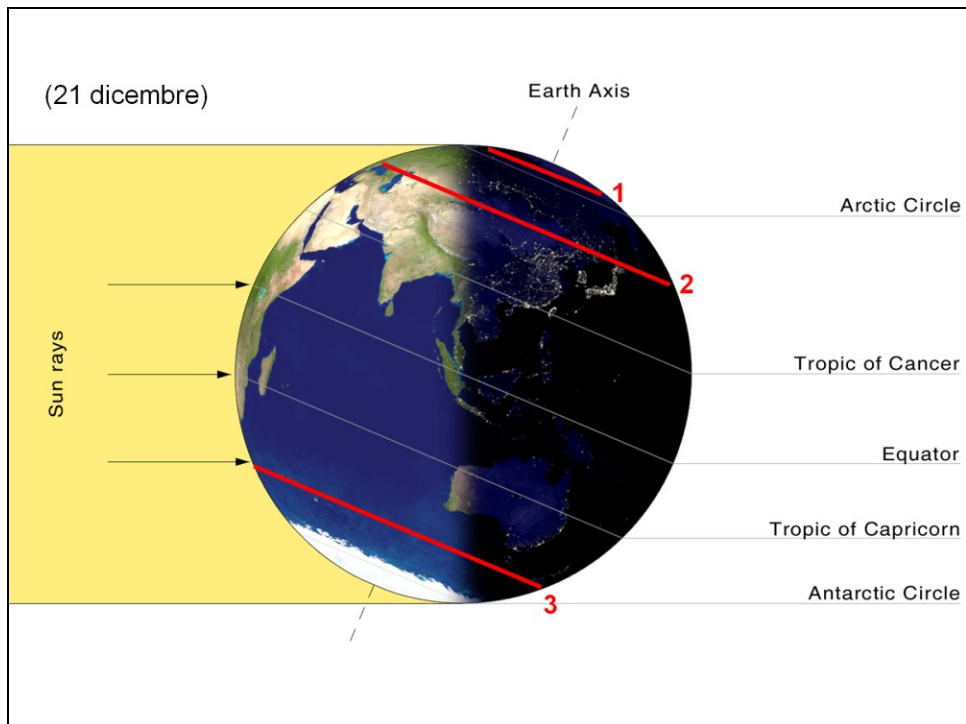
I movimenti della Terra

- alternanza di giorno e notte
- alternanza delle stagioni

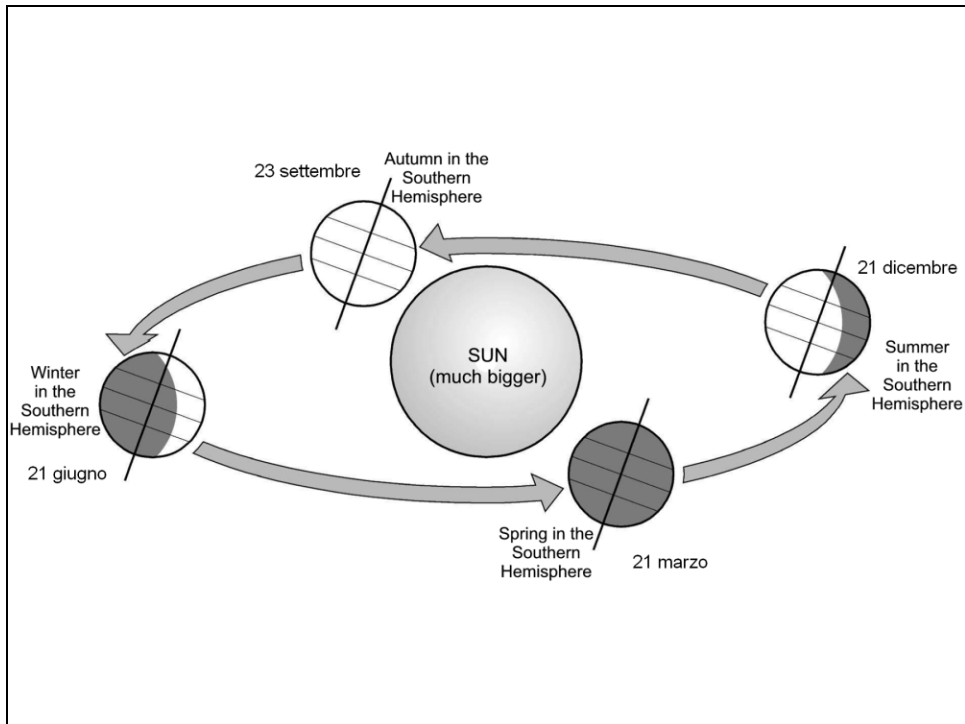
I movimenti di rotazione e rivoluzione della Terra producono alcuni fenomeni ben noti, in particolare l'alternanza di giorno e notte e l'alternanza delle stagioni. Sull'alternanza tra giorno e notte non c'è molto da dire: chiaramente la rotazione della Terra espone alternativamente ogni regione della sua superficie alla luce del Sole e al buio. I cambiamenti di stagione richiedono una spiegazione un po' più complessa.



Per capire i cambiamenti di stagione dobbiamo premettere alcune informazioni. Il moto orbitale della Terra si svolge in un piano che gli astronomi indicano con il nome di *piano dell'eclittica*. Dal punto di vista di un osservatore terrestre l'eclittica è il cerchio massimo percorso dal Sole sulla volta celeste nel corso dell'anno: lungo di esso sono disposte le 12 costellazioni zodiacali classiche. L'asse di rotazione terrestre non è perpendicolare all'eclittica; perciò l'equatore celeste (la proiezione sulla volta celeste dell'equatore terrestre, il piano perpendicolare all'asse di rotazione) non coincide con l'eclittica, ma è inclinato rispetto ad essa di 23.5 gradi. I due punti della volta celeste in cui l'equatore interseca l'eclittica sono detti *nodi* dell'orbita terrestre e corrispondono ai punti in cui il Sole, nel suo moto annuale, attraversa il piano equatoriale. Ciò avviene due volte all'anno, e precisamente in corrispondenza degli equinozi: all'*equinozio di primavera* (o vernale, 21 marzo), il Sole attraversa l'equatore in senso ascendente (da sud verso nord), mentre all'*equinozio di autunno* (23 settembre) attraversa l'equatore in senso discendente. I punti di massima distanza del Sole dall'equatore sono chiamati *solstizi*: *solstizio d'inverno* (21 dicembre) e *solstizio d'estate* (21 giugno).



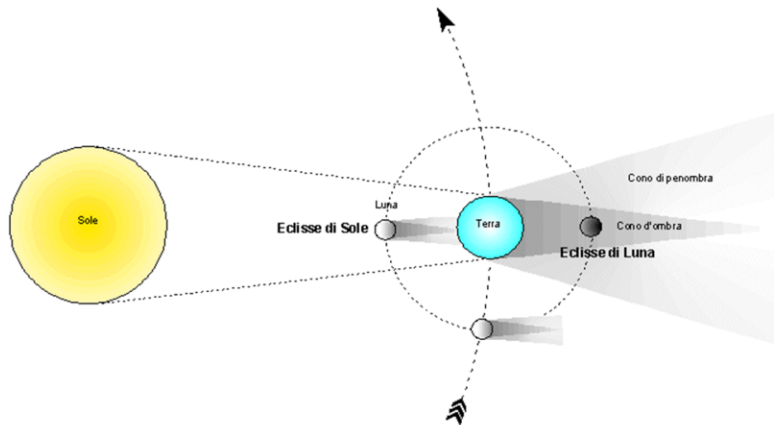
Perciò in generale il Sole non illumina la Terra da una direzione perpendicolare all'asse di rotazione di questa: è questo che genera l'alternanza delle stagioni. Consideriamo ad esempio la situazione al solstizio d'inverno (21 dicembre). In questo momento dell'anno l'asse di rotazione terrestre è orientato in modo che il polo nord sia alla massima distanza possibile dal Sole e quindi è costantemente al buio; anzi, tutte le regioni vicine al polo nord, nel corso della rotazione terrestre, rimangono costantemente al buio (il cambiamento di posizione di un punto della regione polare settentrionale nel corso della rotazione terrestre è evidenziato nella figura dalla **linea rossa 1**). Anche le regioni terrestri dell'emisfero settentrionale che non sono costantemente al buio hanno comunque un periodo di luce (giorno) più breve rispetto al periodo di buio (notte; vedi **linea 2**). Inoltre la luce del Sole arriva a queste regioni "di sbieco" (il Sole rimane basso sull'orizzonte). Il contrario avviene nell'emisfero sud: il giorno è più lungo della notte (**linea 3**) e la luce del Sole illumina "frontalmente" (il Sole è più alto sull'orizzonte); il polo sud è costantemente illuminato. Per questi due motivi (durata inferiore del giorno e illuminazione di sbieco) le regioni settentrionali ricevono meno luce e calore di quelle meridionali: il 21 dicembre è inverno nell'emisfero nord ed estate nell'emisfero sud.



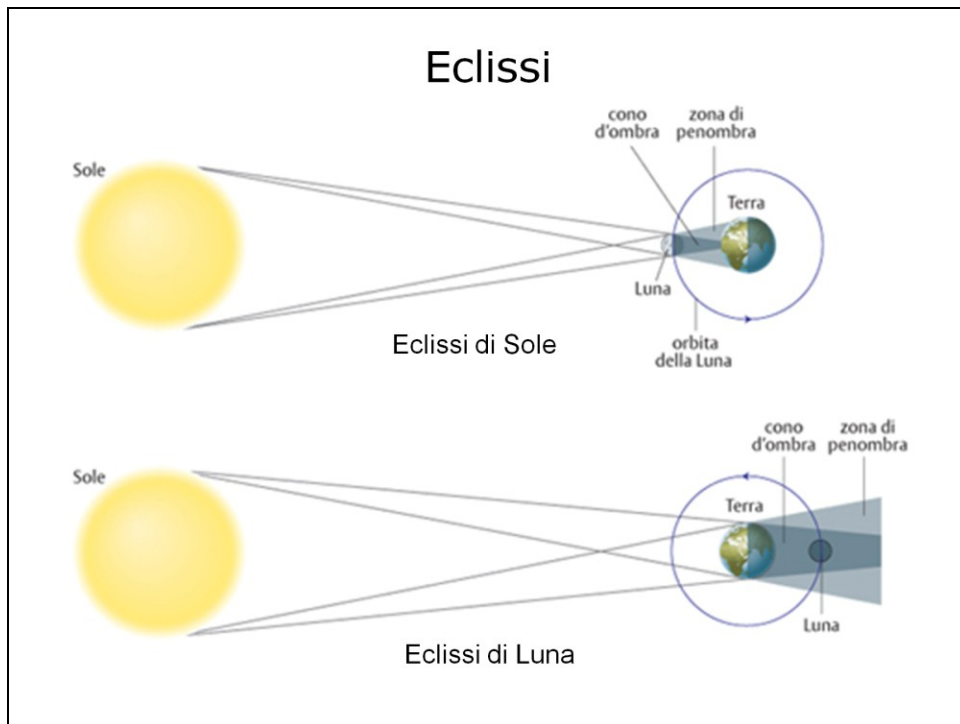
Nel corso dell'anno la Terra si muove intorno al Sole ma il suo asse di rotazione si mantiene sempre parallelo a se stesso, cioè punta sempre nella stessa direzione dello spazio (trascuriamo qui il moto di precessione dell'asse terrestre, che avviene però su tempi estremamente lunghi, e altri effetti di minore entità). Perciò 6 mesi dopo il solstizio d'inverno, al solstizio d'estate (21 giugno), la situazione sarà capovolta rispetto a quella descritta precedentemente: il polo nord sarà illuminato, il polo sud al buio, nell'emisfero nord sarà estate e nell'emisfero sud inverno. Nelle stagioni intermedie, agli equinozi (21 marzo e 23 settembre), l'asse della Terra naturalmente è sempre inclinato di 23.5 gradi rispetto all'eclittica, ma il Sole si trova a uno dei nodi dell'orbita, cioè nel piano dell'equatore terrestre; i poli terrestri si trovano esattamente sul *terminatore* (la circonferenza sulla superficie terrestre che separa il buio dalla luce) e quindi in ogni punto della Terra il giorno è diviso in due periodi uguali di luce e di ombra di 12 ore ciascuno, e le condizioni di illuminazione dei due emisferi sono uguali.

Eclissi

- eclissi di Luna (l'ombra della Terra rende oscura la Luna) → **oscuramento**
- eclissi di Sole (il disco oscuro della Luna copre il Sole) → **occultazione**



Il moto relativo del Sole e della Terra, combinato al moto della Luna, determina anche il verificarsi delle eclissi, che si dividono in *eclissi di Luna* (quando la Luna sembra scomparire) ed *eclissi di Sole* (quando a sparire è il Sole). Il fatto di utilizzare lo stesso termine *eclissi* per indicare la scomparsa della Luna e del Sole nasconde però il fatto che i due fenomeni sono molto diversi. Infatti la Luna scompare perché rimane al buio, in quanto la luce del Sole che di solito la illumina viene schermata dalla Terra. Si tratta quindi di un *oscuramento* (se in una stanza faccio il buio completo, non vedo più un quadro appeso alla parete). Invece l'eclissi di Sole avviene perché la Luna passa davanti al Sole e lo nasconde alla nostra vista: si tratta di un'*occultazione* (se stendo un telo nero davanti a un quadro, non lo vedo più).



Durante un'eclissi di Sole il disco della Luna copre quello del Sole. Naturalmente le dimensioni fisiche del Sole sono molto maggiori di quelle della Luna: il diametro solare è di circa 1.4 milioni di km, mentre quello della Luna è solamente 3472 km. Tuttavia il Sole è molto più distante della Luna e, per una strana coincidenza, i diametri apparenti dei due astri nel cielo sono quasi uguali: circa mezzo grado. Ciò vuol dire che, per poter osservare un'eclissi di Sole, bisogna trovarsi in un punto della superficie terrestre perfettamente allineato con la retta che congiunge i centri della Luna e del Sole: basta spostarsi di poche decine di chilometri da quel punto perché una parte del disco solare non risulti coperta dalla Luna (eclissi parziale). Invece, nel caso di un'eclissi di Luna, la Luna passa nel cono d'ombra della Terra ed è oscura da qualsiasi punto della superficie terrestre la si osservi: è sufficiente che la Luna sia sopra l'orizzonte, cioè che sia notte; un'eclissi di Luna è visibile da metà della superficie terrestre. Questo è il motivo per cui, in ogni singola regione della Terra, le eclissi di Sole sono molto più rare di quelle di Luna benché in media, se si considera tutta la Terra, la frequenza dei due tipi di eclissi sia all'incirca uguale.

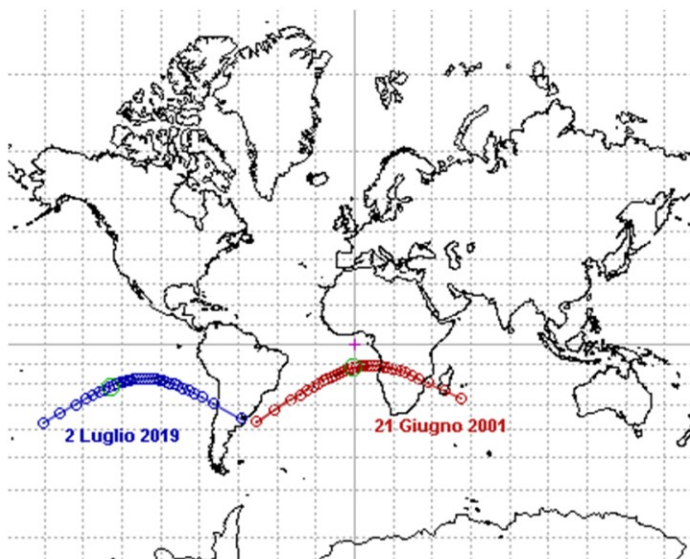


Questo collage fotografico illustra le diverse fasi di un'eclissi di Luna. La foto in basso a destra illustra il fenomeno della *Luna rossa*, che si verifica a volte durante la fase di totalità di un'eclissi di Luna. In questi casi il disco lunare, invece di essere completamente oscuro, è illuminato da una tenue luce rossastra, prodotta dalla rifrazione (deflessione) dei raggi solari attraverso l'atmosfera terrestre: in un certo senso, la Luna è illuminata dal bagliore dei tramonti terrestri. Per interpretare correttamente le fotografie occorre tener conto del fatto che l'immagine della Luna rossa è stata presa con un tempo di esposizione molto più lungo delle altre foto (cioè la Luna rossa in realtà è molto meno luminosa della Luna piena).



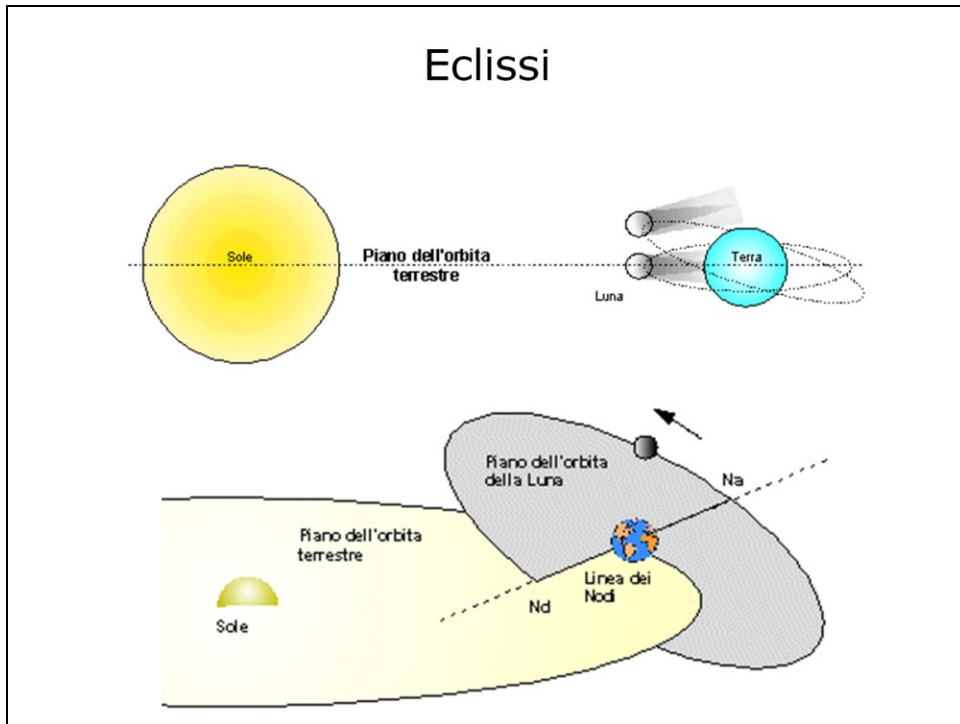
Sequenza fotografica delle diverse fasi di un'eclissi di Sole. Si tratta di un'*eclissi anulare*, cioè di un caso in cui il diametro apparente della Luna è leggermente inferiore a quello del Sole e quindi, anche nel punto di massima eclissi, rimane una piccola corona circolare di superficie solare ancora visibile. Infatti, a causa dell'eccentricità delle orbite della Luna e del Sole attorno alla Terra, le distanze Terra-Luna e Terra-Sole (e quindi i diametri apparenti della Luna e del Sole visti dalla Terra) variano nel tempo; quando il diametro apparente della Luna risulta più piccolo di quello del Sole, l'eclissi totale non è possibile.

Eclissi di Sole



L'immagine mostra l'estensione delle zone della superficie terrestre in cui risultano visibili due diverse eclissi di Sole. La larghezza della fascia di totalità è dell'ordine di 100-200 km.

Eclissi

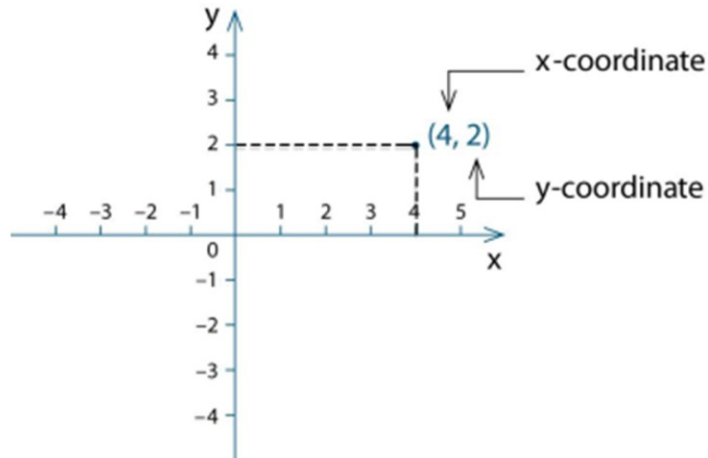


Il periodo di rivoluzione *sinodica* della Luna è di circa 29 giorni e mezzo: ogni 29.5 giorni la Luna si trova in congiunzione con il Sole (Luna nuova) e sembrerebbe quindi che ogni mese si debba verificare un'eclissi di Sole (e analogamente che a ogni Luna piena si debba verificare un'eclissi di Luna). In realtà non è così perché l'orbita della Luna intorno alla Terra è inclinata di circa 5 gradi sull'eclittica, e quindi nella maggior parte dei casi alla Luna nuova la Luna passa "sopra" o "sotto" il disco solare. Le eclissi si verificano solo quando la linea di intersezione dei piani orbitali della Luna e del Sole (la *linea dei nodi* delle due orbite) è allineata con il Sole. Questa condizione si verifica solo due volte all'anno: se si verifica nel momento della Luna nuova o della Luna piena, si ha un'eclissi (rispettivamente di Sole o di Luna).

2

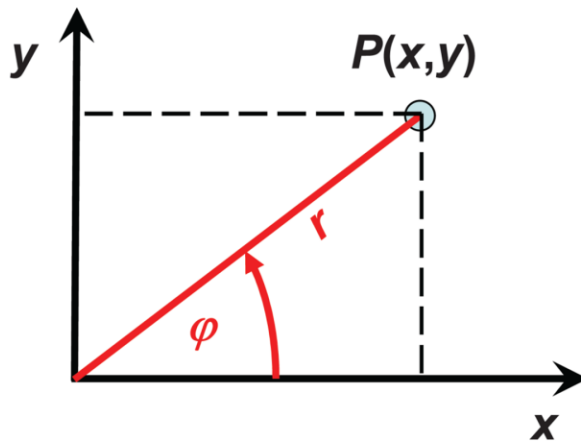
Coordinate astronomiche

Coordinate cartesiane



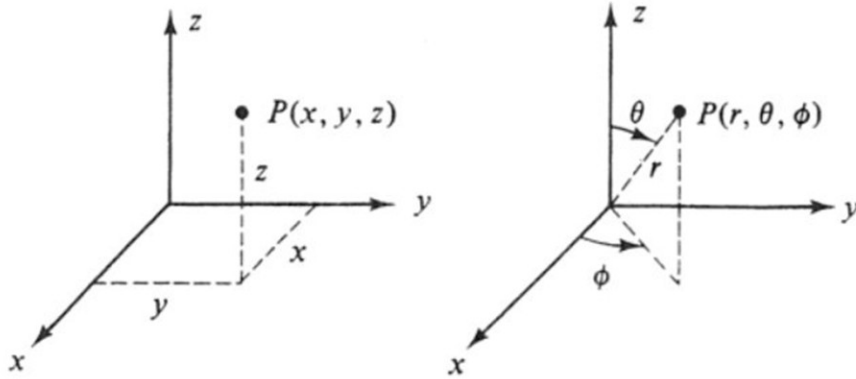
In geometria si chiamano *coordinate* i valori numerici che servono a identificare la posizione di un punto (nel piano o nello spazio). Nel caso di *coordinate cartesiane* (le più usate), nel piano si prendono due assi ortogonali (asse X o delle *ascisse* e asse Y o delle *ordinate*) come sistema di riferimento: le distanze dai due assi costituiscono una coppia di valori (x,y) che definiscono univocamente la posizione del punto.

Coordinate polari



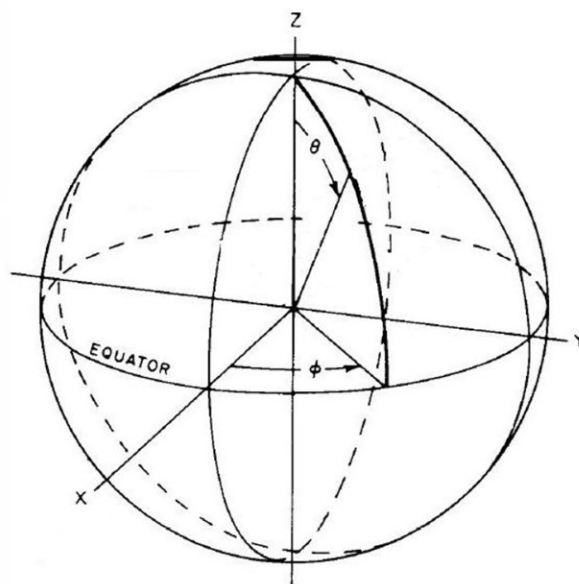
In molte applicazioni al posto di coordinate di tipo *cartesiano* si usano coordinate *polari* : la posizione di un punto è definita dalla sua distanza r dall'origine (l'intersezione degli assi X e Y) e dall'angolo φ formato dalla direzione in cui si trova il punto rispetto alla direzione di uno degli assi (solitamente l'asse X). Le coordinate polari sono spesso utilizzate anche in astronomia, perché permettono di separare la distanza dell'oggetto (che spesso non è nota) dalla direzione in cui si trova.

Coordinates in 3 dimensions



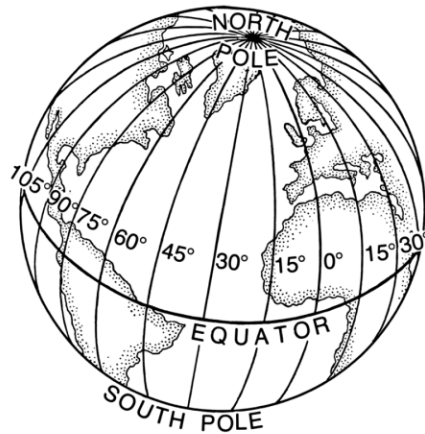
Nel caso di punti nello spazio si usa come sistema di riferimento un insieme di tre assi (X , Y e Z) mutuamente ortogonali e le coordinate sono tre: tre coordinate cartesiane (x, y, z) oppure la distanza dall'origine r e due angoli ϕ e θ che definiscono la direzione della posizione del punto rispetto all'origine. La coordinata θ è l'angolo formato tra la direzione del punto e l'asse Z ; la coordinata ϕ è l'angolo tra l'asse X e la proiezione della direzione del punto sul piano XY . A volte al posto dell'angolo θ si usa il suo complementare $90^\circ - \theta$, che è uguale all'altezza (angolare) della direzione del punto sul piano XY .

Sulla Terra: latitudine e longitudine



Le coordinate di tipo polare sono molto utili per definire la posizione di un punto su una sfera, come la superficie terrestre o la sfera celeste. Nel caso della Terra si utilizza come asse Z l'asse di rotazione terrestre: il piano XY , ortogonale a Z , coincide quindi con il piano equatoriale. L'asse X deve corrispondere quindi a una direzione particolare all'interno del piano equatoriale; poiché la Terra ha simmetria di rotazione attorno all'asse Z , questa scelta è del tutto convenzionale: in genere come asse X si adotta la direzione del meridiano di Greenwich, solo per un criterio di precedenza storica (Greenwich è stato il primo osservatorio astronomico dell'era moderna). L'angolo ϕ misurato in senso antiorario (verso Est) dal meridiano di Greenwich è chiamato *longitudine*, mentre la distanza angolare θ dall'asse polare Z è detta *distanza polare* o *colatitudine*; tuttavia è più frequente l'uso dell'angolo complementare $90^\circ - \theta$, chiamato *latitudine*.

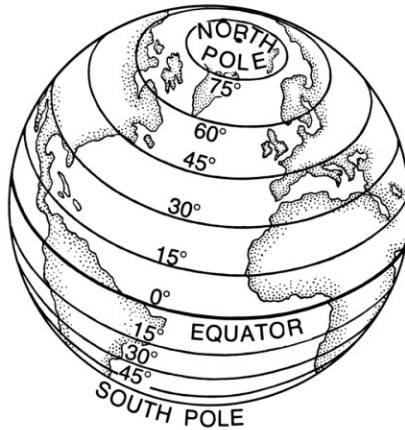
Sulla Terra: latitudine e longitudine



meridiani

L'insieme di punti della superficie terrestre che hanno uguale longitudine formano una semicirconferenza chiamata *meridiano*, la metà di un cerchio massimo che ha per centro il centro della Terra e per estremi i due poli.

Sulla Terra: latitudine e longitudine



paralleli

L'insieme di punti della superficie terrestre che hanno uguale latitudine formano una circonferenza chiamata *parallelo* perché appartiene a un piano parallelo all'equatore. In generale i paralleli non sono cerchi massimi e non hanno per centro il centro della Terra, ma un punto dell'asse di rotazione terrestre; solo l'equatore, che è il parallelo corrispondente alla latitudine di 0° , è un cerchio massimo centrato nel centro della Terra. La lunghezza dei paralleli si riduce man mano che la latitudine aumenta (in senso positivo verso il polo nord o in senso negativo verso il polo sud); ai poli (latitudine $\pm 90^\circ$) il parallelo si riduce a un punto.

Sulla Terra: latitudine e longitudine



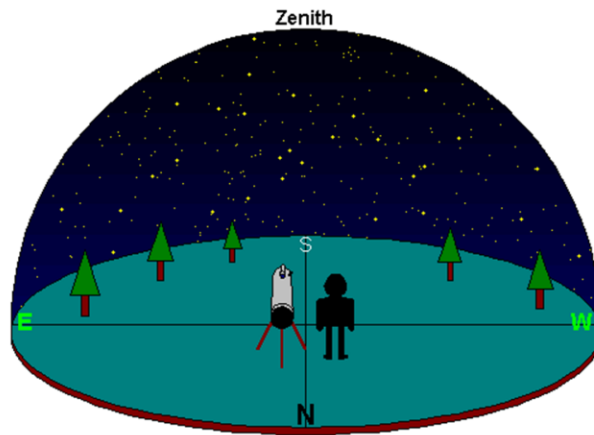
meridiani



paralleli

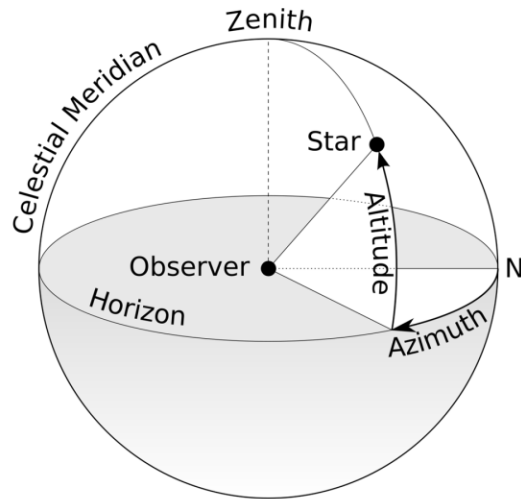
In termini un po' rozzi si può dire che i meridiani dividono la superficie terrestre come gli spicchi di un'arancia, i paralleli come le fette che si mettono nei cocktail.

Nel cielo: altezza e azimut



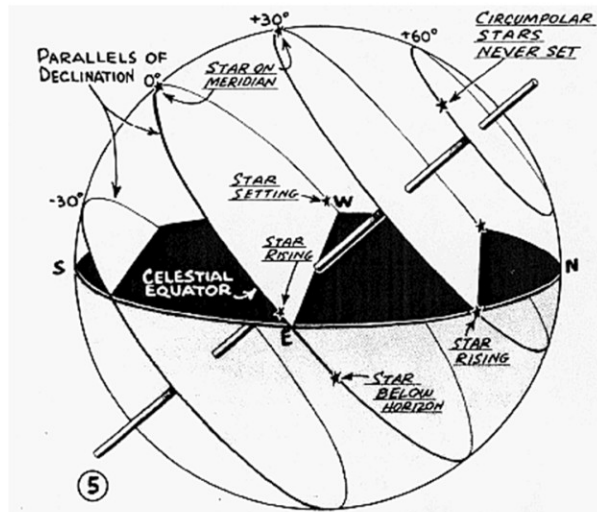
Il sistema di coordinate più intuitivo per descrivere la posizione di un astro sulla volta celeste è il *sistema altazimutale*, che assume come piano di riferimento XY il piano dell'orizzonte del luogo dove si trova l'osservatore; l'asse Z risulta allora la direzione della verticale o *zenit*, il punto della volta celeste posto direttamente sopra la testa dell'osservatore.

Nel cielo: altezza e azimut



Le coordinate polari relative a questo sistema di riferimento si chiamano *altezza* (l'altezza angolare dell'astro sopra il piano dell'orizzonte) e *azimut* (l'angolo tra la proiezione della direzione dell'astro sul piano dell'orizzonte e una direzione di riferimento scelta sul piano orizzontale). Purtroppo esistono diverse convenzioni sul modo di misurare l'azimut (dal punto nord o dal punto sud dell'orizzonte, in senso orario o antiorario) per cui è necessario verificare di volta in volta quale sia la convenzione adottata. Al posto dell'altezza sull'orizzonte si usa anche la *distanza zenitale* = 90° - altezza.

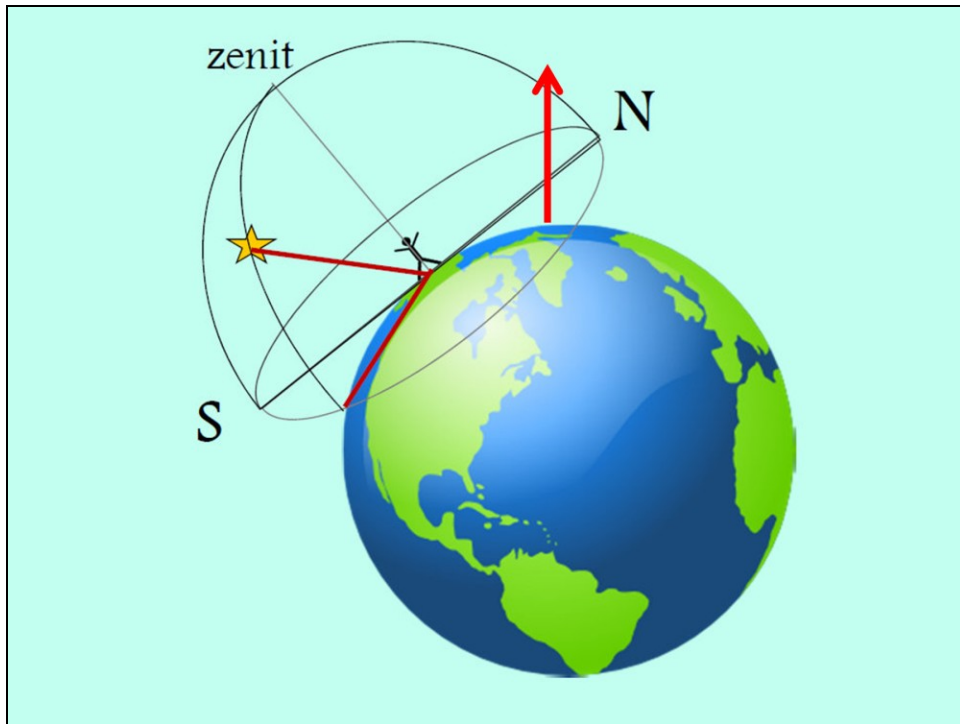
Moto diurno degli astri



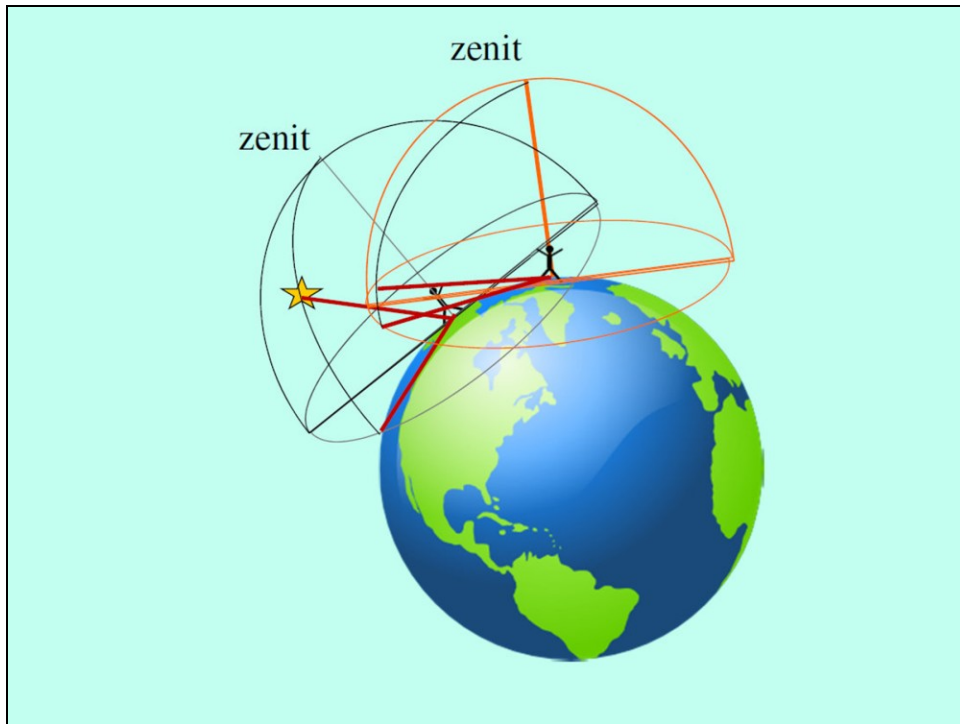
Uno dei problemi del sistema altazimutale è che le coordinate degli astri cambiano continuamente per effetto della rotazione terrestre: il sistema altazimutale è quindi adatto per descrivere le condizioni di visibilità di un astro, ma non per descrivere la volta celeste in modo indipendente dal punto di osservazione. Il moto diurno degli astri (cioè il moto apparente delle stelle dovuto alla rotazione terrestre) consiste in una traiettoria circolare sulla volta celeste che ha per centro il polo. L'altezza sull'orizzonte del polo celeste è uguale alla latitudine del luogo. Alla latitudine di Milano (circa 45 gradi) tutte le stelle che hanno una distanza dal polo nord inferiore a 45 gradi percorrono quindi nell'arco della giornata un cerchio completo che si trova tutto sopra l'orizzonte, quindi non tramontano mai (anche se naturalmente di giorno risultano invisibili a causa della luminosità del cielo); si dice che queste stelle sono *circumpolari*. Le stelle con distanza dal polo nord superiore a 45 gradi invece percorrono cerchi che intersecano l'orizzonte e quindi nascono e tramontano.



Questa fotografia del cielo notturno è stata scattata puntando la macchina fotografica (fissata a un treppiede) in direzione del polo e usando un tempo di posa di alcune ore. Le immagini delle stelle appaiono come “strisciate” per effetto della rotazione della volta celeste. Come si vede, il moto di ogni stella è un arco di cerchio che ha per centro il polo, l’unico punto che rimane fermo durante la rotazione. Le coordinate altazimutali (altezza sull’orizzonte e azimuth) di tutte le altre stelle cambiano nel corso del tempo.

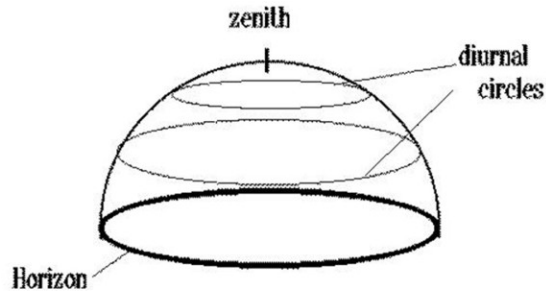


Un altro svantaggio del sistema altazimutale è che gli assi del sistema di riferimento che adotta (il piano dell'orizzonte e la direzione dello zenit) sono legati alla posizione dell'osservatore sulla superficie terrestre (la sua latitudine e longitudine).



Osservatori posti in punti diversi della Terra misureranno per lo stesso oggetto, anche nello stesso istante, coordinate altazimutali differenti.

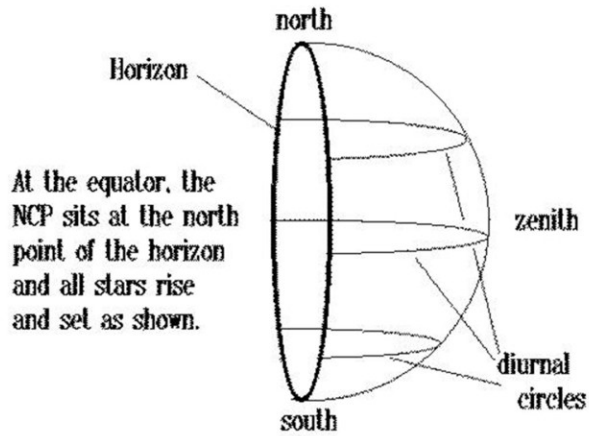
Moto diurno degli astri (al polo)



At the North Pole, the NCP is directly overhead (zenith) and the stars circle parallel to the horizon.

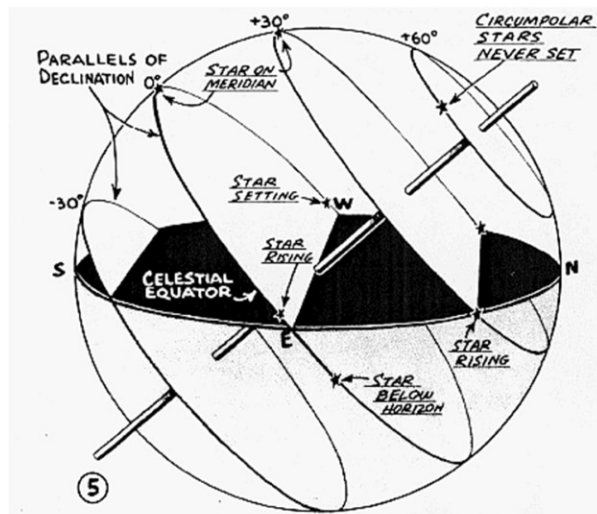
Infatti l'aspetto della rotazione diurna e la distinzione tra stelle circumpolari e non circumpolari dipende dalla latitudine del luogo da cui si osserva. Se ci si trova al polo nord, il polo celeste è allo zenit e tutti gli astri percorrono cerchi paralleli all'orizzonte, cioè la loro altezza sull'orizzonte è costante: tutte le stelle sono circumpolari.

Moto diurno degli astri (all'equatore)



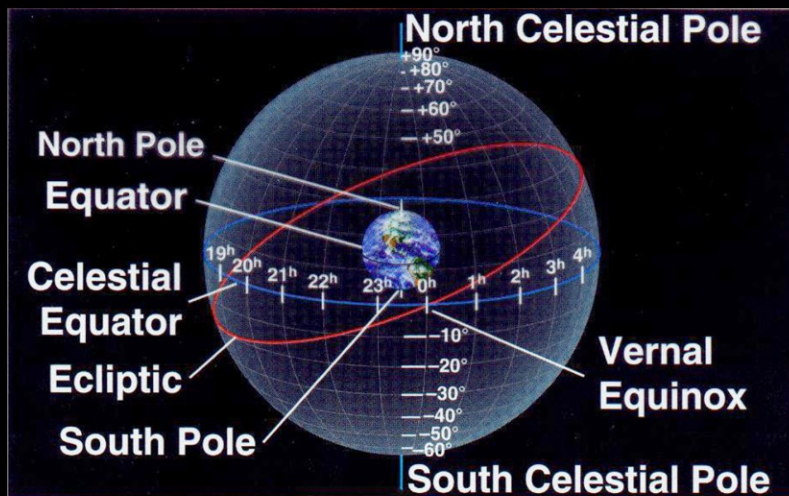
Al contrario se ci si trova all'equatore il polo celeste si trova sulla linea dell'orizzonte e tutte le stelle percorrono cerchi verticali. Quindi all'equatore tutte le stelle tramontano: non esistono stelle circumpolari. **Nota:** per l'interpretazione della figura, tenete conto che è disegnata mettendo in alto il polo nord, quindi il piano dell'orizzonte risulta verticale. Se questa orientazione vi confonde, pensate di ruotare la figura di 90 gradi in senso antiorario, oppure osservatela inclinando la testa a destra di 90°.

Angolo orario e declinazione



Per ovviare a questi inconvenienti si ricorre a un sistema di coordinate celesti che usa come piano di riferimento XY l'equatore celeste (la proiezione dell'equatore terrestre sulla volta celeste) e come asse Z l'asse di rotazione terrestre. L'angolo che misura l'altezza dell'astro sul piano dell'equatore è detto *declinazione* ed è analogo alla latitudine terrestre (tranne per il fatto che è misurato sulla volta celeste e non sulla superficie della Terra). La declinazione di un astro quindi non varia a causa della rotazione diurna della volta celeste, e non dipende dalla posizione dell'osservatore sulla superficie terrestre. Come asse X di riferimento sul piano equatoriale si utilizza spesso la direzione sud, cioè l'intersezione del meridiano locale (il cerchio massimo che passa per il polo e per lo zenit locale) con l'equatore celeste. La coordinata angolare misurata sul piano dell'equatore a partire da questo punto di riferimento è chiamata *angolo orario*, ed è misurata in senso orario (da sud verso ovest). Poiché il moto apparente di rotazione della volta celeste avviene in senso orario, l'angolo orario di un astro aumenta in modo costante nel corso del giorno, compiendo una rivoluzione completa (360°) in un giorno siderale. Per questo motivo gli astronomi spesso misurano l'angolo orario in ore invece che in gradi. L'ora (intesa come misura angolare) è definita come la ventiquattresima parte dell'angolo giro, cioè corrisponde a $360^\circ/24 = 15^\circ$. In questo modo l'angolo orario di un astro aumenta di un'ora (intesa come misura angolare) ogni ora di tempo siderale, con una notevole semplificazione dei calcoli. L'angolo orario di un astro è uguale a zero quando l'astro passa in meridiano (direzione sud), cioè nel punto di massima altezza sull'orizzonte nel corso del suo moto diurno.

Ascensione retta e declinazione



Poiché l'angolo orario di un astro è misurato a partire dal meridiano locale, il suo valore (a differenza di quello della declinazione) dipende dall'ora del giorno e dalla posizione dell'osservatore sulla superficie terrestre. Per rendere il sistema di coordinate equatoriali completamente indipendente da questi fattori, è sufficiente sostituire l'angolo orario con un angolo misurato sull'equatore non a partire dal meridiano locale, ma da un punto fisso sulla volta celeste: l'angolo così definito viene misurato (a differenza dell'angolo orario) in senso antiorario, ed è chiamato *ascensione retta*. Come punto di riferimento per la misura dell'ascensione retta si usa la direzione del *nodo ascendente* dell'orbita terrestre sull'equatore, che è uno dei due punti di intersezione tra l'equatore celeste e l'*eclittica* (piano dell'orbita apparente del Sole intorno alla Terra), e per la precisione il punto in cui il Sole nel suo moto annuale attraversa l'equatore da sud verso nord, all'epoca dell'equinozio di primavera. Questo punto si trova nella costellazione dell'Ariete e viene chiamato *punto vernale* o *primo dell'Ariete* o *punto Gamma*, anche se quest'ultima denominazione non è corretta e nasce da un equivoco, in quanto il simbolo che classicamente veniva utilizzato per indicare la costellazione dell'Ariete (una testa stilizzata di ariete con le corna) assomiglia alla lettera greca gamma minuscola (γ). Anche l'ascensione retta viene spesso misurata in ore invece che in gradi.

Esempio pratico: effemeride

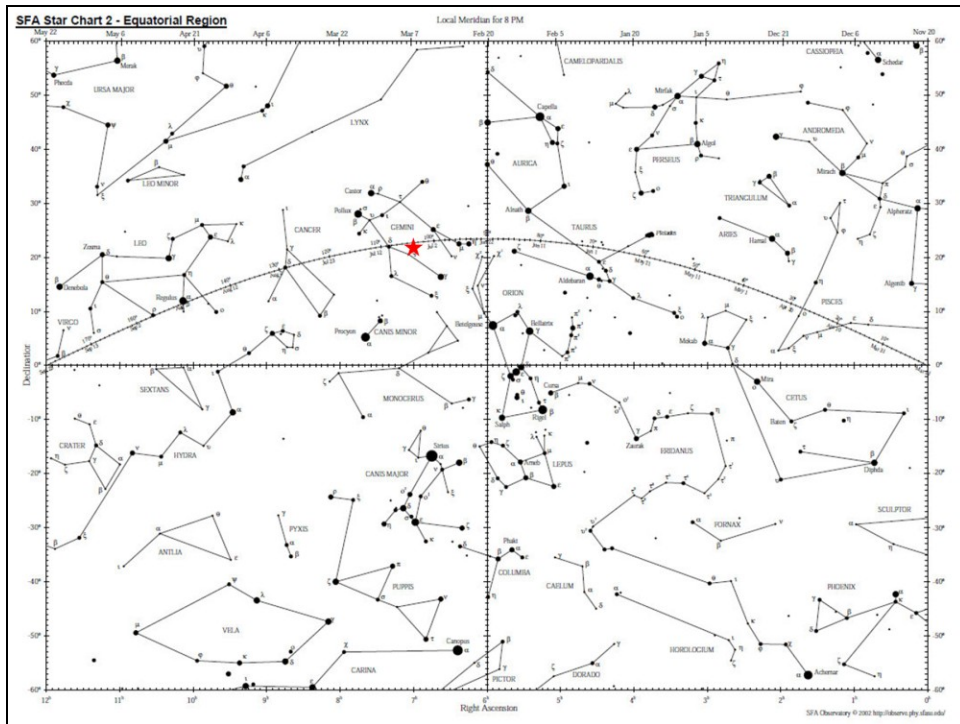
JUPITER, 2001

E29

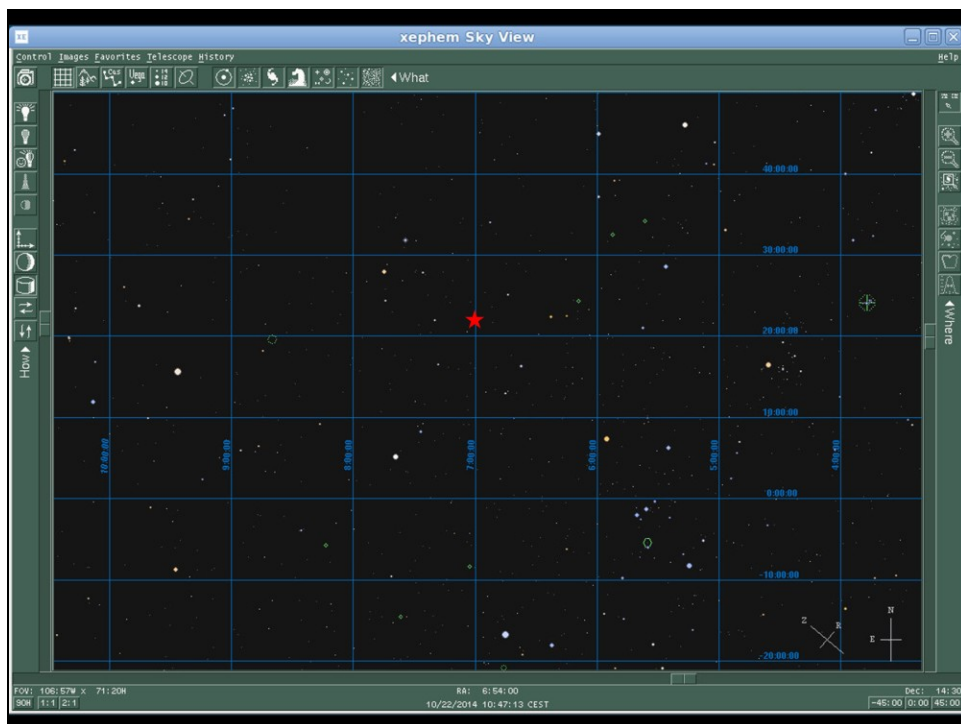
GEOCENTRIC COORDINATES FOR 0^h TERRESTRIAL TIME

Date	Apparent Right Ascension	Apparent Declination	True Geocentric Distance	Date	Apparent Right Ascension	Apparent Declination	True Geocentric Distance
	h m s	° ' "			h m s	° ' "	
Oct. 1	7 00 43.701	+22 31 48.30	5.146 5555	Nov. 16	7 06 46.041	+22 27 08.33	4.482 2507
2	7 01 09.191	+22 31 16.23	5.131 2703	17	7 06 34.200	+22 27 34.15	4.470 3301
3	7 01 33.989	+22 30 44.93	5.115 9622	18	7 06 21.522	+22 28 01.30	4.458 5950
4	7 01 58.090	+22 30 14.44	5.100 6347	19	7 06 08.015	+22 28 29.77	4.447 0504
5	7 02 21.486	+22 29 44.79	5.085 2911	20	7 05 53.683	+22 28 59.54	4.435 7009
6	7 02 44.172	+22 29 16.02	5.069 9349	21	7 05 38.534	+22 29 30.57	4.424 5513
7	7 03 06.141	+22 28 48.16	5.054 5696	22	7 05 22.575	+22 30 02.84	4.413 6062
8	7 03 27.385	+22 28 21.25	5.039 1990	23	7 05 05.816	+22 30 36.31	4.402 8700
9	7 03 47.894	+22 27 55.33	5.023 8265	24	7 04 48.267	+22 31 10.94	4.392 3472
10	7 04 07.660	+22 27 30.44	5.008 4562	25	7 04 29.938	+22 31 46.70	4.382 0421

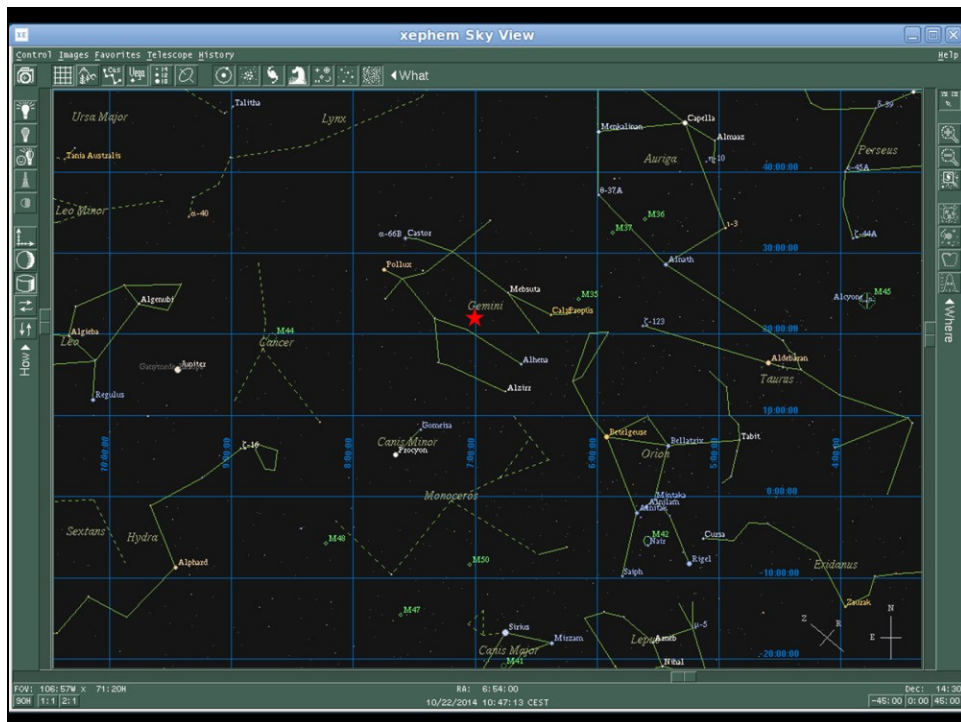
L'ascensione retta e la declinazione di un astro non variano a causa della rotazione terrestre e non dipendono dalla posizione dell'osservatore: nel caso di stelle fisse o di galassie queste coordinate sono costanti nel tempo, e vengono riportate per ciascun oggetto nei cataloghi stellari. Gli oggetti che orbitano attorno al Sole (pianeti, asteroidi, comete) hanno invece coordinate equatoriali variabili che devono essere riportate in funzione del tempo in apposite tabelle che sono chiamate *effemeridi* (termine che deriva dal greco e che significa *ogni giorno*, in quanto di solito le coordinate sono fornite con frequenza giornaliera), e che sono pubblicate negli annuari di astronomia. Vediamo un esempio pratico. Supponiamo di voler osservare il pianeta Giove nella notte del 1° ottobre 2001. Dalla tabella di un'effemeride ricaviamo che a quella data l'ascensione retta e declinazione del pianeta valgono rispettivamente 7^h 0^m 44^s e +22° 31' 48" (la figura riproduce una pagina di *The Astronomical Almanac*, una pubblicazione annuale molto diffusa tra gli astronomi, edita congiuntamente dal Naval Observatory di Washington e dal Nautical Almanac Office inglese).



Nelle carte celesti le coordinate equatoriali (ascensione retta e declinazione) sono solitamente riportate come una griglia sovrapposta alla rappresentazione delle costellazioni, in modo analogo alle griglie di longitudine e latitudine dei planisferi terrestri. Riportando sulla carta celeste le coordinate di Giove fornite dall'effemeride (ascensione retta $7^{\text{h}} 0^{\text{m}} 44^{\text{s}}$ e declinazione $+22^{\circ} 31' 48''$) si può individuare il punto in cui il pianeta si trova (qui indicato dalla stella rossa nella costellazione dei Gemelli) e quindi riconoscerlo facilmente nel cielo, a patto di conoscere un po' le costellazioni principali.



In alternativa a un atlante celeste cartaceo si può utilizzare uno dei tanti programmi per PC che svolgono la funzione di planetario.



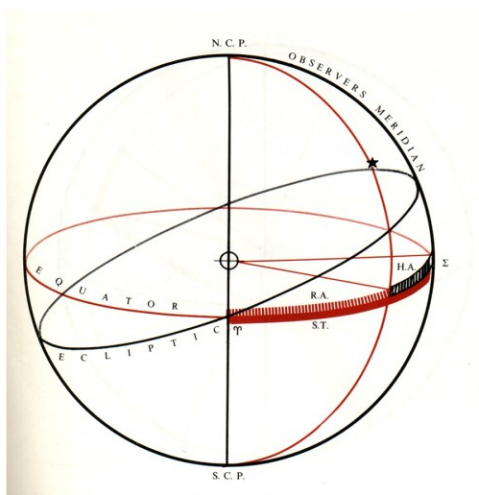
Questi programmi permettono di visualizzare in modo diverso regioni selezionate del cielo, e spesso calcolano e visualizzano direttamente anche le posizioni dei pianeti.

3

La misura del tempo

Angolo orario e ascensione retta

- angolo orario HA = angolo tra il meridiano locale e l'astro, misurato in senso orario (verso Ovest)
- ascensione retta α = angolo tra il punto γ e l'astro, misurato in senso antiorario (verso Est)
- tempo siderale ST = angolo orario del punto γ

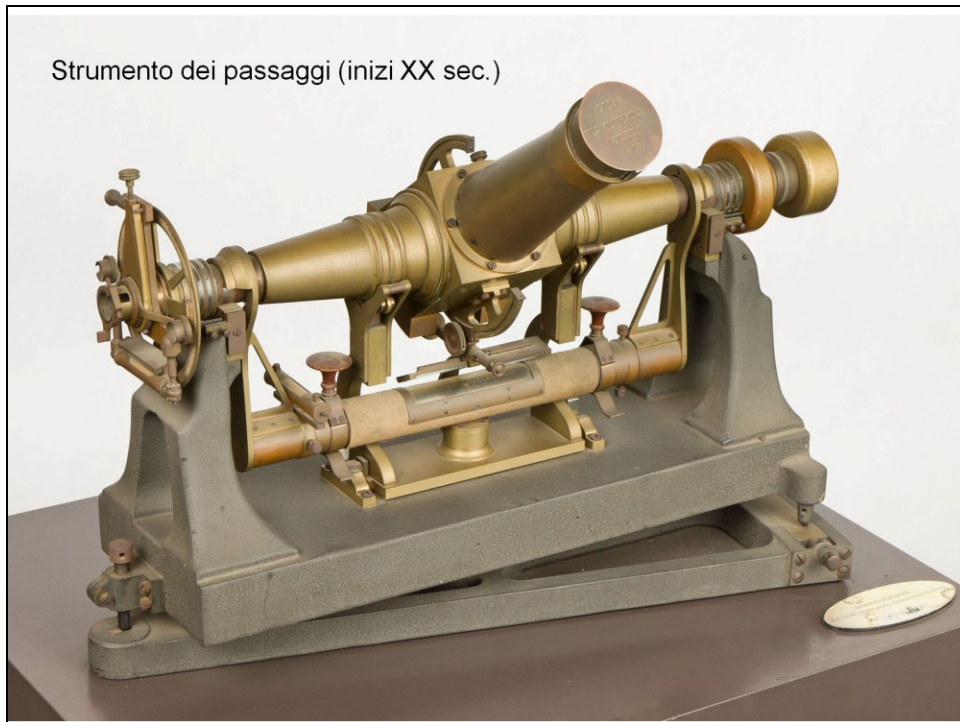


$$HA + \alpha = ST$$

$$HA = ST - \alpha$$

$$\alpha = ST - HA$$

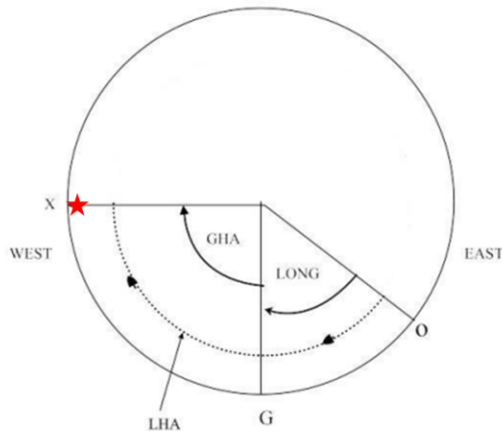
Abbiamo visto che l'angolo orario di un astro aumenta progressivamente nel tempo e compie una rivoluzione completa (360° o 24 ore angolari) in un giorno siderale. L'angolo orario del punto vernale viene perciò chiamato *Tempo Siderale Locale* (ST) e definisce una scala di tempo in cui la rotazione della Terra funge da orologio. Dalle definizioni che abbiamo dato di *ascensione retta* (l'angolo tra il punto vernale e l'astro, misurato sull'equatore in senso antiorario) e di *angolo orario* (l'angolo tra il meridiano e l'astro, misurato sull'equatore in senso orario) segue che *la somma tra l'angolo orario e l'ascensione retta di un astro è uguale al tempo siderale* (locale). Qualora si conosca il tempo siderale, questa equazione permette di trasformare l'angolo orario in ascensione retta (e viceversa).



Il rapporto esistente tra angolo orario, ascensione retta e tempo veniva sfruttato per mezzo di uno strumento di misura molto diffuso fino alla metà del '900 che è chiamato *strumento dei passaggi*. Si tratta di un cannocchiale capace di osservare unicamente lungo il meridiano locale (cioè rimane puntato costantemente verso sud, solo la sua altezza sull'orizzonte può essere variata) e che reca nel campo di vista una linea verticale che materializza la direzione del meridiano; esso serviva per determinare l'istante del passaggio di un astro al meridiano locale, nell'istante cioè in cui il suo angolo orario è pari a zero. Questo tipo di misura veniva utilizzato in vari modi. Se si osservava una stella di catalogo, in base alla sua ascensione retta era possibile calcolare il tempo siderale all'istante dell'osservazione, e con questo sincronizzare il pendolo a tempo siderale presente nell'osservatorio. Successivamente, l'osservazione del tempo di transito al meridiano di stelle di posizione sconosciuta permetteva di calcolare, sulla base del tempo segnato dal pendolo, la loro ascensione retta. Il tempo siderale battuto dal pendolo di cupola poteva poi essere utilizzato, con opportuni calcoli, per ottenere il tempo solare; tra i compiti istituzionali degli osservatori astronomici c'era anche quello di fornire segnali orari di precisione alla società civile.

Angolo orario e longitudine

- longitudine λ = angolo tra il meridiano di Greenwich e il meridiano locale (misurato verso Est)
- angolo orario locale LHA = angolo dell'astro misurato dal meridiano locale
- angolo orario di Greenwich GHA = angolo orario misurato dal meridiano di Greenwich



$$\text{LHA} = \text{GHA} + \lambda$$

$$\text{LST} = \text{GST} + \lambda$$

L'angolo orario di un astro è misurato a partire dal meridiano locale e quindi dipende dalla *longitudine* dell'osservatore, che è calcolata convenzionalmente a partire dal meridiano passante per l'osservatorio di Greenwich. Nella figura (che si deve interpretare come una vista della Terra in sezione lungo il piano di un parallelo, cioè lungo un piano ortogonale all'asse di rotazione) si è indicata con **O** la posizione dell'osservatore, con **G** la posizione del meridiano di Greenwich e con **X** (*) la posizione di un astro. Dalla definizione degli angoli risulta evidente che *l'angolo orario rispetto al meridiano locale è uguale alla somma dell'angolo orario rispetto a Greenwich e della longitudine del luogo*. Questa relazione permette di calcolare la longitudine di un luogo tramite l'osservazione di una stella di ascensione retta nota, a patto di avere a disposizione un orologio ben tarato che permetta di trasformare l'ascensione retta dell'astro in angolo orario. Questo è il motivo per cui la determinazione della posizione di una nave (il cosiddetto *punto nave*) richiedeva un orologio di precisione. Poiché il tempo siderale è un caso particolare di angolo orario (è l'angolo orario del punto vernale), anche tra i tempi siderali locale *LST* e di Greenwich *GST* esiste la stessa relazione che vale tra i corrispondenti angoli orari.

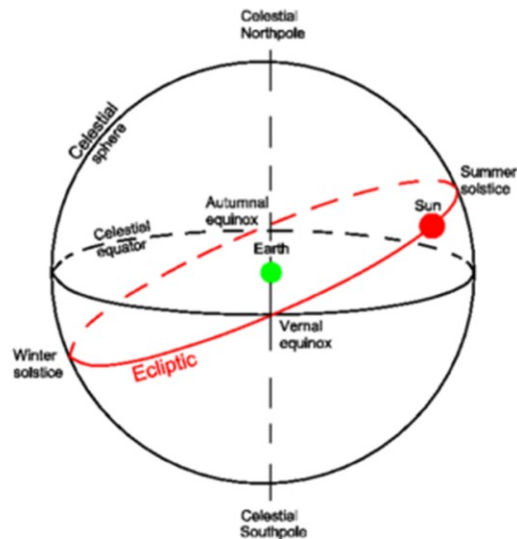
Angolo orario e tempo solare

Tempo solare = angolo orario del Sole + 12^h

tempo locale = tempo di Greenwich + λ

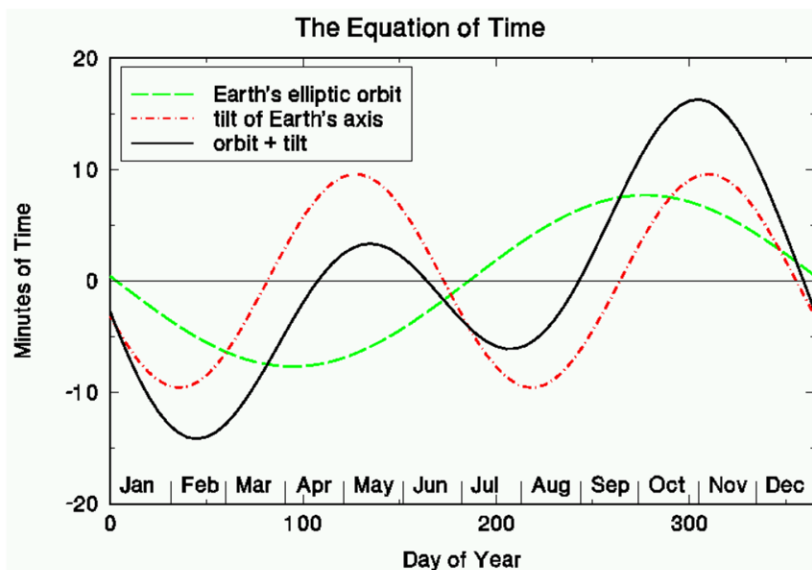
Il tempo civile è legato alla posizione del Sole e non delle stelle; esso può essere definito in base all'angolo orario del Sole, con un'aggiunta però di 12 ore in modo che il mezzogiorno, l'istante del passaggio del Sole al meridiano (cioè l'istante della sua massima altezza sull'orizzonte) corrisponda alle ore 12 e non alle ore 0. Poiché il tempo solare è un angolo orario, anche per esso valgono le stesse formule di trasformazione valide per gli angoli orari in funzione della longitudine del luogo (tempo solare locale = tempo solare di Greenwich + longitudine).

Tempo solare "vero" e "medio"



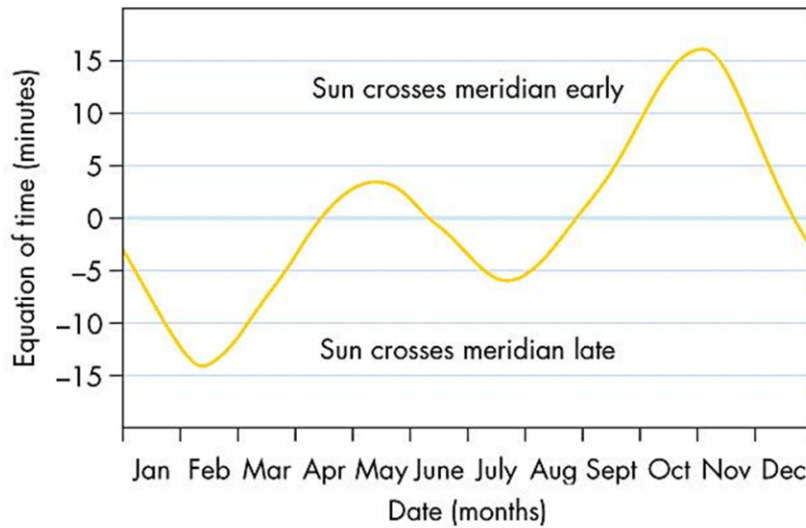
Il tempo solare definito in base alla posizione effettivamente osservata del Sole viene chiamato *tempo solare vero*, ma ha l'inconveniente di non scorrere uniformemente, e per due motivi distinti. Il primo è che l'orbita della Terra attorno al Sole non è circolare ma ellittica e quindi, in base alla seconda legge di Keplero, la sua velocità angolare è maggiore quando si trova nel punto di minima distanza dal Sole (*perielio*, ai primi giorni di gennaio) rispetto al punto di massimo allontanamento (*afelio*, ai primi di luglio). Il secondo è che il moto del Sole non si svolge lungo l'equatore ma lungo l'eclittica, che è inclinata di 23.5 gradi sull'equatore: anche se il moto lungo l'eclittica fosse uniforme, la sua proiezione sull'equatore (lungo il quale è misurato l'angolo orario, quindi il tempo) si muoverebbe con velocità variabile, minore nelle vicinanze della linea dei nodi (equinozi) e maggiore ai solstizi. Per questo motivo il tempo civile è definito sulla base di un *tempo solare medio*, ossia un tempo solare che *in media* procede alla stessa velocità del tempo solare vero, ma è privo di irregolarità; si può dire che il tempo solare medio sia definito come l'angolo orario del *Sole medio*, un corpo celeste fittizio che si muove lungo l'equatore con velocità angolare costante, percorrendo un'intera orbita con lo stesso periodo del Sole vero.

Tempo solare "vero" e "medio"



Il grafico mostra separatamente, in funzione del periodo dell'anno, le due irregolarità del tempo solare vero: l'effetto dell'eccentricità dell'orbita terrestre (curva tratteggiata verde) e dell'inclinazione dell'eclittica sull'equatore (curva tratteggiata rossa). Entrambi gli effetti hanno un ordine di grandezza di circa 10 minuti al massimo. La loro somma (curva continua nera) è la differenza tra tempo solare vero e tempo solare medio ed è chiamata *equazione del tempo*. **Nota:** la locuzione *equazione del tempo* fa uso del termine *equazione* in una accezione ormai desueta. Al giorno d'oggi si indica con *equazione* una eguaglianza che contiene un valore incognito che deve essere determinato; anticamente il termine indicava una quantità che, sommata a una certa grandezza, la rendeva uguale a un'altra (oggi diremmo *correzione*).

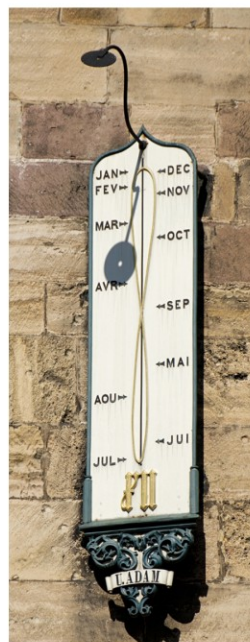
Tempo solare "vero" e "medio"



L'equazione del tempo è indispensabile in tutti i casi in cui sia necessario confrontare la posizione reale del Sole con il tempo solare medio.



Orologio solare



Meridiana

Al giorno d'oggi l'equazione del tempo è ad esempio utilizzata per trasformare in tempo solare medio il tempo segnato da un orologio solare o da una meridiana, che naturalmente funziona in base alla posizione reale del Sole e quindi indica il tempo solare vero. In passato la gente era abituata a regolare i ritmi della giornata sulla base della posizione del Sole e non aveva bisogno di una grande precisione nella misura del tempo, per cui il tempo solare vero era più che sufficiente: il fatto che la durata del giorno potesse variare di alcuni secondi non aveva alcuna importanza. **Nota:** benché il termine *meridiana* venga spesso utilizzato genericamente per indicare qualsiasi tipo di orologio solare, in senso proprio la meridiana è quell'orologio solare che indica l'istante del mezzogiorno.



Le meridiane (in senso stretto) non indicano le ore del giorno ma hanno come unico riferimento una linea retta verticale che indica la posizione dell'ombra dello gnomone (o del disco di luce prodotto dal foro gnomonico) all'istante del mezzogiorno solare vero. Molto spesso le meridiane hanno anche una linea a forma di 8 (lemniscata) che indica la posizione del mezzogiorno solare medio; questa figura è generata dalla combinazione del valore dell'equazione del tempo, che determina la distanza in senso orizzontale della lemniscata dalla linea verticale del mezzogiorno vero, e dell'altezza del Sole sull'orizzonte nel momento del passaggio al meridiano, variabile a seconda della stagione, che determina la distanza verticale dalla base dello gnomone.



Orologio meccanico
inglese a verga e foliot
(metà XVII sec.).
Data la scarsa
precisione fornita,
l'orologio ha solo una
lancetta per le ore.

Prima della seconda metà del XVII secolo la precisione degli orologi meccanici era molto bassa. I modelli più precisi di orologi “a verga e foliot” (il meccanismo che si utilizzava prima dell’introduzione del pendolo) avevano probabilmente errori superiori al quarto d’ora al giorno, e la differenza tra tempo solare vero e medio era totalmente influente: l’orologio andava comunque sincronizzato ogni giorno in base alla posizione del Sole.



Intorno alla metà del '600 Galileo e Huygens inventarono l'orologio a pendolo: in pochi anni l'errore degli orologi si ridusse a una frazione di secondo al giorno e la differenza tra tempo solare medio e tempo solare vero divenne osservabile. Il pendolo per sua natura batte un tempo uniforme e può essere facilmente regolato sul tempo solare medio ma, poiché la gente era abituata a utilizzare il tempo solare vero, molti dei primi pendoli avevano un sistema per visualizzare anche questo. Nei casi più semplici il sistema era manuale: i quadranti avevano una lancetta dei minuti accessoria che era regolabile a una distanza di tempo prefissata dalla lancetta principale (che segnava il tempo solare medio); ogni giorno l'utilizzatore doveva regolare la posizione della lancetta accessoria (in anticipo o in ritardo su quella principale) consultando una tabella dell'equazione del tempo.



Pendolo con doppia lancetta (tempo solare medio e vero) e indicazioni della data e di altre informazioni astronomiche (George Graham, circa 1740)

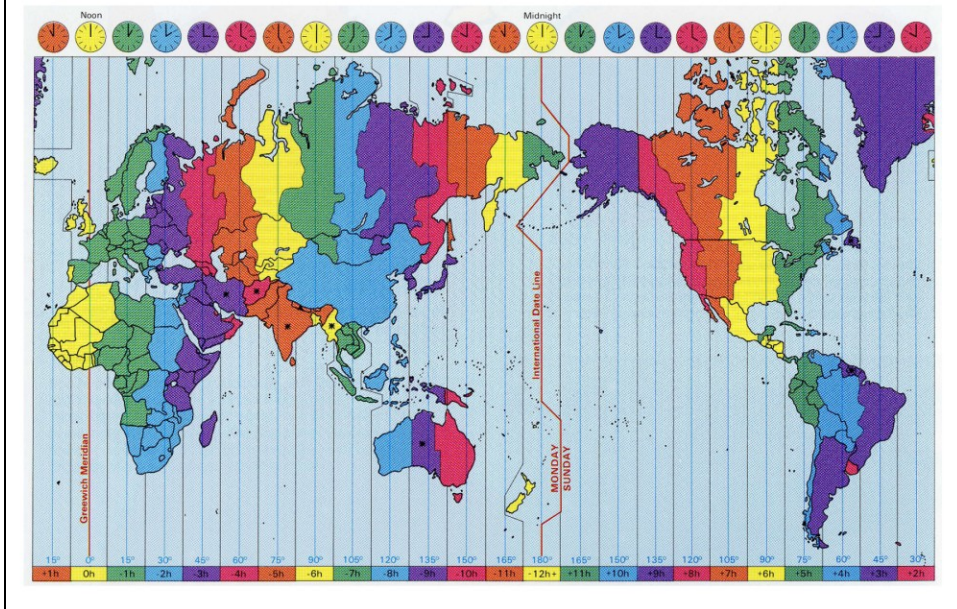
In altri casi il sistema era automatico: il ritardo della lancetta accessoria del tempo solare vero era regolato automaticamente da un apposito meccanismo interno all'orologio. La diffusione di orologi a pendolo di questo tipo era dovuta al fatto che, per un certo periodo di tempo, la gente continuò a considerare il tempo solare vero come il tempo "giusto"; la visualizzazione del tempo solare vero comunque permetteva la sincronizzazione dell'orologio sulla base dell'osservazione del Sole (ad esempio facendo uso di una meridiana) in un'epoca in cui non esistevano radio e segnali orari e la sincronizzazione a distanza degli orologi era difficile. Oggi, con la diffusione degli orologi da polso e con la crescente separazione del nostro modo di vivere dai fenomeni della natura, ci siamo abituati a usare il tempo solare medio e a non fare più caso alla posizione vera del Sole.

Differenze di longitudine e di tempo solare locale tra alcune città italiane

Città	Longitudine est (gradi)	ΔT (minuti)
Torino	7,42	0,00
Novara	8,38	3,84
Milano	9,11	6,76
Brescia	10,12	10,80
Verona	11,00	14,32
Padova	11,53	16,44
Venezia	12,21	19,16

Abbiamo visto che il tempo solare definito rispetto al meridiano locale dipende dalla longitudine del luogo. Di conseguenza se si adottasse questo tipo di tempo sarebbe necessario sincronizzare nuovamente l'orologio ogni volta che ci si sposta, anche di poco. Uno spostamento in longitudine di 1 grado (che alle nostre latitudini corrisponde a circa 80 km) comporta un cambiamento di 4 minuti di tempo. In passato, quando gli spostamenti da una città all'altra, a piedi o a cavallo, richiedevano giorni, queste differenze di tempo non erano importanti. Ma in epoca moderna, con l'introduzione di mezzi di trasporto più veloci, le differenze tra le ore locali hanno cominciato ad essere d'impiccio. Ad esempio l'orario di un treno che percorresse la linea Torino-Milano dovrebbe essere calcolato tenendo conto di piccole differenze di tempo a ogni stazione: una situazione tutt'altro che comoda!

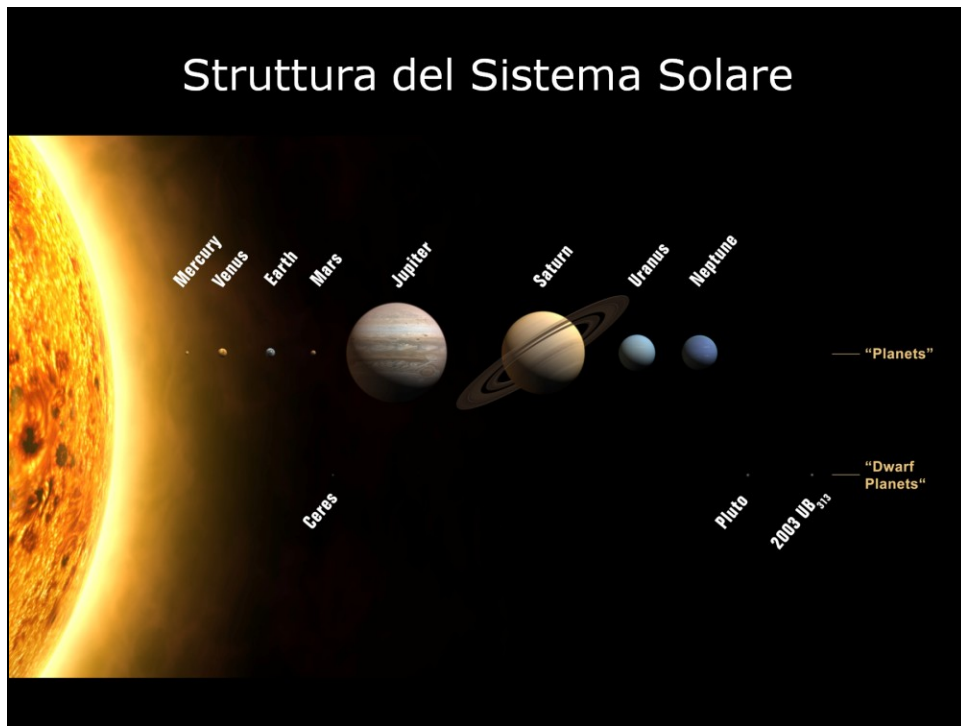
I fusi orari



Per questo motivo nel 1834 l'Inghilterra decise di adottare in tutta la nazione un unico tempo standard, quello di Greenwich. Questo metodo fu successivamente esteso alla maggior parte dei paesi occidentali, a partire dalla conferenza di Washington del 1884, con l'introduzione del sistema dei fusi orari. In base a questo sistema la Terra è divisa in 24 fasce di longitudine larghe 15° ciascuna; all'interno di ogni fascia viene uniformemente adottata l'ora solare media del meridiano centrale. Di conseguenza una qualsiasi località dista al massimo 7.5 gradi in longitudine dal proprio meridiano di riferimento, e il tempo del passaggio al meridiano del "sole medio" può differire dal mezzogiorno civile di $7.5 \times 4 = 30$ minuti al massimo.

4

Il Sistema Solare

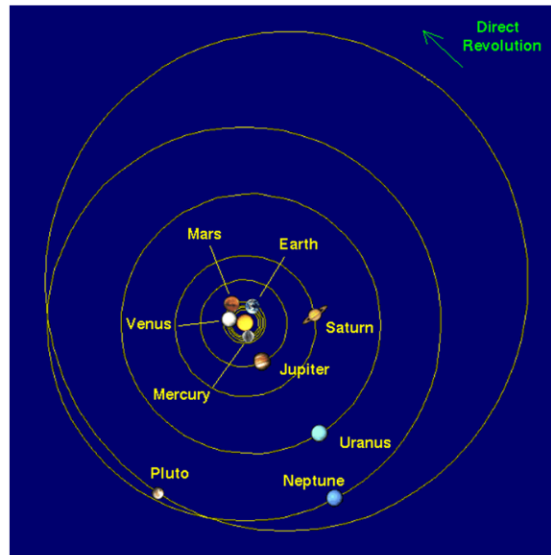


I pianeti principali del “nostro” Sistema Solare sono otto; in ordine di distanza crescente dal Sole sono: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Fino a pochi anni fa anche Plutone (la cui orbita è esterna a quella di Nettuno) era considerato un pianeta, ma si è scoperto recentemente che esso è il rappresentante di una numerosa famiglia di piccoli corpi chiamati *oggetti trans-nettuniani* o *oggetti della fascia di Kuiper*, e oggi è classificato più esattamente come pianeta nano.

Poiché le distanze che dividono i pianeti sono molto più grandi delle loro dimensioni fisiche, è impossibile rappresentare graficamente il Sistema Solare rispettando contemporaneamente le scale delle distanze e dei diametri dei corpi. In questo disegno (in realtà un fotomontaggio di immagini reali) sono quindi rappresentate in scala le dimensioni ma non le distanze (i pianeti appaiono molto più vicini tra loro di quanto siano in realtà). Per avere un’idea più immediata delle proporzioni si tenga conto che, se le dimensioni di tutti i pianeti fossero ridotte di un miliardo di volte, la Terra sarebbe una sfera del diametro di 13 mm (una ciliegia), Giove una sfera del diametro di 14 cm (un grosso pompelmo) e il Sole avrebbe un diametro di 1,4 metri.

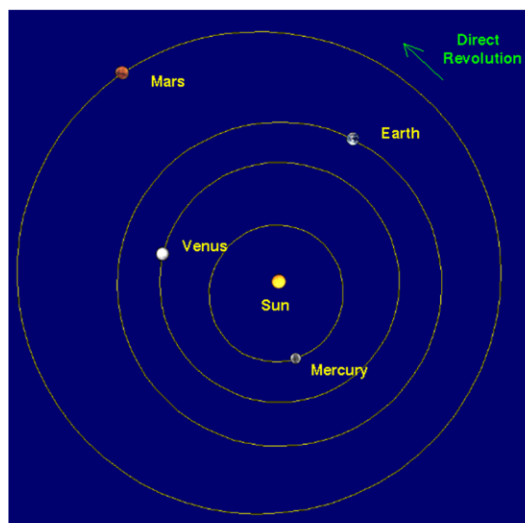
I pianeti del Sistema Solare sono divisi in due gruppi: i *pianeti interni*, i più vicini al Sole (Mercurio, Venere, Terra e Marte) hanno dimensioni relativamente piccole e sono composti prevalentemente da materiale roccioso (silicati) con un nucleo metallico; i *pianeti esterni* (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) sono molto più grandi e composti da materiale molto più leggero (soprattutto idrogeno). I due gruppi sono indicati anche con i nomi di *pianeti terrestri* (interni) e *pianeti giganti* (esterni).

Struttura del Sistema Solare



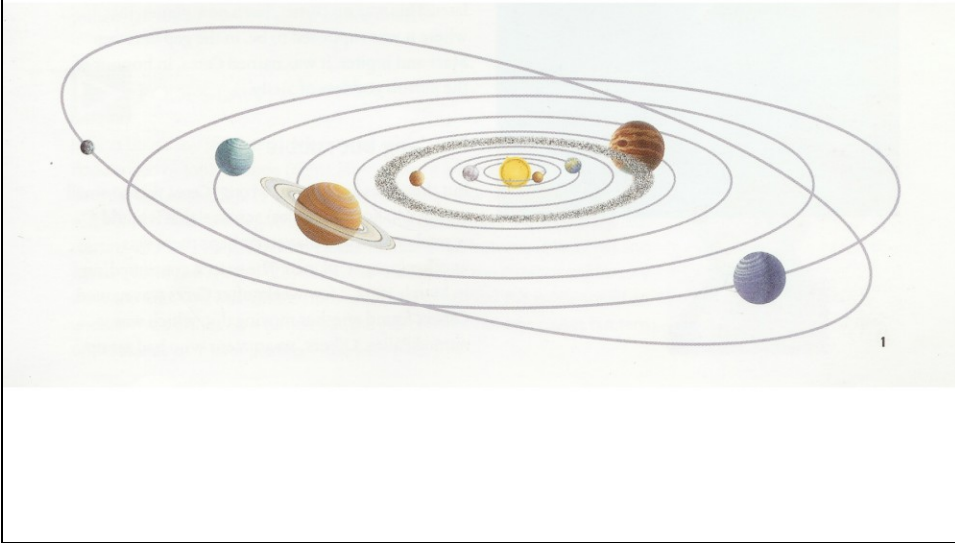
La figura mostra, in scala, le orbite dei pianeti del Sistema Solare viste in pianta (cioè “da sopra” il loro piano orbitale). Per la prima legge di Keplero, tutte le orbite hanno forma ellittica ma, come si nota dalla figura, per i pianeti del Sistema Solare si tratta di ellissi molto prossime a un cerchio: le eccentricità orbitali sono tutte inferiori a circa 0,05 (fanno eccezione Mercurio e Plutone il quale però, come si è detto, non è uno dei pianeti principali). Tutti i pianeti percorrono la loro orbita in senso antiorario (chiamato anche “senso diretto”). Alla scala della figura, le orbite dei pianeti interni sono molto piccole e appaiono quasi sovrapposte nel centro (si tenga conto che il raggio dell’orbita di Nettuno è di 30 AU, quello di Marte di 1,5 AU).

Il Sistema Solare interno



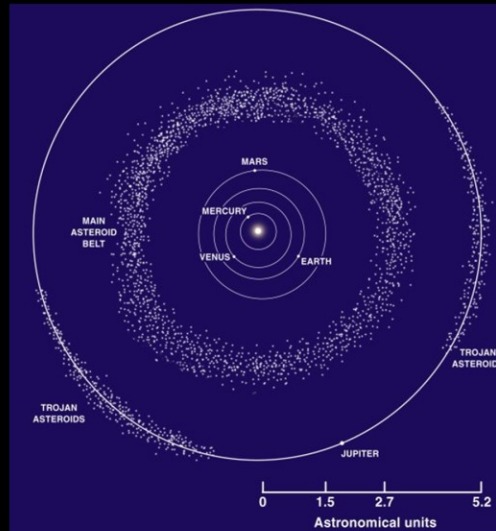
La figura mostra, ingrandita, la zona centrale della figura precedente, che comprende le orbite dei pianeti interni. Il raggio dell'orbita della Terra è, per definizione, uguale a 1 AU.

Struttura del Sistema Solare



Il disegno riproduce schematicamente le orbite dei pianeti del Sistema Solare viste non in pianta (come le due figure precedenti) ma di lato. Si noti come tutte le orbite siano quasi complanari: le inclinazioni reciproche dei piani orbitali sono di pochi gradi soltanto (ancora una volta, eccettuato Plutone).

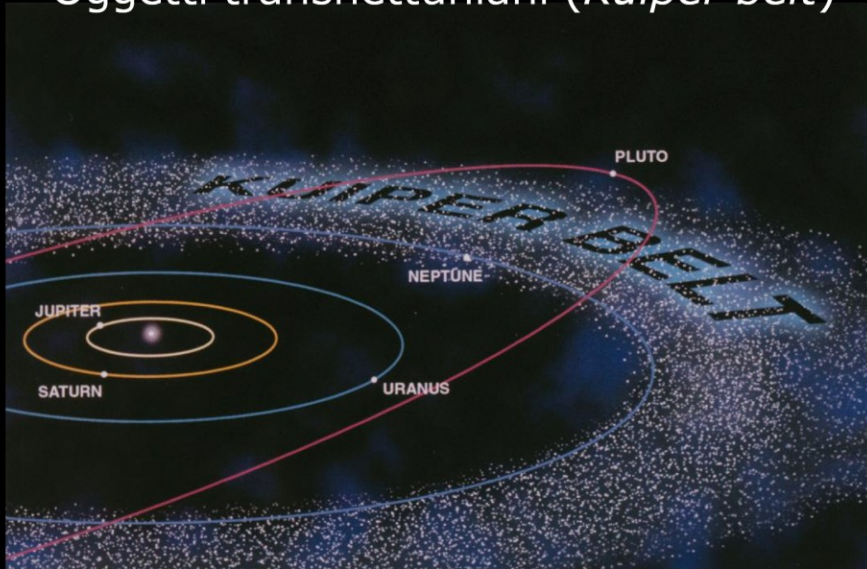
Asteroidi: fascia principale e Troiani



Oltre ai pianeti principali, interni ed esterni, il Sistema Solare contiene un gran numero di corpi minori, tra cui le *comete* e gli *asteroidi* (a volte chiamati pianetini). Gli asteroidi conosciuti sono più di mezzo milione, ma il loro numero continua ad aumentare a seguito delle osservazioni che vengono effettuate. La stragrande maggioranza degli asteroidi si muove in una regione compresa tra le orbite di Marte e Giove, a una distanza dal Sole che va da circa 2 a circa 4 AU, chiamata *fascia principale* (*main belt*) o *cintura degli asteroidi*. Altri due gruppi numerosi di asteroidi (chiamati *Troiani*) si muovono circa sulla stessa orbita di Giove, pur mantenendo sempre una debita distanza dal pianeta, cioè precedendolo o seguendolo di diverse unità astronomiche. L'asteroide più grande, Cerere, ha un diametro di circa 1000 km ed è quindi decisamente più piccolo della Luna (che ha un diametro di 3500 km); quelli più piccoli (osservabili al telescopio) hanno diametro di pochi metri, ma bisogna notare che il limite inferiore è dettato solo dalle capacità osservative e che in realtà non esiste soluzione di continuità tra gli asteroidi più piccoli, i meteoroidi (metri o centimetri) e la polvere interplanetaria.

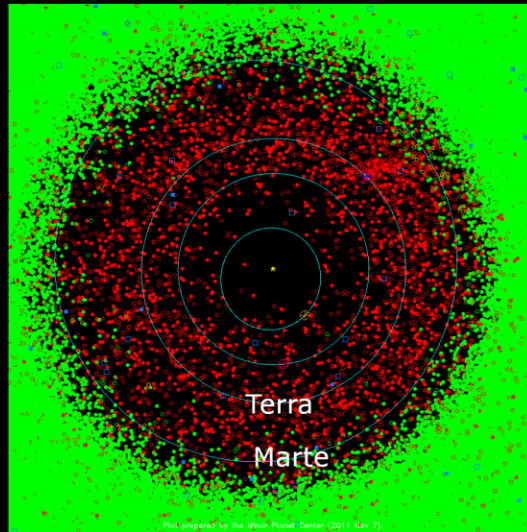
Si pensa che l'esistenza della fascia principale degli asteroidi sia dovuta alle forti perturbazioni gravitazionali prodotte dal pianeta Giove, che con la sua massa elevata ha perturbato le orbite del materiale presente in questa zona, impedendo il completamento di quel processo di accrescimento che in altre regioni ha portato alla formazione dei pianeti principali.

Oggetti transnettuniani (*Kuiper belt*)



Un'altra regione molto popolata di piccoli corpi è la *fascia di Kuiper*, che si trova all'estrema periferia del Sistema Solare, oltre l'orbita di Nettuno (30 AU) e fino a circa 50-70 AU. Gli oggetti che si muovono in questa regione (*oggetti trans-nettuniani* o *oggetti della fascia di Kuiper*) sono composti principalmente di ghiaccio e quindi sono più simili alle comete che agli asteroidi; se ne conoscono circa un migliaio, ma sicuramente questa è solo una piccola percentuale di una popolazione molto più vasta, perché gli oggetti più piccoli sono visibili con molta difficoltà a causa della loro grande distanza dalla Terra. Si pensa che anche Plutone faccia parte di questa classe di oggetti.

Near Earth Asteroids (NEA)



Oltre alle regioni densamente popolate descritte precedentemente, esistono piccoli corpi (asteroidi e comete) che orbitano un po' ovunque nel Sistema Solare. Ad esempio la figura mostra una "istantanea" della posizione degli asteroidi conosciuti nei dintorni e all'interno dell'orbita di Marte. Oltre agli asteroidi della fascia principale, esterni all'orbita di Marte (rappresentati in verde), esistono anche numerosi asteroidi che incrociano le orbite dei pianeti interni e quindi possono avere incontri ravvicinati o addirittura collidere con essi. Questi sono solitamente indicati con la sigla *NEA* (*Near Earth Asteroids*, asteroidi vicini alla Terra) e sono qui rappresentati in rosso. Oltre a questi esistono anche altri tipi di asteroidi e comete che si muovono nel Sistema Solare esterno, incrociando le orbite dei pianeti giganti (da Giove a Nettuno).



Il Sistema Solare (Sole e pianeti) si è formato dalla contrazione e condensazione di una grande nube di gas e polveri che si trovava all'interno della nostra galassia, la Via Lattea. La Via Lattea, come le altre galassie, è un sistema che comprende circa un centinaio di miliardi di stelle, oltre a una grande quantità di materiale sparso nello spazio interstellare (gas e polveri). Una galassia non deve essere concepita come una struttura statica, ma come un sistema in continua trasformazione, quasi un organismo vivente: la galassia ruota, trascinando enormi quantità di gas e polveri che si condensano a formare stelle e pianeti; le stelle emettono luce attraverso reazioni nucleari e a volte, dopo aver esaurito la propria scorta di combustibile, esplodono rilasciando nello spazio il materiale di cui sono composte; questo andrà a formare nuove stelle, in un ciclo continuo.



Le galassie ci appaiono come regioni nebulose debolmente luminose. In realtà il loro aspetto diffuso è prodotto da parecchi miliardi di stelle singole che però, a causa della grande distanza a cui si trovano, non riusciamo a distinguere separatamente, un po' come, quando osserviamo una spiaggia da distante, ci sembra un'unica superficie continua anche se in realtà è formata da granelli di sabbia distinti.

Più difficile risulta osservare le nubi di gas e polveri che la galassia contiene, perché si tratta di materia non luminosa. Le nubi possono essere osservate più facilmente quando la galassia è vista di taglio.

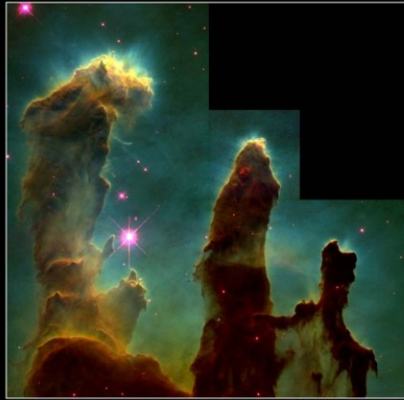
Nubi molecolari giganti



Possiamo vedere anche molte nubi di polvere all'interno della nostra galassia, la Via Lattea. La macchia oscura che si vede sulla destra di questa fotografia della Via Lattea, soprannominata "Sacco di carbone", non è una regione che contiene meno stelle rispetto alle zone circostanti, ma una zona in cui la luce delle stelle appare attenuata dalla presenza di una nube oscura posta davanti ad esse.

Le nubi da cui si formano le stelle sono chiamate *nubi molecolari giganti*: *molecolari* perché, a causa della bassa temperatura dello spazio interstellare, molti elementi si combinano in molecole; *giganti* perché la loro massa tipica è dell'ordine del milione di masse solari, e quindi potenzialmente potrebbero dare origine a milioni di stelle.

Nubi molecolari giganti



Gaseous Pillars • M16

PRC95-44a • ST ScI OPO • November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

HST • WFPC2



Altre immagini di regioni della nostra Galassia in cui è in corso la formazione di nuove stelle.

Nubi molecolari giganti



Altre immagini di regioni della nostra Galassia in cui è in corso la formazione di nuove stelle.

Abbondanza cosmica di elementi

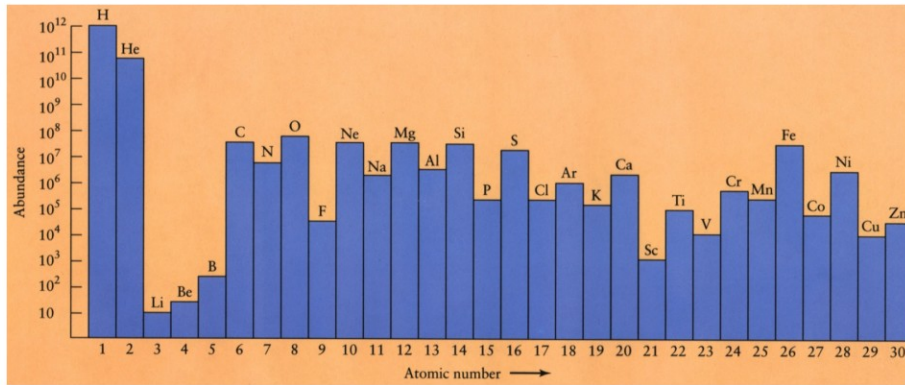
Idrogeno (H): 74 %

Elio (He): 24 %

altri elementi: 2 %

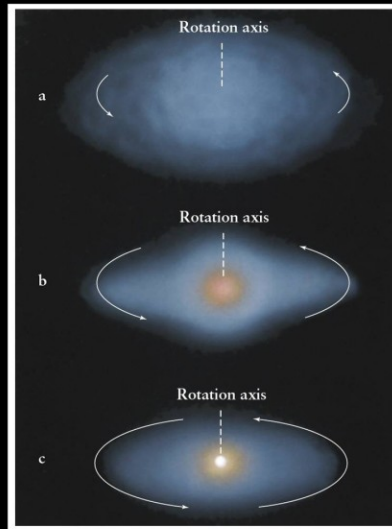
Le nubi molecolari giganti hanno una composizione del tutto simile alla composizione chimica media della galassia in cui si formano, e che è tipica della composizione dell'Universo: circa $\frac{3}{4}$ di idrogeno, $\frac{1}{4}$ di elio, e piccole percentuali di tutti gli altri elementi più pesanti. Si pensa che l'idrogeno e l'elio siano stati prodotti direttamente dal Big Bang, l'esplosione iniziale che ha dato origine all'Universo, mentre tutti gli altri elementi siano stati prodotti dalle reazioni nucleari avvenute all'interno di stelle che successivamente sono esplose (*supernovae*), arricchendo la materia interstellare dei nuovi isotopi generati al loro interno.

Abbondanza cosmica di elementi



In questo grafico sono riportate le abbondanze cosmiche relative per i diversi elementi. Per una corretta interpretazione del grafico, si noti che è fatto in scala logaritmica: ogni tacca dell'asse delle ordinate corrisponde a un fattore 10 nell'abbondanza cosmica (ad esempio si legge che nell'Universo per ogni atomo di ossigeno ce ne sono 10 mila di idrogeno). Nonostante gli elementi pesanti siano una piccola percentuale del materiale che compone l'Universo, si tratta di una parte molto importante, perché include tutti gli elementi di cui sono fatti la superficie terrestre e gli esseri viventi (carbonio, azoto, ossigeno, magnesio, alluminio, silicio, ferro, ecc.).

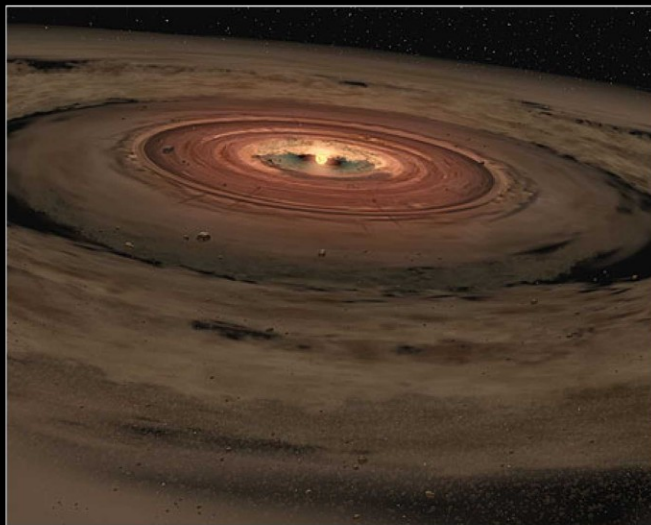
Contrazione della protonebulosa solare



Le nubi molecolari sono in uno stato di equilibrio precario tra due forze contrastanti: la pressione del gas, che tenderebbe a farle espandere, e l'attrazione gravitazionale reciproca tra le particelle che le compongono, che tenderebbe a farle contrarre. Il fattore che decide quale delle due forze ha il sopravvento è la densità della nube: se la densità (a causa del moto della nube all'interno della galassia e delle deformazioni a cui è sottoposta per le perturbazioni esterne) aumenta oltre un certo valore critico, la gravità vince la pressione e la nube comincia a contrarsi; a causa della contrazione, la densità aumenta ancora, innescando una contrazione sempre più rapida. Nel corso della contrazione della nube è possibile che alcune sue piccole regioni abbiano una densità superiore a quella delle zone circostanti: in questo caso si sviluppano nuclei di condensazione secondari, che si contrarranno fino a formare stelle e sistemi planetari.

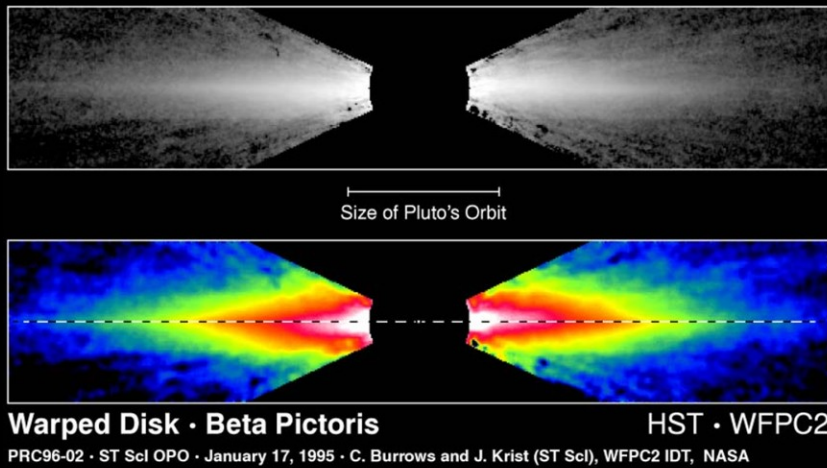
Si pensa che il Sole e il Sistema Solare si siano formati da una zona di condensazione di questo tipo circa 4,5 miliardi di anni fa. La protonebulosa solare ruotava lentamente, come conseguenza della rotazione generale della Galassia, e contraendosi la sua velocità angolare è aumentata (un corpo che si contrae aumenta la sua velocità di rotazione per la legge di conservazione del momento angolare). Proseguendo la contrazione, la velocità di rotazione è aumentata al punto che la forza centrifuga ad essa associata ha controbilanciato la forza di attrazione, e la nube si è disposta in una configurazione a disco relativamente stabile. La forma a disco è una conseguenza del fatto che la forza centrifuga agisce solo in senso ortogonale all'asse di rotazione, quindi la contrazione ("caduta") *verso* il piano del disco non è contrastata da nessuna forza (a differenza della contrazione in direzione radiale, *lungo* il piano del disco). La relativa stabilità di questa configurazione è dovuta al fatto che ogni particella percorre una propria orbita, quasi kepleriana, attorno al centro della nebulosa (l'orbita kepleriana può essere vista come una traiettoria stabile in cui la forza di attrazione viene bilanciata esattamente dalla forza centrifuga).

Contrazione della protonebulosa solare



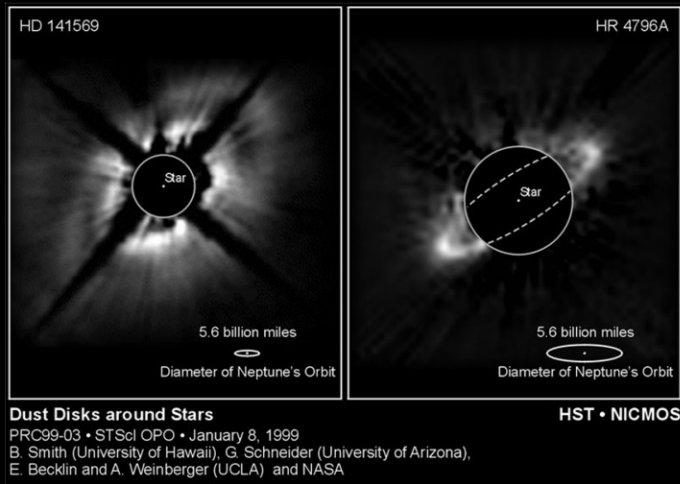
Ovviamente non abbiamo modo di osservare un evento avvenuto 4,5 miliardi di anni fa: possiamo solo immaginarlo (ad esempio attraverso un disegno come quello qui riprodotto).

Dischi protoplanetari



Tuttavia attorno ad alcune stelle vicine sono stati osservati dischi di gas e polveri che si pensa siano simili a quello che ha dato origine al nostro Sistema Solare. Il caso più famoso è quello della stella β (beta) Pictoris, di cui qui si vede un'immagine ripresa dal telescopio spaziale Hubble. Per poter vedere la debole luminosità del disco circumstellare è necessario usare uno strumento particolare (*coronografo*) che nasconde dietro un diaframma opaco (la figura nera a forma di farfalla visibile al centro delle fotografie) la stella centrale, la cui intensa luce altrimenti renderebbe impossibile distinguere la nebulosa.

Dischi protoplanetari



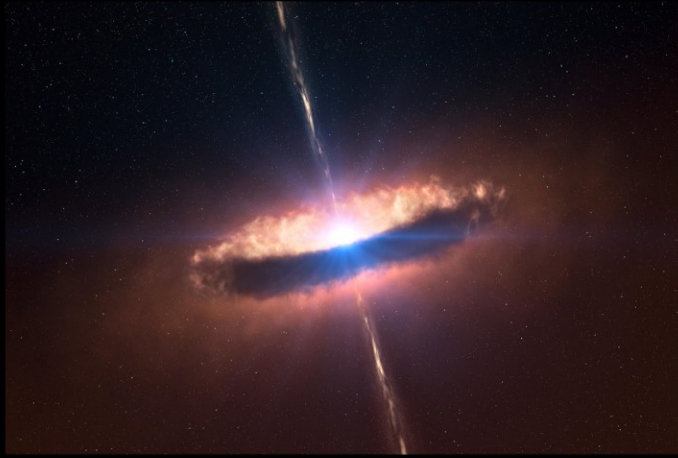
Dischi di polveri sono stati osservati anche intorno ad altre stelle (anche qui si tratta di immagini del telescopio spaziale Hubble).

Dischi protoplanetari



Con l'aumento della sensibilità dei telescopi il numero di casi osservati di stelle circondate da una nube di polvere sta crescendo rapidamente.

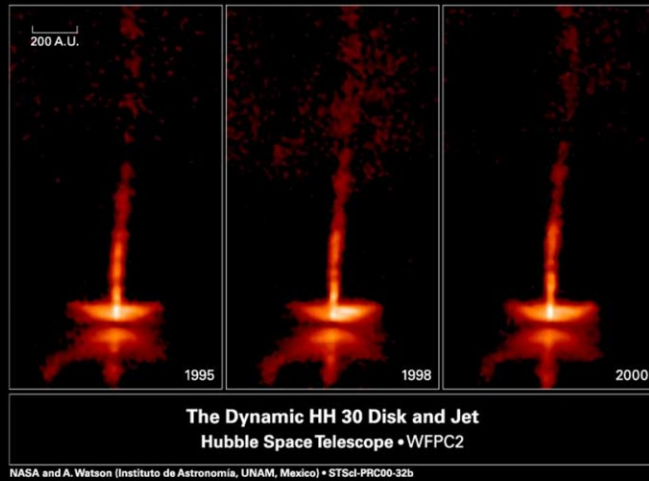
Il proto-Sole: una stella T Tauri



Mentre la nebulosa proto-solare si contraeva in forma di disco, le particelle che la formavano iniziarono ad aggregarsi in oggetti sempre più grandi. Per comodità di trattazione descriveremo separatamente cosa avvenne nelle diverse zone della nebulosa, a partire dalla regione più interna; si tenga però sempre presente che questi processi avvennero quasi contemporaneamente.

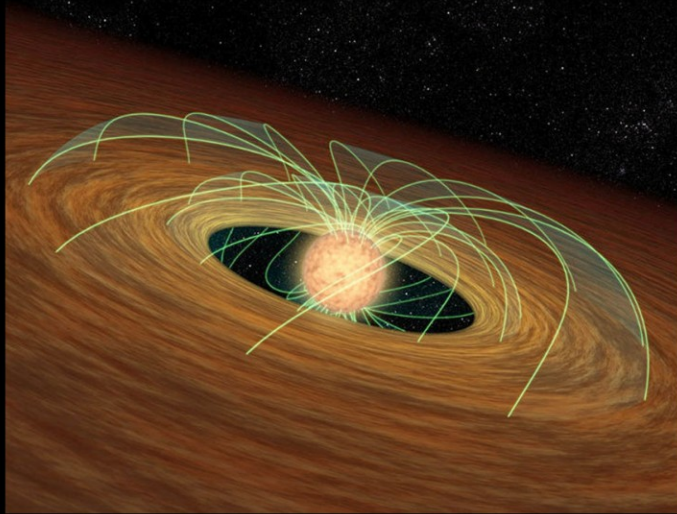
La zona più interna della nebulosa è quella in cui si condensò la maggior parte del materiale, dando origine a un corpo massiccio di forma approssimativamente sferica che andrà a costituire il Sole. Come è noto, quando un gas viene compresso si riscalda, perché l'energia fornita per la compressione si trasforma in agitazione termica delle molecole. L'enorme quantità di energia fornita dal collasso gravitazionale riscaldò il proto-Sole fino a una temperatura di alcuni milioni di gradi; a queste temperature il gas si ionizza (gli elettroni si staccano dai nuclei atomici) e quindi diventa un buon conduttore di corrente, e inoltre emette una grande quantità di luce. Un'altra conseguenza del collasso fu che la velocità di rotazione aumentò ulteriormente. Una stella che si trova in questa fase iniziale della sua vita viene chiamata *stella T Tauri* (dal primo oggetto di questo tipo osservato) ed è caratterizzata da un forte campo magnetico (generato dalla combinazione di alta conducibilità elettrica ed elevata velocità di rotazione), da una violenta attività eruttiva e da una forte emissione di particelle (vento solare) soprattutto lungo due "pennacchi" simmetrici orientati lungo l'asse di rotazione.

Stelle T Tauri



Possiamo osservare diversi esempi di stelle *T Tauri* tra le stelle vicine al Sole; attorno ad esse spesso è visibile anche il disco di polvere da cui sono state generate.

Campi magnetici nelle stelle T Tauri



Per potersi contrarre fino alle dimensioni di una stella, la parte centrale della nebulosa deve perdere la maggior parte del suo momento angolare, altrimenti la forza centrifuga associata alla rotazione impedirebbe la contrazione. In effetti attualmente il Sole ruota molto lentamente (ha un periodo di rotazione di circa 25 giorni), per cui la maggior parte del momento angolare del Sistema Solare è concentrata nel moto orbitale dei pianeti, soprattutto dei pianeti giganti. Per molto tempo questo fatto ha costituito un paradosso: come mai il Sole, che contiene la maggior parte della massa del Sistema Solare, e che dovrebbe essere la parte di esso che ruota più velocemente (in quanto si è contratta maggiormente) invece ha un moto di rotazione così lento? La risposta a questo enigma non è ancora del tutto chiara, ma sembra che sia legata ai forti campi magnetici generati dalle stelle *T Tauri*, che sono in grado di trascinare le regioni più interne della nebulosa; ciò avrebbe l'effetto di trasferire momento angolare dalla stella al disco (la rotazione della stella viene frenata accelerando quella del disco).

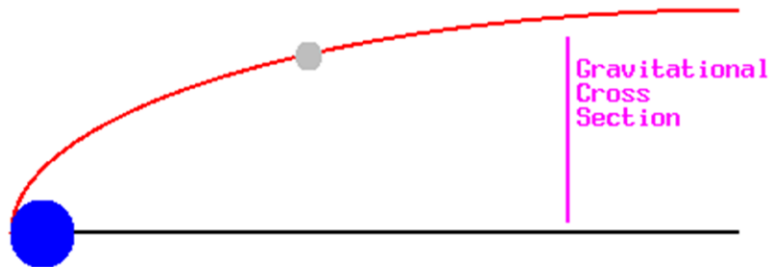
Quando la temperatura e la pressione interna del proto-Sole raggiunsero valori sufficientemente elevati, nel nucleo del Sole si innescarono spontaneamente reazioni di fusione termonucleare che, trasformano nuclei di idrogeno in nuclei di elio, generano un'enorme quantità di energia, che viene gradualmente trasportata verso l'esterno sotto forma di luce e calore: si può dire che al centro del Sole avviene un'esplosione termonucleare continua, simile a quella delle bombe all'idrogeno, che è però confinata dagli spessi strati di materia che avvolgono il nucleo. Da questo momento il Sole raggiunge una condizione di equilibrio stabile, perché la forte pressione prodotta dall'energia della fusione controbilancia la forza di attrazione gravitazionale e quindi la contrazione si arresta. Il Sole rimarrà in questo stato di equilibrio per molti miliardi di anni, fino a quando le reazioni nucleari avranno convertito in elio tutto l'idrogeno disponibile. Questa condizione di equilibrio dovuta alla conversione dell'idrogeno in elio è lo stato che viene considerato normale per una stella, che in questa lunga fase della sua vita viene chiamata *stella di sequenza principale*.



Diamo ora un'occhiata a cosa succedeva nel frattempo nella zona successiva (in ordine di distanza dal centro) della nebulosa proto-solare, cioè alla parte più interna del disco. Mentre il proto-Sole si contraeva, avviandosi alle fasi di *T Tauri* e di sequenza principale, il gas e la polvere che lo circondavano si muovevano su orbite abbastanza ordinate e quasi circolari. In queste condizioni i corpuscoli che componevano la nebulosa avevano collisioni con velocità relativa molto bassa, che favoriva la loro aggregazione in corpi più grandi, come conseguenza dell'attrazione reciproca dovuta a forze chimiche (adesione superficiale) ed elettrostatiche. Si tratta di un meccanismo simile a quello che porta la polvere che si trova nei nostri appartamenti a raccogliersi in batuffoli o ad aderire ai mobili e ai vetri.

Accrezione nel Sistema Solare interno

1. coagulazione delle polveri in *planetesimi* (1-10 km)
2. *runaway growth*: formazione di embrioni planetari ($0,01-0,1 M_{\oplus}$)
3. fusione degli embrioni in un protopianeta

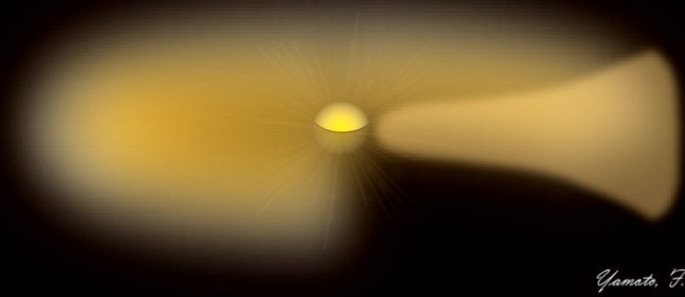


L'accrezione della polvere in corpi sempre più grandi è avvenuta in stadi successivi. Il meccanismo che ha prodotto il *runaway growth* è la *deflessione gravitazionale* che la traiettoria di un corpo subisce quando passa nelle vicinanze di un pianeta abbastanza grande. A causa di questo fenomeno la *sezione d'urto gravitazionale* di un grosso pianeta (cioè l'area effettiva di raccolta dei frammenti) diventa molto più grande della *sezione d'urto geometrica* (l'area trasversale della sagoma dell'oggetto). È chiaro che questo meccanismo costituisce un effetto di selezione evolutiva che avvantaggia i corpi più grandi che, avendo massa maggiore, sono più efficienti nel raccogliere altro materiale e quindi crescono più velocemente.

Accrezione nel Sistema Solare esterno

Più lenta che nel Sistema Solare interno, per diversi motivi:

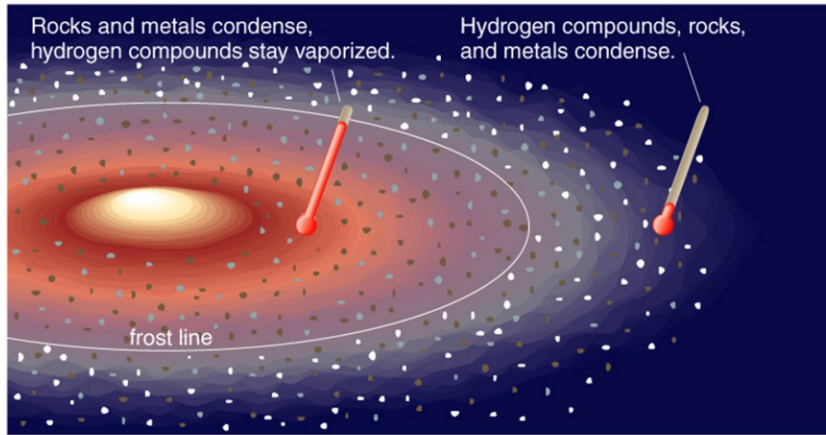
1. minore densità di materiale (maggiore spessore del disco)
2. più lunga permanenza del materiale (minore intensità del vento solare)
3. periodi orbitali più lunghi



Nel Sistema Solare esterno la fase di formazione dei pianeti è durata più a lungo rispetto alle regioni più vicine al Sole, per diverse ragioni:

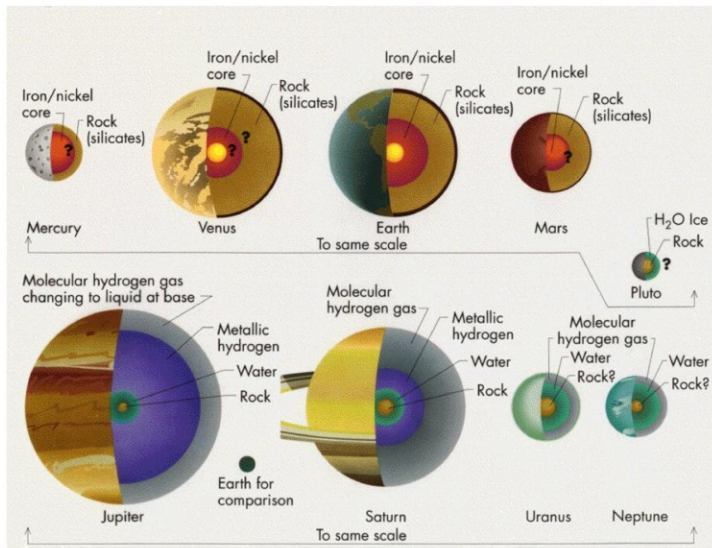
1. Lo spessore del disco della protonebulosa solare aumentava dal centro verso la periferia, quindi nelle regioni esterne la densità (per unità di volume) del materiale era inferiore.
2. I corpi più lontani dal Sole, per la terza legge di Keplero, hanno periodi orbitali più lunghi, quindi anche la frequenza con cui hanno incontri ravvicinati e collisioni è inferiore.
3. Man mano che ci si allontana dal Sole l'intensità del vento solare diminuisce e quindi il processo di "pulizia" dai residui di gas e polveri è stato meno efficiente.

Gradiente di temperatura



Un altro fattore importante è stata la differenza di temperatura del materiale che costituiva la protonebulosa solare tra le regioni interne, riscaldate dall'intenso irraggiamento del proto-Sole, e quelle esterne, progressivamente più fredde. Per questo motivo molti composti leggeri che nel Sistema Solare interno erano allo stato gassoso, e quindi difficilmente accumulabili nei pianeti che si stavano formando, erano invece solidificati nelle regioni esterne, quindi disponibili come materiale per la formazione dei pianeti.

Differenze di composizione interna



pianeti
"terrestri"
(interni)

pianeti
"giganti"
(esterni)

Il fatto che i pianeti esterni siano composti soprattutto da elementi leggeri (soprattutto idrogeno) non significa quindi che, in termini assoluti, il loro contenuto in elementi pesanti sia inferiore a quello dei pianeti terrestri; si pensa anzi che i pianeti giganti possiedano un nucleo roccioso più grande dei pianeti terrestri. Tuttavia i pianeti esterni hanno potuto accumulare, sopra questo nucleo solido, uno spesso strato di elementi leggeri (che, come abbiamo visto, costituivano il 98% del materiale della protonebulosa), cosa che i pianeti interni non hanno potuto fare. Detto in altri termini, mentre la composizione chimica dei pianeti esterni rispecchia quella della protonebulosa, i pianeti interni hanno utilizzato per la loro formazione solo quel 2% di materiale che era rappresentato dagli elementi pesanti.