Astronomia di posizione

Giuseppe Cutispoto

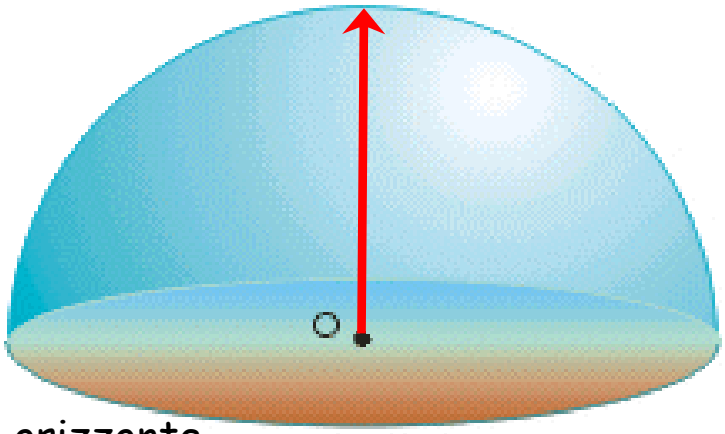
INAF – Osservatorio Astrofisico di Catania

giuseppe.cutispoto@inaf.it

Versione: 6 giugno 2021

In questa dispensa, distribuita gratuitamente, sono utilizzate informazioni e disegni prelevati da vari siti presenti sulla rete. Si ringraziano gli autori per aver messo a disposizione i materiali.

La Sfera Celeste

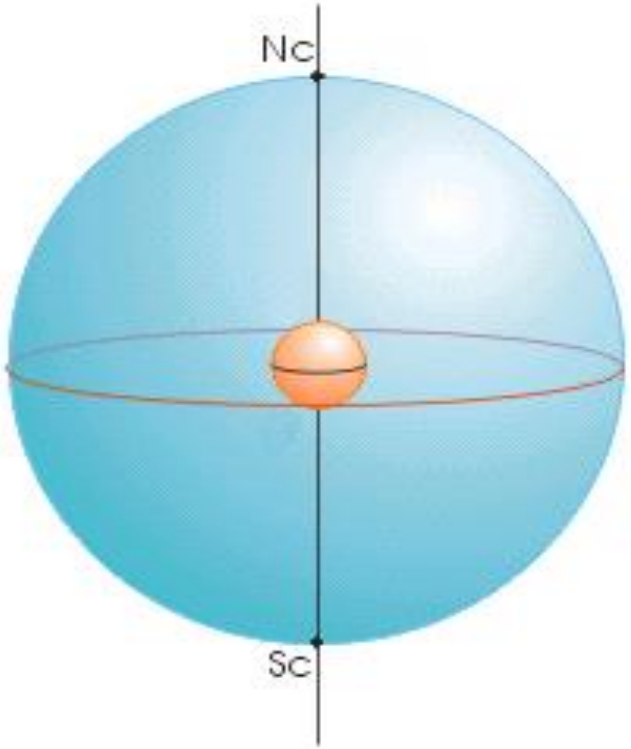


orizzonte

Quando osserviamo il cielo notturno abbiamo la sensazione di trovarci al centro di una cupola semisferica con dimensioni imprecisabili.

L'intera volta celeste è una sfera completa, che possiede un moto apparente di rotazione, detto **moto diurno**, dovuto in realtà alla rotazione della Terra.

Per ogni osservatore (**O**) la visibilità dei corpi celesti risulta limitata dall'**orizzonte**, definito come il piano passante per il centro della sfera celeste e perpendicolare alla verticale del luogo.

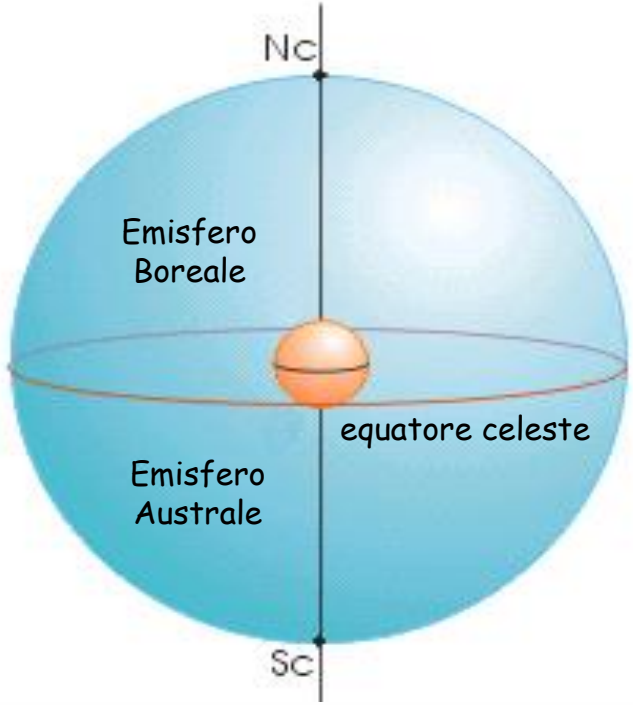


La **Sfera Celeste** non ha nessuna realtà fisica, è solo un'illusione dovuta al fatto che non siamo in grado, oltre un certo limite, di valutare visivamente la diversa distanza dei corpi celesti.

Gli oggetti visibili in ogni istante sulla Sfera Celeste dipendono dalle coordinate geografiche dell'osservatore e cambiano nel tempo a causa della rotazione della Terra.

Inoltre, per una data posizione sulla Terra e per una data ora, gli oggetti visibili cambiano nel corso dell'anno a causa del moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole.

Infine, su tempi scala molto lunghi, gli oggetti visibili possono cambiare a causa del "moto di precessione" dell'asse terrestre e del "moto proprio" delle stelle

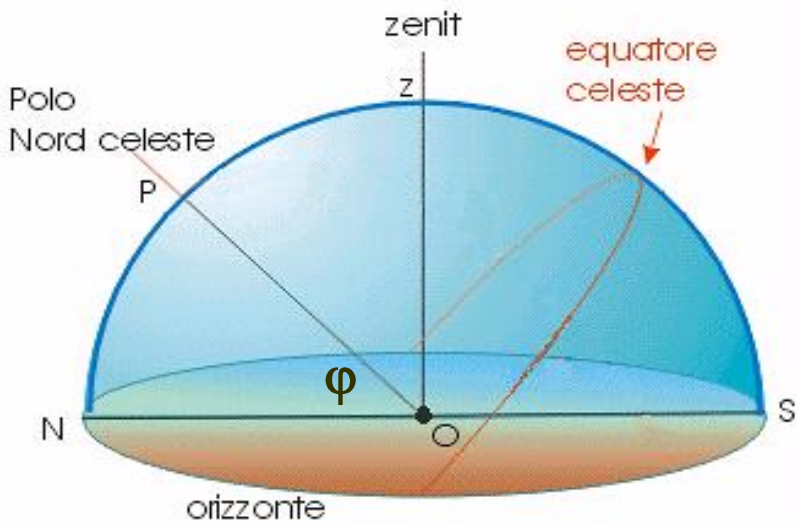


Il prolungamento dell'asse terrestre incontra la Sfera Celeste in due punti: il **Polo Nord** (Nc) e il **Polo Sud** (Sc) celesti.

La Sfera Celeste sembra ruotare su sé stessa attorno a un asse, chiamato "asse celeste" o "asse del mondo" passante per entrambi i poli. I Poli Celesti sono gli unici due punti della Sfera Celeste che restano immobili durante il moto diurno.

Il piano dell'equatore terrestre interseca la sfera celeste definendo **l'equatore celeste** e gli emisferi **boreale** (che contiene il polo nord) e **australe** (che contiene il polo sud).

In generale, da una qualunque posizione sulla Terra, solo uno dei poli celesti risulta visibile; la sua posizione nel cielo dipende unicamente dalla **latitudine** (φ) dell'osservatore. Nell'emisfero Boreale risulta visibile il Polo Nord celeste, la cui distanza dall'orizzonte cresce all'aumentare della latitudine del luogo di osservazione

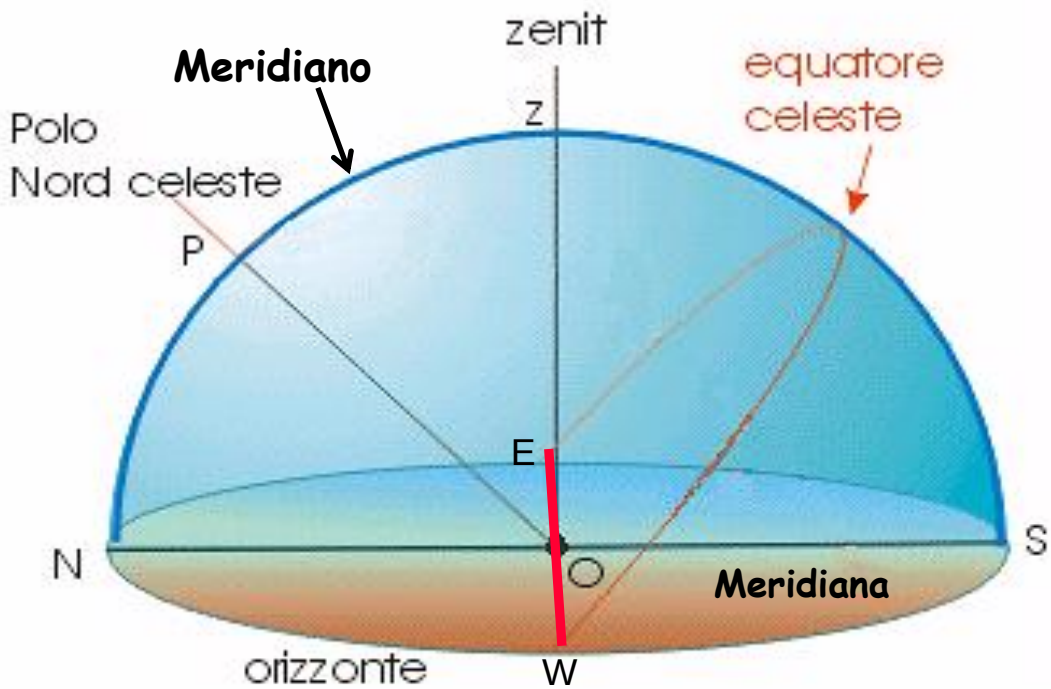


Le intersezioni della verticale nel luogo di osservazione (definita dalla direzione del filo a piombo) con la Sfera Celeste sono dette:

Zenit (quella visibile all'osservatore)

Nadir (quella non visibile all'osservatore)

Solo all'equatore entrambi i poli della Sfera Celeste risultano osservabili (entrambi all'orizzonte). Al Polo Nord e al Polo Sud il polo celeste coincide con lo Zenit.



In una sfera un **cerchio massimo** è un cerchio individuato dall'intersezione della superfice della sfera con un piano che passa per il suo centro.

Il percorso più breve tra due punti posti sulla superfice di una sfera è l'arco di cerchio massimo che si ottiene dall'intersezione tra la sfera e il piano passante per i due punti e il centro della sfera.

Il "cerchio massimo" passante per i due poli celesti lo Zenit e il Nadir viene detto **"Meridiano Celeste"** (o "Meridiano del luogo" o più semplicemente "**Meridiano**")

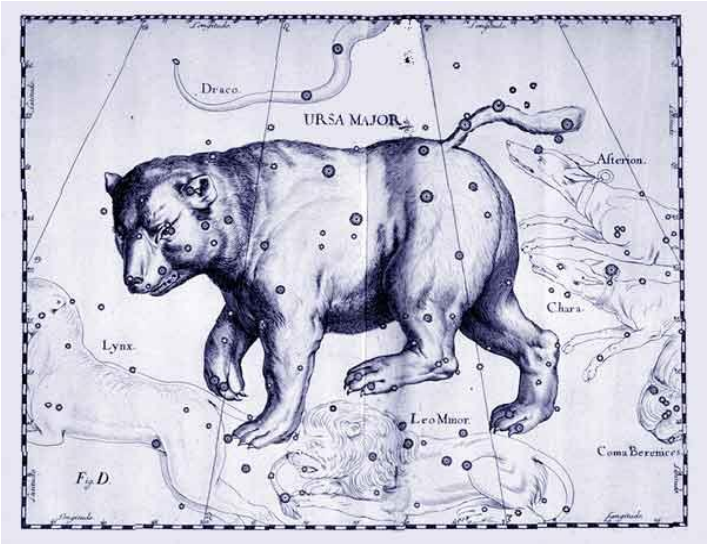
L'intersezione del piano del Meridiano Celeste con il piano dell'Orizzonte viene detta **Meridiana**

L'intersezione del Meridiano Celeste (o della Meridiana) con l'Orizzonte definisce i **punti cardinali Nord** (N) e **Sud** (S)

L'intersezione con l'Orizzonte della perpendicolare alla Meridiana passante per l'osservatore definisce i **punti cardinali Est** (E) e **Ovest** (W)

I punti cardinali E e W coincidono con l'intersezione tra l'equatore celeste (anch'esso un cerchio massimo che, per costruzione, risulta equidistante dai poli celesti) e l'orizzonte.

Le costellazioni



Fin dall'antichità gli astronomi hanno associato tra di loro le stelle visibili sulla sfera celeste formando le **costellazioni**. Oggi l'**IAU** (Unione Astronomica Internazionale) riconosce 88 costellazioni e ogni punto del cielo appartiene a una sola di esse. Molto spesso il nome delle costellazioni si abbrevia con tre lettere partendo dal nome in latino, con in maiuscolo la prima lettera più la seconda se il nome della costellazione è composto: Orsa Maggiore = Ursa Maior = UMa, Cane Maggiore = Canis Maior = CMa, Vergine = Virgo =Vir, Cefeo = Cepheus = Cep

Le costellazioni visibili dalle latitudini settentrionali sono basate principalmente sulla tradizione ellenistica (anche se la loro origine è parecchio più antica) e i loro nomi richiamano quasi sempre figure mitologiche (Pegaso, Andromeda, Orione, Chioma di Berenice)

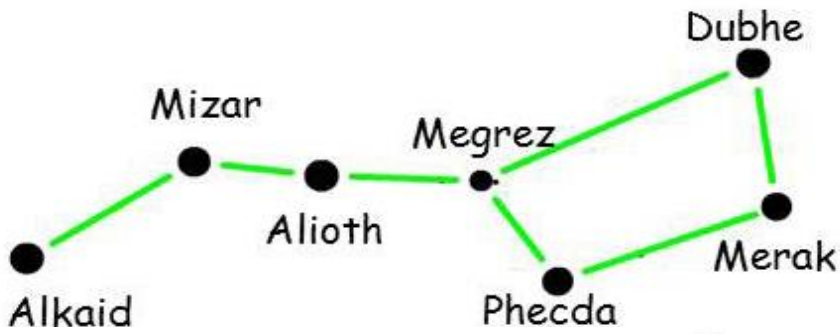
Gran parte delle costellazioni visibili nell'emisfero australe sono state formate in epoca illuministica e i loro nomi sono spesso legati a invenzioni del tempo (Orologio, Microscopio, Compasso, Macchina Pneumatica).

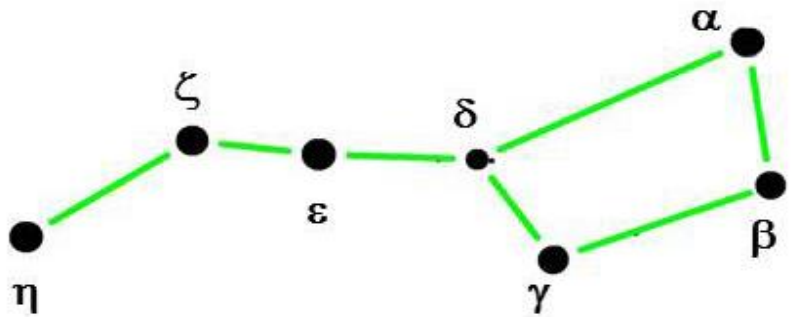
Nel suo cammino apparente lungo la sfera celeste (l'eclittica) il Sole attraversa nel corso dell'anno 13 costellazioni dette dello **zodiaco** (Ariete, Toro, Gemelli, Cancro, Leone, Vergine, Bilancia, Scorpione, Ofiuco, Sagittario, Capricorno, Acquario, Pesci). Le costellazioni zodiacali non vanno confuse con i "segni" usati dall'astrologia. Le costellazioni sono legate al cielo "reale" e hanno forma e dimensioni irregolari. I "segni" sono una suddivisione arbitraria dell'eclittica in 12 parti uguali e nulla hanno a che vedere con le stelle, anche a causa della "precessione degli equinozi". Ad esempio nella nostra epoca il 21 Marzo, equinozio di primavera, il Sole si trova nella costellazione dei Pesci

Gli "Asterismi" sono raggruppamenti di stelle di costellazioni diverse o parti di una costellazione. Tra i più famosi il "Triangolo Estivo", formato dalle stelle Vega, Deneb e Altair e il "Grande Carro", formato dalle sette stelle più luminose dell'Orsa Maggiore

I nomi delle stelle

Le stelle più luminose visibili a occhio nudo hanno tutte nomi propri di origine greca o araba (Sirio, Betelgeuse, Capella, Vega, Regolo). Ad esempio i nomi delle sette stelle più luminose dell'Orsa Maggiore sono: Alkaid, Mizar, Alioth, Megrez, Phecda, Merak, Dubhe.





Recentemente sono state introdotte nuove classificazioni (che hanno in gran parte dei casi, sostituito quelle più antiche) che assegnano dei nomi, quasi sempre dei codici seguiti da un numero, anche a un gran numero di stelle non visibili a occhio nudo.

Nomenclatura di Bayer: a parte pochissime eccezioni, la stella più luminosa di una costellazione è chiamata "α" più il genitivo del nome latino della costellazione (α Ursae Majoris = α UMa), la seconda stella più luminosa è detta β, la terza γ e così via

Nomenclatura di Flamsteed: le stelle di una costellazione sono numerate progressivamente da Ovest a Est più il genitivo del nome della costellazione (ad esempio: 51 Pegasi = 51 Peg, 61 Cygni = 61 Cyg).

Nei cataloghi più moderni le stelle sono elencate con criteri che fanno riferimento alle loro coordinate. Per esempio il catalogo Henry Draper (HD) elenca le stelle da Ovest a Est, senza riferimento alle costellazioni, da HD 1 a HD 359 083. Ogni stella può avere ovviamente nomi diversi in cataloghi diversi: Sirio = α CMa = 9 CMa = HD 48915 = SAO 151881 = HIP 32349

Le stelle più luminose

	Nome	Catalogo Bayer	m_V	V	B	D (al)
1	Sirio	α CMa	-1.46			8.58
2	Canopo	α Car	-0.74			310
3	Rigil Kent	α Cen	-0.27	x	x	4.35
4	Arturo	α Boo	-0.05			37
5	Vega	α Cyr	0.03	x		25
6	Capella	α Aur	0.08	x	x	42
7	Rigel	β Ori	0.13	x		860
8	Procione	α CMi	0.34			11
9	Achernar	α Eri	0.46	x		140
10	Betelgeuse	α Ori	0.50	x		640
11	Agena	β Cen	0.61			390
12	Altarir	α Aql	0.76			17
13	Acrux	α Cru	0.76	x		320
14	Aldebaran	α Tau	0.86	x		65
15	Antares	α Sco	0.96	x		600
16	Spica	α Vir	0.97	x		260
17	Polluce	β Gem	1.14			34
18	Fomalhaut	α PsA	1.16			25
19	Deneb	α Cyg	1.25	x		2600
20	Mimosa	β Cru	1.25	x		350
21	Regolo	α Leo	1.39			77
22	Adhara	ε CMa	1.50			430
23	Shaula	λ Sco	1.62			700
24	Castore	α Gem	1.62		x	52
25	Gacrux	γ Cru	1.64			88

Nella tabella a sinistra sono riportate alcune informazioni sulle 25 stelle più luminose del cielo.

Oltre al nome proprio è riportata la classificazione di Bayer, la magnitudine apparente visuale e la distanza in anni luce

La presenza di variabilità fotometrica è indicata nella colonna "V"

La presenza di una compagna visuale è riportata della colonna "B". In questo caso la magnitudine si riferisce alla combinazione delle due componenti

La stella Vega è stata in origine usata per fissare il sistema di magnitudini, successivamente si è scoperta una sua variabilità fotometrica

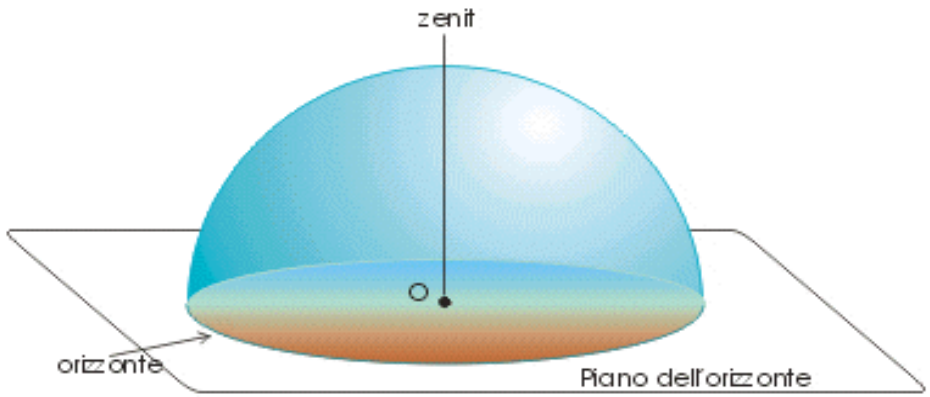
La stella più luminosa del cielo è Sirio, mentre la stella più luminosa dell'emisfero nord del cielo è Arturo

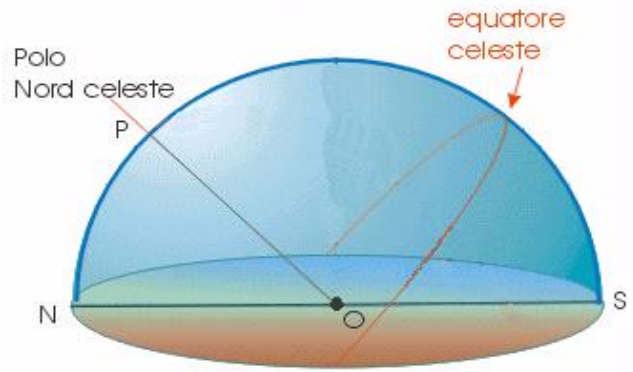
Le coordinate astronomiche

Definiscono le posizioni degli oggetti astronomici sulla Sfera Celeste
Si basano sulla definizione di:

- un **asse** chiamato **direzione fondamentale**
- un **piano fondamentale** perpendicolare alla direzione fondamentale

I **sistemi di coordinate** più utilizzati sono:
Altazimutale; Equatoriale / Orarie; Eclittiche; Galattiche





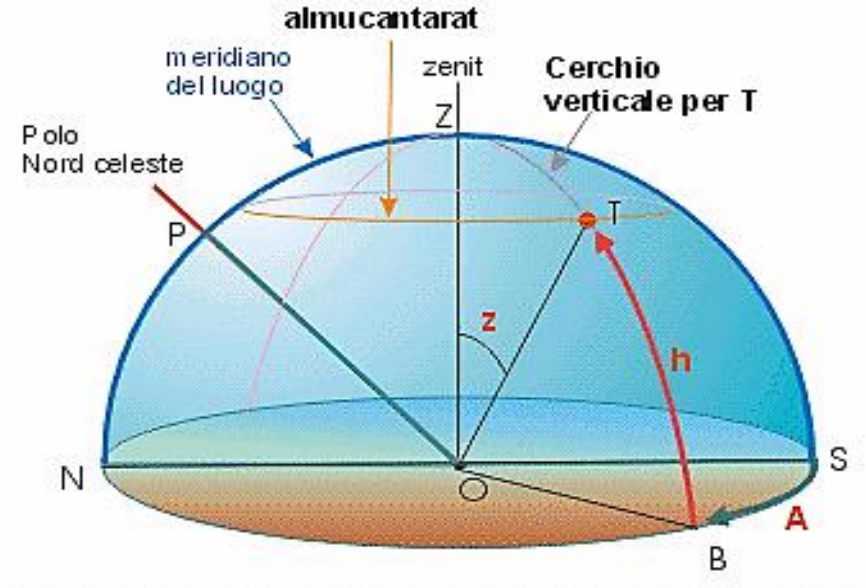
Coordinate Altazimutali.
La direzione fondamentale è la **verticale del luogo di osservazione;** il piano fondamentale è l'**orizzonte astronomico**

Le coordinate sono l'**Azimuth** (**A**) e l'**Altezza** (**h**). Le coordinate Altazimutali sono anche dette coordinate orizzontali

Coordinate Equatoriali.
La direzione fondamentale è l'**asse di rotazione della Terra; il** piano fondamentale è l' **equatore celeste**

Le coordinate sono l'**Ascensione Retta** (α) e la **Declinazione** (δ). Il Sistema Orario è una variante di quello equatoriale

Sistema Altazimutale



I **cerchi verticali** sono i cerchi massimi passanti per lo Zenit e il Nadir

Azimut (A): è l'arco di Orizzonte tra il punto Sud e il cerchio verticale passante per l'astro (T); è misurato in senso orario ed è compreso tra 0° e 360°

Altezza (h): è l'arco di cerchio verticale compreso fra l'Orizzonte e l'astro; si conta da 0 a +90° verso lo Zenit e da 0 a -90° verso il Nadir

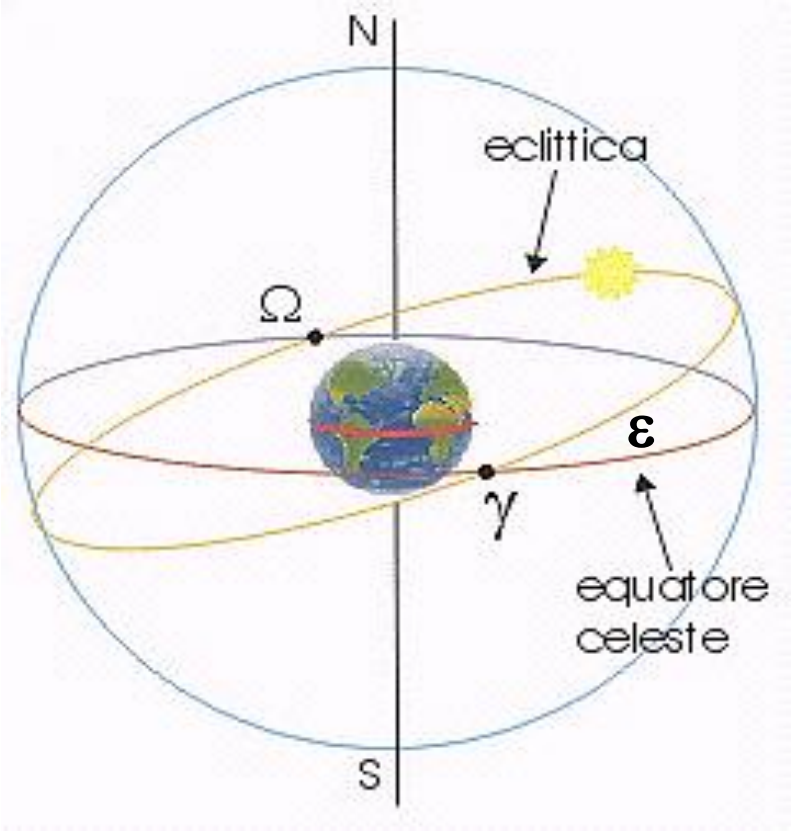
La **Distanza Zenitale**: z = 90 – h è la distanza dell'astro dallo Zenit ed è compresa tra 0° e 180°; vale sempre la relazione z + h = 90°

Nell'emisfero boreale il **valore massimo dell'Altezza** di un corpo celeste si ha quando, a causa del moto diurno, il corpo transita al **meridiano in direzione Sud** (culminazione superiore), il **valore minimo dell'Altezza** si ha quando il corpo transita al **meridiano in direzione Nord** (culminazione inferiore).

I cerchi minori formati dai punti sulla sfera celeste che hanno uguale altezza (ovvero uguale distanza zenitale) sono detti "cerchi di altezza" o **"almucantarat"**

Le coordinate Altazimutali sono facili da misurare, ma sono relative all'osservatore, in quanto dipendono da parametri (Orizzonte, Zenit e Meridiano) tipici della località di osservazione. A causa del moto diurno, le stelle descrivono archi di cerchio che, in generale, non sono paralleli all'orizzonte; quindi i valori delle due coordinate variano continuamente nel tempo e in modo non uniforme.

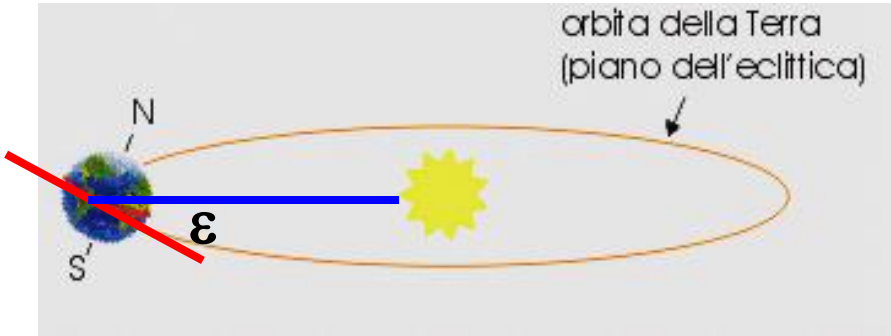
Eclittica



L'eclittica è il percorso apparente del Sole rispetto alle stelle sulla Sfera Celeste.

L'eclittica interseca l'equatore celeste in due punti (nodi) chiamati: **Punto di Ariete** (o **Punto "γ" o Punto Vernale**) e **Punto della Bilancia** (o **Punto Ω**)

Il Sole passa per il Punto γ all'equinozio di Primavera e per il Punto della Bilancia all'equinozio d'Autunno

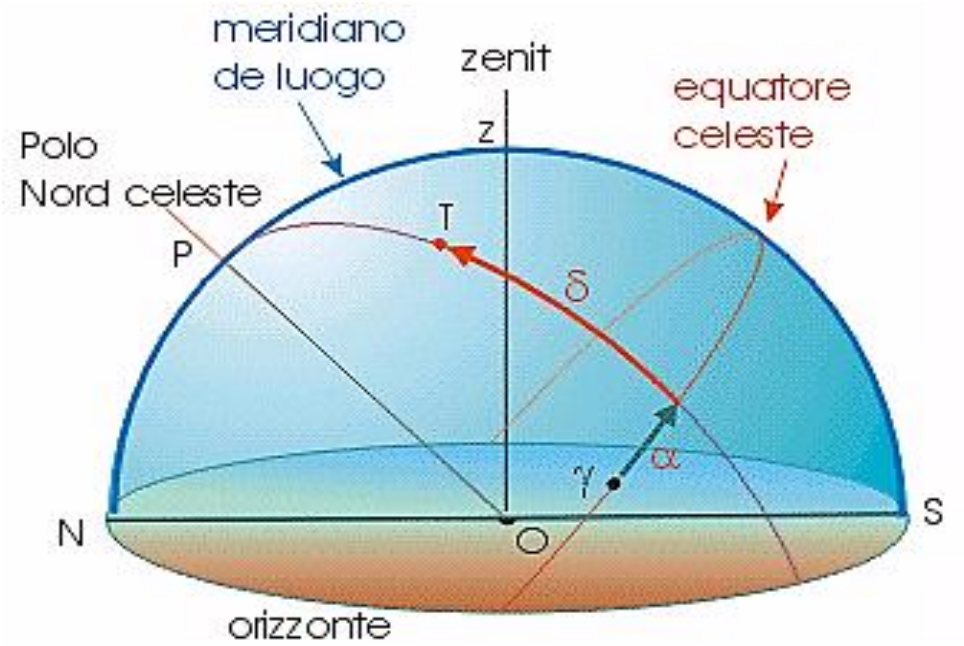


L'eclittica non coincide con l'equatore celeste perché il piano dell'equatore terrestre è inclinato rispetto a quello dell'orbita della Terra; l'angolo tra i due piani è chiamato obliquità (ε) dell'eclittica.

Attualmente si ha: ε = 23° 26'

Il valore dell'obliquità oscilla ciclicamente tra circa 22°.5 e 24°.5, con un periodo dell'ordine di 41000 anni. Nell'epoca attuale l'obliquità decresce di circa 47".11 /secolo

Sistema Equatoriale



I **cerchi orari** (o cerchi meridiani) sono i cerchi massimi passanti per i poli; i **paralleli celesti** sono i cerchi minori paralleli all'equatore celeste.

Ascensione retta (α): è l'arco di equatore celeste tra il Punto γ e il cerchio orario passante per l'astro (T); viene misurata in senso antiorario ed è compresa tra 0h e 24h

Declinazione (δ): è l'arco di cerchio orario compreso fra l'equatore celeste e l'astro; si conta dall'equatore da 0 a 90° per l'emisfero Boreale e da o a -90° per l'emisfero Australe

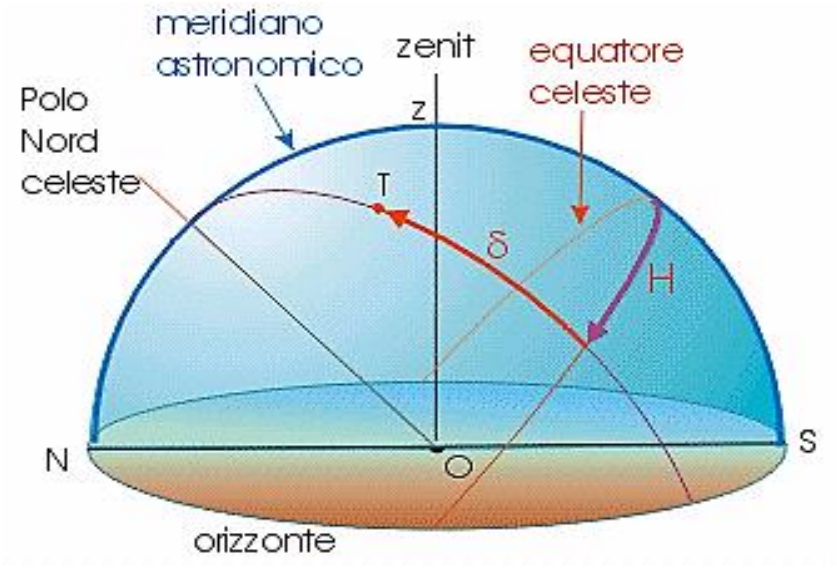
E' il sistema di coordinate più utilizzato

Il grande vantaggio rispetto alle coordinate altazimutali è che i valori di α e δ risultano completamente svincolati dalla posizione dell'osservatore e rimangono inoltre costanti (vedremo poi entro quali limiti) nel tempo, in quanto l'intero sistema di riferimento è definito a partire da un punto della sfera celeste (il Punto γ) che partecipa al moto diurno.

La **distanza polare** (p), è la distanza angolare di un astro dal polo nord celeste e varia da 0° a 180°. Vale la relazione: $p + \delta = 90°$.

Per trasformare le misure di ascensione retta in angoli basta ricordare che: 24 h = 360°, quindi valgono le relazioni: 1 h = 15° - 4 m = 1° - 1 m = 15' - 4 s = 1' - 1 s = 15"

Sistema Orario

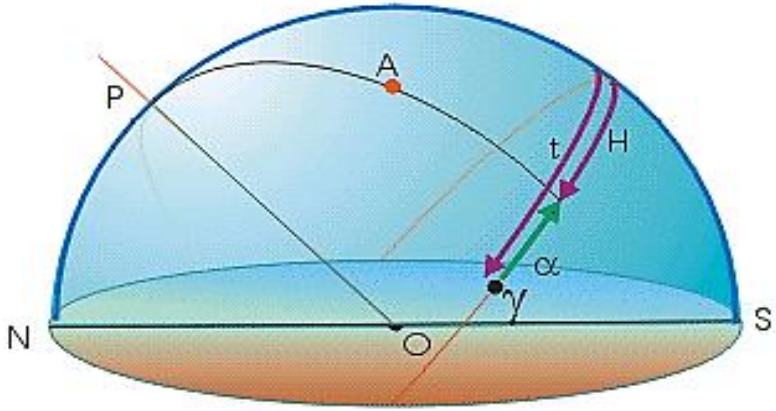


Angolo Orario (**H**): è la distanza angolare tra il cerchio orario che passa per l'astro (T) e il Meridiano; viene misurato in senso orario ed è compreso tra 0h e 24h

Declinazione (δ): è definita come per il sistema equatoriale.

Questo sistema non partecipa al moto diurno; **H** dipende dalla posizione dell'osservatore e fornisce indicazioni sulla visibilità di un astro. Quando un astro nel corso del moto diurno passa al meridiano in direzione sud si ha H = 0 (altezza sull'orizzonte massima), quando passa al meridiano in direzione nord si ha H = 12 (altezza sull'orizzonte minima).

Angolo Orario e Tempo Siderale



Il **Tempo Siderale** (t) è definito come l' angolo orario del Punto γ. Conoscendo l'ascensione retta (α) di un astro (A) e misurando il suo angolo orario (H), si può determinare il tempo siderale dalla relazione:

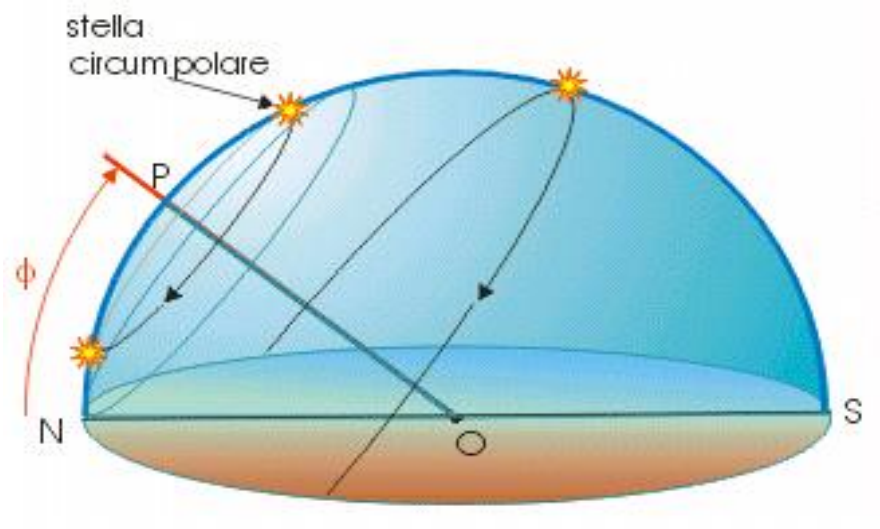
$$t = \alpha + H$$

Normalmente **t** è noto ed è usato per calcolare l'angolo orario di un astro di cui si conosce α.

$$H = t - \alpha$$

Quando una stella passa al meridiano in direzione sud H = 0, per cui: t = α ; quindi a ogni istante passano al meridiano in direzione sud le stelle che hanno ascensione retta pari al tempo siderale in quell'istante

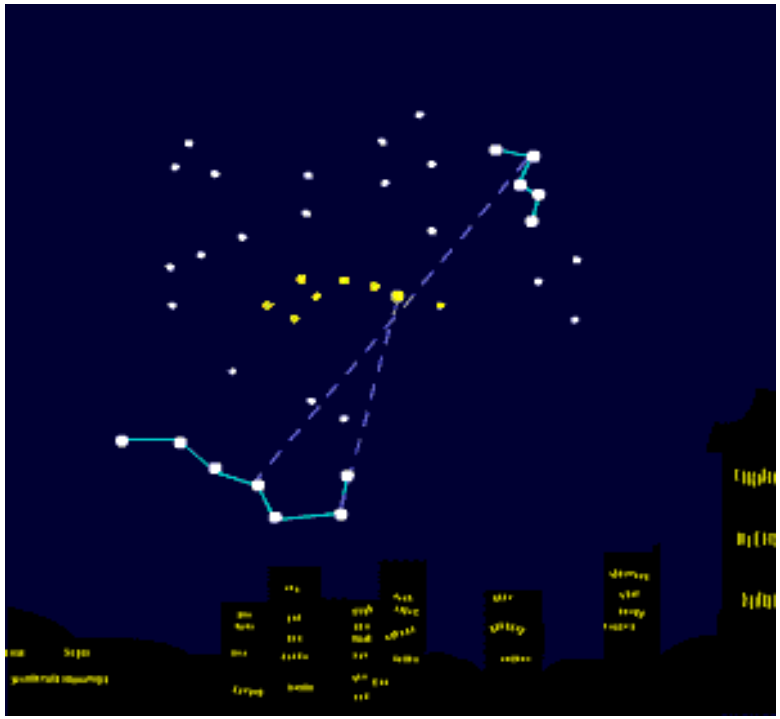
Visibilità delle stelle



Una stella si dice **circumpolare** se nel corso del moto diurno della sfera celeste non tramonta mai, (si avrà quindi sempre $h > 0$)

Le stelle che non sorgono mai sono dette **anti-circumpolari** (e avranno quindi sempre $h < 0$)

Le stelle che sorgono e tramontano sono dette **occidue** (e nel moto diurno avranno quindi sia $h < 0$ che $h > 0$) .

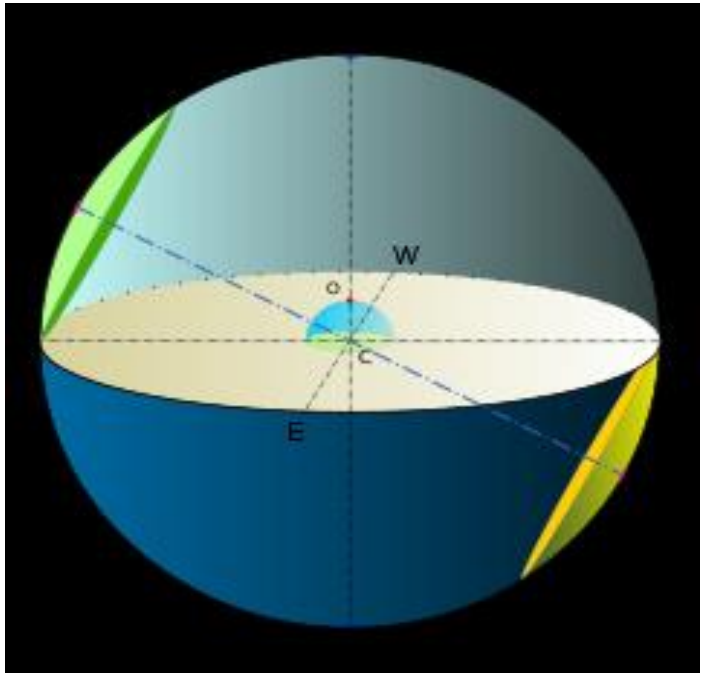


L'appartenenza di una data stella a una di queste categorie dipende dalla declinazione (δ) della stella e dalla posizione dell'osservatore

Poiché l'altezza sull'orizzonte del Polo Celeste è pari alla latitudine (φ), in un dato luogo nell'emisfero Nord saranno **circumpolari** le stelle con declinazione:

$$\delta > 90 - \varphi$$

A Catania (φ = 37° 31') risulteranno circumpolari tutte le stelle con δ > 52° 29'



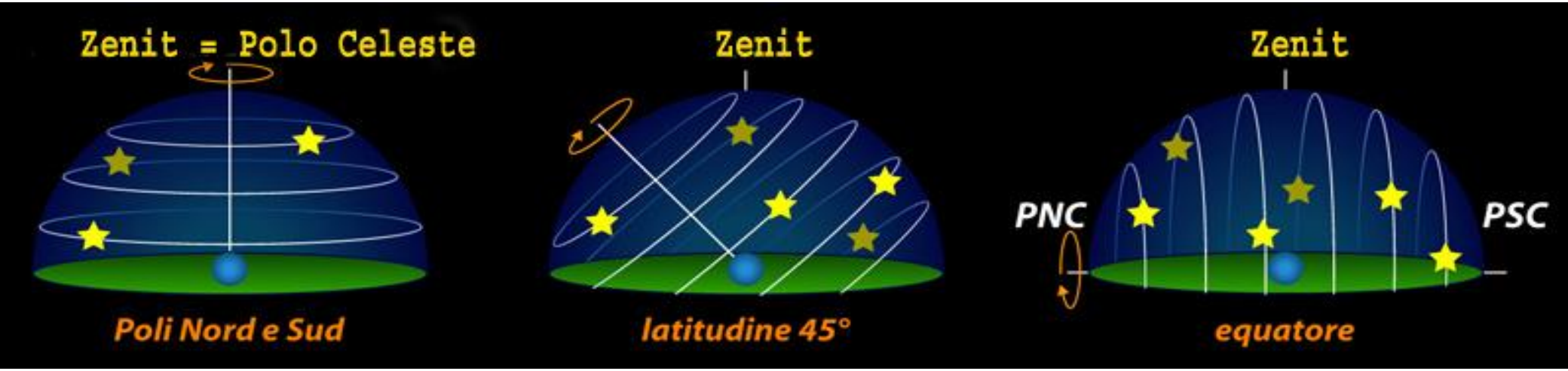
Affinché una stella risulti **visibile** (anche solo per un breve periodo) nel corso del moto diurno occorre che:

$$\delta > \varphi - 90$$

A Catania saranno visibili le stelle con $\delta > -52° 29'$, mentre saranno anti-circumpolari le stelle con $\delta < -52° 29'$

In ogni località avremo quindi stelle sempre osservabili (quelle più vicine al polo celeste visibile), stelle mai osservabili (quelle più vicine al polo celeste non visibile) e stelle che sorgono e tramontano (occidue). Dalle relazioni precedenti si ricava che in una data località una stella è occidua se:

$$90 - \varphi > \delta > \varphi - 90$$



Al polo Nord solo le stelle con $\delta > 0°$ sono visibili; tutte le stelle visibili sono anche circumpolari

In una generica località a latitudine φ se:

$\delta > 90 - \varphi$ = circumpolare

$\delta > \varphi - 90$ = visibile

All'equatore tutte le stelle sono visibili, ma non ci sono stelle circumpolari

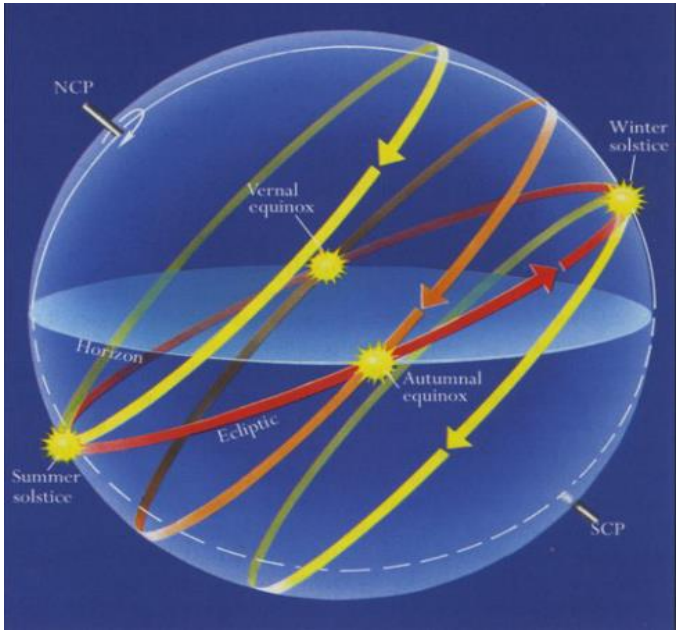
Il moto annuo del Sole

Si svolge lungo l'eclittica ed è un moto apparente dovuto al moto di rivoluzione della Terra. Poiché attualmente l'eclittica forma con l'equatore celeste un angolo ε = 23° 26′, nel corso di un anno la declinazione del Sole varia da un minimo di $\delta_{\odot minima}$ = -23° 26′ a un massimo di $\delta_{\odot massima}$ = + 23° 26′, risultando zero agli equinozi:
:

$\delta_{\odot equinozi}$ = 0° (21 Marzo, 23 Settembre)

$\delta_{\odot solstizio\ d'estate}$ = + 23° 26′ (21 Giugno)

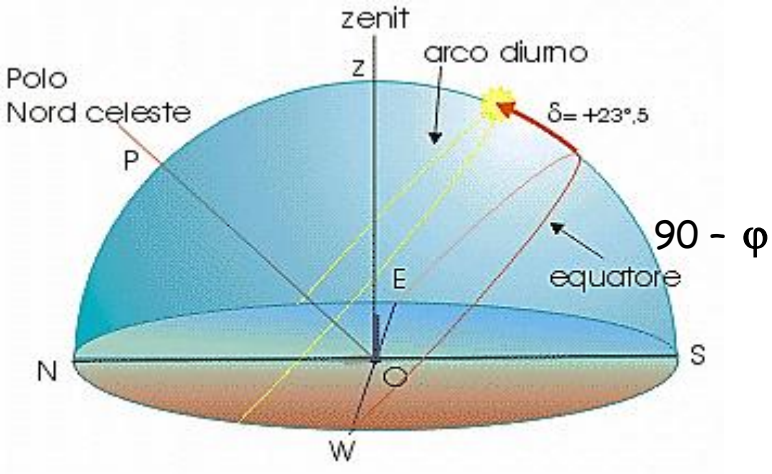
$\delta_{\odot solstizio\ d'inverno}$ = - 23° 26′ (22 Dicembre)



Agli equinozi il Sole si trova sul piano dell'equatore celeste, la durata del giorno è uguale a quella della notte su tutto il pianeta.

Nell'emisfero boreale al solstizio d'estate avremo il giorno più lungo, al solstizio d'inverno il giorno più corto. Le stagioni risultano invertite nell'emisfero Australe.

La figura a sinistra mostra il moto apparente del Sole ai solstizi (linee gialle) e agli equinozi (linea arancione) per un osservatore posto a una latitudine di 45°



Visibilità del Sole e dei pianeti

Per un osservatore posto a latitudine φ l'altezza massima dell'equatore celeste si ha al meridiano e vale:

$h_{M_equatore} = 90 - \varphi$

Quindi, a causa del suo moto sull'eclittica, nel corso di un anno in un luogo a latitudine φ posto nell'emisfero Nord, l'altezza massima del Sole sull'orizzonte, ovvero al momento del transito al meridiano in direzione sud ($h_{M\odot}$) varierà tra:

$$h_{M\odot max} = 90 - \varphi + 23° 26'$$

$$h_{M\odot min} = 90 - \varphi - 23° 26'$$

Avremo di conseguenza:	solstizio d'estate	solstizio d'inverno
Equatore (φ = 0)	$h_{M\odot max}$ = 113° 26'	$h_{M\odot min}$ = 66° 34'
Tropico del Cancro (φ = 23° 26')	$h_{M\odot max}$ = 90°	$h_{M\odot min}$ = 43° 8'
Catania (φ = 37° 31')	$h_{M\odot max}$ = 75° 55'	$h_{M\odot min}$ = 29° 3'
Polo Nord (φ = 90°)	$h_{M\odot max}$ = 23° 26'	$h_{M\odot min}$ = - 23° 26'

Quindi all'equatore al solstizio d'estate il Sole culmina oltre lo zenith (vedere nota pagina successiva); di fatto il Sole resta per più tempo in prossimità dello zenith ai tropici. Ai poli il Sole rimane al di sotto dell'orizzonte, risultando quindi invisibile, per tutto il tempo in cui la sua declinazione è negativa.

L'altezza massima al meridiano di un dato luogo di un pianeta o della Luna, si può calcolare con le stesse relazioni usate per il Sole, aggiungendo o sottraendo l'inclinazione della sua orbita rispetto all'eclittica.

Alcune relazioni utili

Nelle seguenti relazioni φ è la latitudine di un osservatore nell'emisfero boreale, δ la declinazione di un corpo celeste, $\mathbf{h_{max}}$ l'altezza massima del corpo sull'orizzonte (passaggio al meridiano in direzione sud), $\mathbf{h_{min}}$ l'altezza minima del corpo sull'orizzonte (passaggio al meridiano in direzione nord).

- Altezza dell'equatore celeste al meridiano in direzione sud: $\mathbf{h_{max_equatore} = 90 - \varphi}$

- Relazione tra latitudine dell'osservatore e altezza del polo celeste: $\varphi = \mathbf{h_{Polo}}$ $(= 90 - z_{polo})$

- Altezza massima di una stella: $\mathbf{h_{max}} = 90° \pm (\varphi - \delta)$

se $\varphi > \delta$ la stella culmina più a sud dello zenith e si avrà: $\mathbf{h_{max}} = 90° - \varphi + \delta$

se $\varphi < \delta$ la stella culmina più a nord dello zenith e l'altezza viene contata a partire dal punto cardinale nord: $\mathbf{h_{max}} = 90° + \varphi - \delta$

Nota: se il Sole culmina oltre lo zenith la sua altezza massima va contata dal punto cardinale nord; in particolare per un osservatore all'equatore al solstizio d'estate si ha: $h_{\odot max_solstizio_estate} = 66° 34'$

- Altezza minima di una stella: $\mathbf{h_{min}} = -90° + \varphi + \delta$

- Se una stella culmina a nord dello zenith (come tutte le stelle circumpolari) vale la relazione: $\varphi = \frac{h_{max} + h_{min}}{2}$

- Se una stella culmina a sud dello zenith vale la relazione: $\delta = \frac{h_{max} + h_{min}}{2}$

A causa dell'inclinazione dell'eclittica sull'equatore celeste, la declinazione del Sole varia in modo non uniforme nel corso dell'anno; una buona approssimazione è data dalla relazione: $\delta_{\odot} = 23° 26' \cdot sen\left(360° \frac{N+284}{365}\right)$

dove **N** è il numero di giorni trascorsi dall'inizio dell'anno, dato da (M = mese dell'anno, D = giorno del mese):

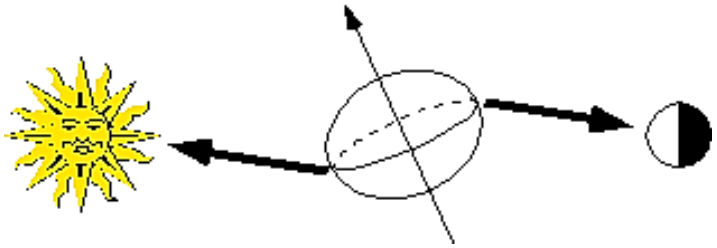
$N = int\left(\frac{275 \cdot M}{9}\right) - 2\, int\left(\frac{M+9}{12}\right) + D - 30$ per gli anni ordinari

$N = int\left(\frac{275 \cdot M}{9}\right) - int\left(\frac{M+9}{12}\right) + D - 30$ per gli anni bisestili

Variazione delle Coordinate: Sistema Equatoriale

Nel sistema equatoriale le coordinate α e δ di un dato oggetto astronomico risultano indipendenti dalla posizione dell'osservatore e dovrebbero quindi rimanere costanti nel tempo. Le osservazioni mostrano invece numerosi effetti, che possono dipendere anche dall'oggetto osservato, che alterano in modo ciclico o continuo il valore di α e δ:

- Parallasse Diurna (causata dalla rotazione della Terra),
- Parallasse Annua (causata dalla rivoluzione della Terra),
- Aberrazione della luce (causata dalla rivoluzione della Terra),
- Precessione (causata dal moto dell'asse della Terra)
- Rifrazione (causata dall'atmosfera della Terra),
- Moti propri delle stelle.



La Precessione

La **precessione degli equinozi** è dovuta un movimento della Terra che fa cambiare in modo lento, ma continuo, l'orientamento del suo asse di rotazione rispetto alla sfera celeste.

Se la Terra fosse una sfera perfetta il suo asse di rotazione non subirebbe effetti perturbativi dovuti alle forze gravitazionali dei corpi vicini; ma la Terra ha la forma di un ellissoide appiattito e le forze gravitazionali del Sole e della Luna agiscono sulla "sporgenza equatoriale" cercando di riportarla sul piano dell'eclittica.

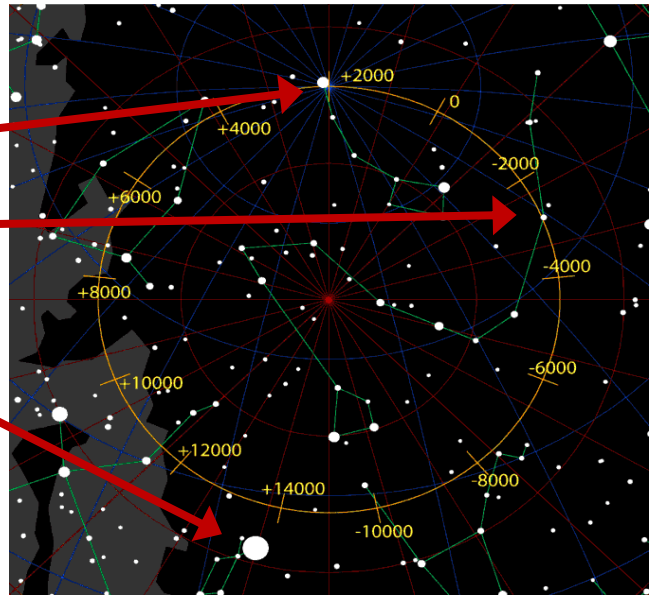
Il risultato è che l'asse terrestre subisce una rotazione attorno alla verticale (simile a quella di una trottola) detta **precessione**. La precessione fu scoperta da Ipparco nell'anno 130 a.C., confrontando le sue osservazioni con quelle fatte nel 290 a.C. dagli astronomi di Alessandria d'Egitto.

Il moto di precessione fa compiere alla direzione dell'asse di rotazione della Terra un giro completo in circa 25780 anni (detto anno platonico); a causa della precessione la posizione delle stelle sulla sfera celeste cambia lentamente, ma in modo continuo

Il polo della sfera celeste si muove lungo un cerchio:
Attualmente si trova a meno di 1° dalla **Stella Polare** (α UMi)

Nel 3000 a.C. era prossimo a **Thuban** (α Dra)

In futuro a stella più brillante che assumerà il ruolo di polare, tra circa 12000 anni, sarà **Vega** (α Lyr)



A causa della precessione le posizioni del Punto γ (da cui vengono misurate le coordinate equatoriali) e del Punto della Bilancia si spostano lungo l'eclittica di circa 50".3/anno

A causa della precessione in circa 70 anni ogni equinozio anticipa di 1 giorno. Come vedremo tener conto di questa differenza è importante nella compilazione di calendari e nelle regole per stabilire gli anni bisestili.

Gli astronomi devono quindi conoscere l'**epoca** a cui le coordinate di un oggetto vengono riferite. Durante la maggior parte del XX secolo è stata usata l'epoca 1950.0, mentre oggi si usa l'epoca 2000.0 (a volte abbreviata in J2000), che indica le coordinate di un oggetto all'1 gennaio 2000. Nei cataloghi si trovano le coordinate delle stelle e l'epoca a cui sono riferite. Per puntare correttamente i telescopi occorre applicare a detti valori un fattore correttivo, per tener conto della differenza tra l'epoca a cui è riferito il catalogo e la data in cui si effettuano le osservazioni.

Una buona approssimazione della variazione in un anno delle coordinate δ e α è:

$$\Delta\delta \simeq 50''.3 \cdot \text{sen}\ \varepsilon \cdot \cos\alpha \simeq 20''.0 \cdot \cos\alpha$$

$$\Delta\alpha \simeq 50''.3\,(\cos\varepsilon + \text{sen}\ \varepsilon \cdot \text{sen}\ \alpha \cdot \tan\delta) \simeq 46.2 + 20.0\,(\text{sen}\ \alpha \cdot \tan\delta)$$

Rifrazione e Depressione dell'Orizzonte

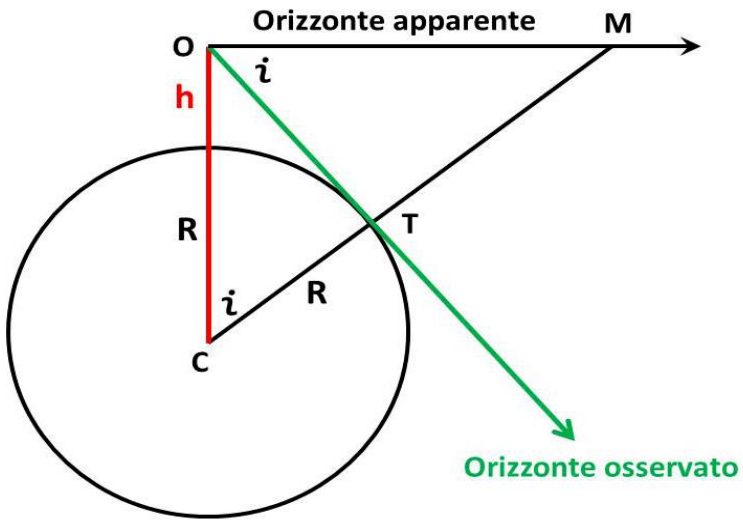
La rifrazione è un effetto dovuto all'atmosfera terrestre, che ha come risultato quello di mostrare gli oggetti celesti "più in alto" rispetto alla loro posizione vera.

In particolare la rifrazione "abbassa" la linea dell'orizzonte. Il valore della rifrazione dipende dalle condizioni atmosferiche (temperatura, pressione, ecc.) e può variare notevolmente da notte a notte. Il suo valore (**d**) è massimo all'orizzonte, dove vale in media circa 35′ (cioè poco più di mezzo grado), e si annulla allo zenit.

Altezza	Rifrazione (d)
0°	35′
5°	10′
10°	5′
20°	2′.5
45°	1′
60°	0′.5
90°	0′

Se l'osservatore è posto a un'altezza **h** dalla superfice si avrà inoltre una componente "geometrica" (**i**) che produce un'ulteriore abbassamento dell'orizzonte.

$$\mathbf{i} = \mathbf{arccos}\ \frac{R}{R+h}$$



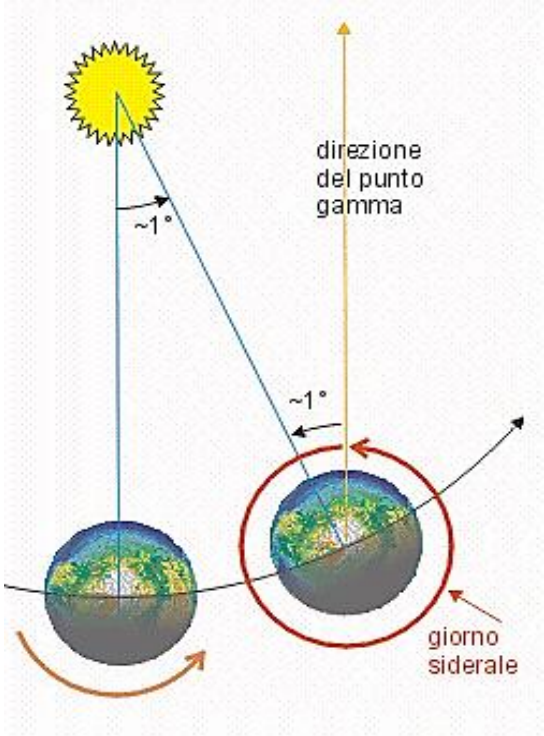
La "depressione dell'orizzonte" (D) è quindi un effetto dovuto sia all'atmosfera terrestre che alla quota dove si trova l'osservatore:

$$D = d + i \simeq 35' + i$$

Al crescere di **h** aumenta lo spessore di atmosfera che la luce deve attraversare per raggiungere l'osservatore, ma diminuisce anche la densità dell'aria; quindi l'approssimazione $d \simeq 35'$ all'orizzonte è quasi sempre utilizzabile

Giorno/Anno Solare e Giorno/Anno Siderale

Il **giorno** è l'intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi consecutivi al meridiano di un astro o di un punto della Sfera Celeste. Se l'astro è il **Sole** due suoi passaggi consecutivi al meridiano definiscono il **giorno solare vero**; se il riferimento è il **Punto** γ due suoi passaggi consecutivi al meridiano definiscono il **giorno siderale**.



Giorno siderale: è il tempo impiegato dalla Terra per una rotazione completa attorno al proprio asse, vale 23h 56m 4.1s ($\simeq 86164.1\,s$) ed è più breve del giorno solare. Ciò è dovuto al fatto che mentre ruota attorno a se stessa la Terra percorre anche un tratto della sua orbita attorno al Sole. Il risultato è il moto apparente del Sole rispetto alle stelle, in senso antiorario per un osservatore nell'emisfero boreale, a una velocità di poco meno di 1°/giorno.

Giorno solare medio: la lunghezza del giorno solare vero non è costante. Ciò è dovuto a due effetti, la velocità variabile con cui la Terra descrive la sua orbita e il fatto che vediamo il Sole muoversi sull'eclittica e non sull'equatore celeste. Ne segue che l'ascensione retta del Sole non varia in modo costante. Gli astronomi hanno quindi definito un corpo fittizio detto **Sole Medio**, che si muove lungo l'equatore celeste con velocità costante a partire dal quale vengono calcolati il **giorno solare medio** e il **tempo solare medio**. Un giorno solare medio ha una durata di 24h.

Si definisce **Anno Siderale** il periodo in cui la Terra completa una rivoluzione attorno al Sole misurata relativamente alle stelle. La sua durata è di 365,25636 giorni solari medi. Si definisce **Anno Tropico** il tempo fra due solstizi o due equinozi identici. La sua durata è di 365,24219 giorni solari medi.

L'**Anno Tropico** è più corto dell'**Anno Siderale** (di circa 0.01417 giorni $\cong$ 20.4 minuti) a causa del moto di precessione degli equinozi, che fa spostare il punto γ in direzione opposta al moto di rivoluzione della Terra di circa 50.3"/anno (ovvero di 1° in circa 71.6 anni).

Giorno solare e tempo solare

Il **Giorno Solare Medio** è definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi consecutivi al meridiano del **Sole Medio**. La sua durata è di 24 h (= 86400 s).

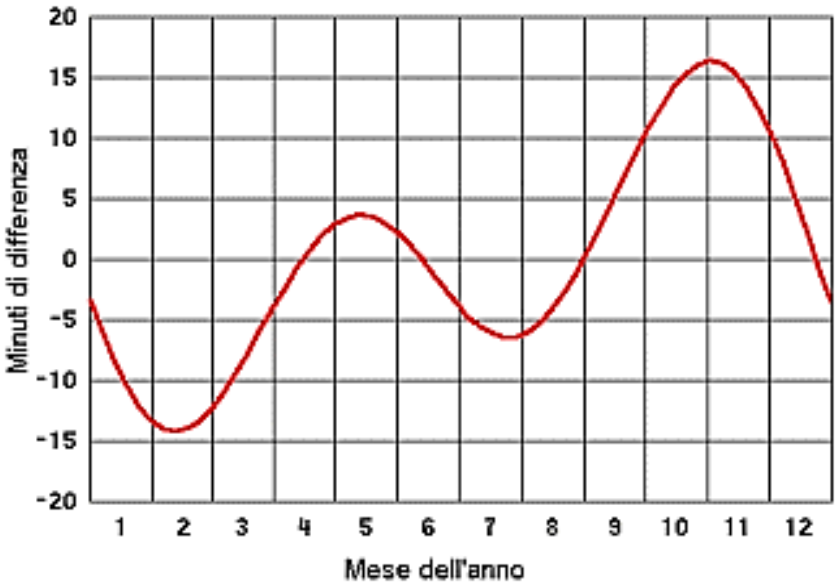
Il **Tempo Solare Medio** (T_M) è definito come l'angolo orario (h_M) del centro del Sole Medio aumentato di 12 ore, in modo che ogni giorno cominci alla mezzanotte

$$T_M = h_M + 12h$$

Il **Tempo Solare Vero** (T_V) è definito come l'angolo orario (h_V) del centro del Sole Vero più 12 ore. La differenza tra tempo solare vero e tempo solare medio è detta Equazione del Tempo (ET); valgono quindi le relazioni:

$$ET = T_V - T_M \qquad T_M = T_V - ET \qquad T_V = T_M + ET$$

Nel calcolo dell'equazione del tempo concorrono effetti dovuti all'eccentricità dell'orbita terrestre e all'inclinazione dell'eclittica sull'equatore celeste.



Il **Tempo Solare Medio** e il **Tempo Solare Vero** sono "tempi locali", poiché dipendono dall'angolo orario osservato per il Sole. In generale il loro valore non sarà in accordo con quello segnato dai nostri orologi.

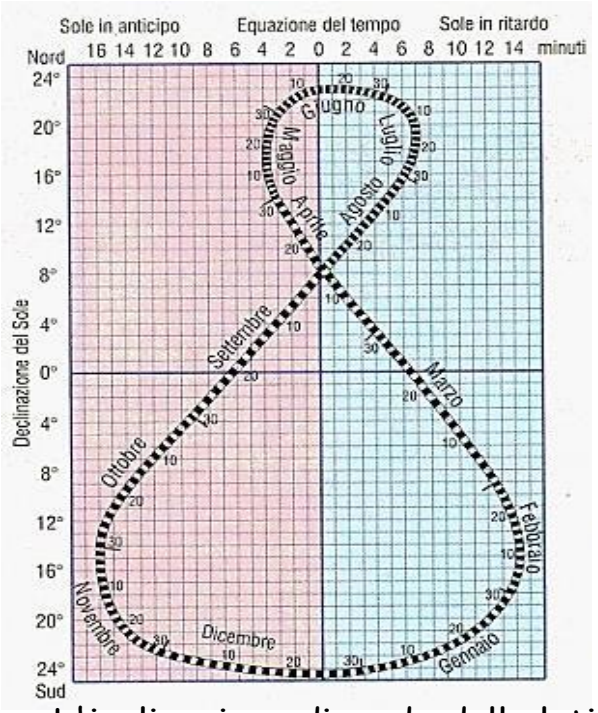
La superficie della Terra è divisa in 24 **fusi orari**. Il tempo segnato dai nostri orologi è il **Tempo Civile** (T_C), ovvero il tempo solare medio del meridiano centrale del fuso orario in cui ci troviamo.
La larghezza di un fuso orario è di 15°, e poiché 1° = 4 minuti, la differenza massima tra il Tempo Solare Medio e il Tempo Civile sarà quindi di $\pm$ 30 minuti

Per confrontare l'ora locale con quella del fuso orario, dobbiamo quindi tener conto del valore della longitudine (λ) a cui si trova l'osservatore, che una volta trasformata in tempo andrà sottratta se ci troviamo a est del meridiano centrale (il Sole passa al meridiano locale prima) e sommata se ci troviamo a ovest del meridiano centrale (il Sole passa al meridiano locale dopo). Infine, occorre ricordare che in buona parte dell'anno molti stati adottano l'ora legale, che aumenta di un'ora (ΔT) il tempo civile rispetto a quello solare. Valgono quindi le relazioni:

$$T_V = h_V + 12\,h = T_M + ET - \Delta T = T_C \pm \lambda + ET - \Delta T$$

$$T_M = T_C \pm \lambda - \Delta T$$

Analemma



Una visualizzazione degli effetti dovuti alla variabilità del moto apparente del Sole è **l'Analemma,** la figura che si ottiene riportando la posizione del Sole nei diversi giorni dell'anno alla stessa ora (tipicamente il mezzogiorno di tempo solare medio).

La coordinata verticale corrisponde a $\delta_\odot$ nelle varie date; la coordinata orizzontale (Sole "in anticipo" o "in ritardo" rispetto al Sole Medio) è dovuta alla diversa velocità con cui la Terra percorre la sua orbita.

L'inclinazione dipende dalla latitudine di osservazione. Si può ottenere l'Analemma sovrapponendo delle pose fatte alla stessa ora per un anno con la camera puntata nella stessa direzione.

Tempo Solare e Tempo Siderale

Dopo una rivoluzione completa della Terra attorno al Sole il numero di giorni siderali è pari al numero di giorni solari più uno. Si ha quindi: 365.25636 giorni solari = 366.25636 giorni siderali. da cui ricaviamo la durata del giorno siderale:

$$Giorno\ Siderale = 24h \cdot \frac{365.25636}{366.25636} = 24h \cdot 0.99726967 = 23h\ 56m\ 4.1s$$

La costante K $= \frac{365.25636}{366.25636} = 0.99726967$ permette di convertire gli intervalli di tempo siderale in intervalli di tempo solare medio

La costante H $= \frac{1}{K} = \frac{366.25636}{365.25636} = 1.00273780$ permette di convertire gli intervalli di tempo solare medio in intervalli di tempo siderale (ad esempio 24 ore di tempo solare = 24h 3m 56.5s di tempo siderale)

La differenza tra l'ora locale, solare o siderale, a due diverse longitudini (ΔT) misurata allo stesso istante è pari alla differenza di longitudine ($\Delta\lambda$) trasformata in tempo:

$$\Delta T = \frac{24\ h \cdot \Delta\lambda}{360}$$

Tempo Universale

L'ora locale è funzione della longitudine, ma gli astronomi hanno la necessità di riferire le loro osservazioni a un tempo comune.

Per risolvere questo problema è stato introdotto il **Tempo Universale (UT = GMT)**, definito come il tempo solare medio dell'Osservatorio di Greenwich (la cui longitudine è, per definizione, λ = 0°); tutte le osservazioni astronomiche sono riportate in UT. Il tempo solare medio in una data località a longitudine λ è legato al Tempo Universale dalla relazione: $T_m = UT \pm \lambda$ (con λ che ha segno positivo a est di Greenwich e segno negativo a ovest di Greenwich)

Il Calendario

Il calendario in uso in gran parte del mondo occidentale è di tipo solare e si basa sull'**Anno Tropico** (= 365,24219 giorni solari medi = 365 g, 5h, 48m, 45s). Un Anno tropico comprende un ciclo completo di stagioni. L'**Anno Civile** adotta invece un numero intero di giorni, 365, e deve quindi aggiunge periodicamente i giorni che si accumulano sommando la differenza con l'Anno Tropico.

Calendario Giuliano. Introdotto da Giulio Cesare nel 46 A.C.; un anno ha una durata di 365 giorni e ogni 4 anni si aggiunge un giorno (il 29 febbraio). Questa correzione è eccessiva (di 11 minuti e 14s) e l'equinozio rimane "indietro" rispetto all'Anno Tropico di 3 giorni ogni 400 anni.

Calendario Gregoriano. Introdotto nel 1582 da papa Gregorio XIII nel 1582 stabilendo che:

a) in quell'anno al 4 ottobre seguisse il 15 ottobre;
b) non fossero più considerati bisestili gli anni secolari non divisibili esattamente per 400 (ovvero 1600 bisestile; 1700, 1800 e 1900 non bisestili; 2000 bisestile....)

In questo modo si accumulerà un errore di un giorno solo dopo 3300 anni.

Un **Anno Giuliano** vale 365.25 giorni solari medi (= 3155760 s).

Giorno Giuliano (Julian Day = JD)

È un sistema introdotto dagli astronomi per fornire un riferimento che superi le difficoltà di datazione che scaturiscono da differenti calendari e cronologie storiche ed è il numero di giorni trascorsi dal mezzogiorno dell'1 gennaio 4713 AC. Il JD cambia al mezzogiorno di Greenwich. Il 14 marzo 2020 alle ore 12:00 di UT corrispondeva a JD = 2458923.0

La data astronomica (normalmente il Giorno Giuliano) cambia al passaggio del Sole al meridiano superiore; la data civile cambia al passaggio del Sole al meridiano inferiore.

Anche se i loro nomi sono simili il JD non è legato all'Anno Giuliano. Il Giorno Giuliano specifica una data (più un tempo in quella data dato dalla parte decimale) senza riferimento a nessun altro calendario, ma solo alla propria epoca iniziale.

Sorgere e tramontare di un astro

Per un osservatore posto a latitudine φ, la declinazione (δ), l'altezza (**h**) sull'orizzonte, l'azimut (**A**) e l'angolo orario (**H**) di un oggetto celeste sono legate dalle seguenti relazioni:

$$\sin \boldsymbol{h} = \sin \boldsymbol{\delta} \cdot \sin \boldsymbol{\varphi} + \cos \boldsymbol{\delta} \cdot \cos \boldsymbol{\varphi} \cdot \cos \boldsymbol{H}$$

$$\sin \boldsymbol{\delta} = \sin \boldsymbol{h} \sin \boldsymbol{\varphi} - \cos \boldsymbol{h} \cos \boldsymbol{\varphi} \cos \boldsymbol{A}$$

L'angolo orario di un astro ad altezza **h** è dato dalla relazione:

$$\cos H = -\frac{\sin \boldsymbol{\delta} \cdot \sin \boldsymbol{\varphi}}{\cos \boldsymbol{\delta} \cdot \cos \boldsymbol{\varphi}} + \frac{\sin \boldsymbol{h}}{\cos \boldsymbol{\delta} \cdot \cos \boldsymbol{\varphi} \cdot} = -\tan \boldsymbol{\delta} \cdot \tan \boldsymbol{\varphi} + \frac{\sin \boldsymbol{h}}{\cos \boldsymbol{\delta} \cdot \cos \boldsymbol{\varphi} \cdot}$$

Quindi se h = 0 (sorgere o tramontare) avremo:

$$\boldsymbol{H} = \pm \boldsymbol{arcos}\,(-\boldsymbol{tan}\,\boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{tan}\,\boldsymbol{\varphi})$$

Con il valore negativo (prima del meridiano) per il sorgere e positivo (dopo il meridiano) per il tramontare. Se è nota l'ascensione retta (α) dell'astro potremo calcolare il tempo siderale dalla relazione: t = α + H.
Per una precisione più accurata dobbiamo considerare la rifrazione dell'atmosfera. Quindi al momento in cui un astro sorge $h \simeq -35'$. Nel caso di una sorgente estesa occorre considerare le sue dimensioni angolari, per esempio nel caso del Sole (assumendo un diametro $\simeq 32'$) al momento del sorgere e tramontare avremo $h \simeq -51'$

L'Azimut di un astro ad altezza **h** è dato dalla relazione:

$$\cos \boldsymbol{A} = -\frac{\sin \boldsymbol{\delta}}{\cos \boldsymbol{h} \cdot \cos \boldsymbol{\varphi}} + \frac{\sin \boldsymbol{h} \cdot \sin \boldsymbol{\varphi}}{\cos \boldsymbol{h} \cdot \cos \boldsymbol{\varphi} \cdot}$$

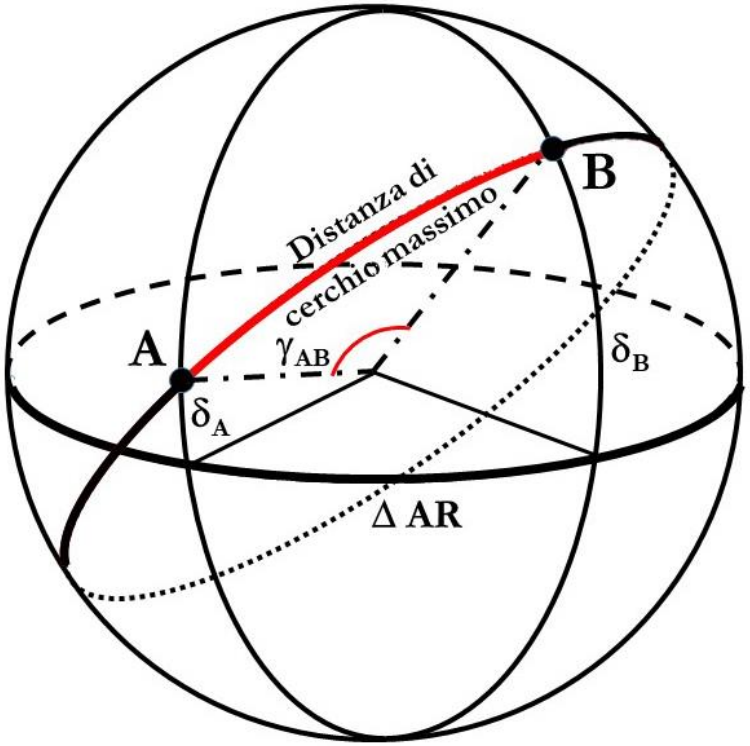
Quindi se h = 0 (sorgere o tramontare) avremo:

$$\boldsymbol{A} = \pm \boldsymbol{arcos}\left(-\frac{\boldsymbol{sin}\,\boldsymbol{\delta}}{\boldsymbol{cos}\,\boldsymbol{\varphi}}\right)$$

Nota: Nelle relazioni che consentono di calcolare altezza e azimut al sorgere o tramontare, un argomento dell'arcos il cui valore assoluto è maggiore di 1 esprime la circostanza di un astro che non sorge o tramonta mai ed è quindi circumpolare o anti-circumpolare per l'osservatore

Distanza di cerchio massimo (ortodromia)

È la distanza minima tra due punti posti sulla superficie di una sfera; detta anche ortodromia, è data dall'arco di cerchio massimo che passa per i due punti



Consideriamo due punti A e B sulla sfera celeste con coordinate equatoriali AR_A, δ_A e AR_B, δ_B, con $\Delta AR = |AR_A - AR_B| \leq 12h$

Posto $k = \frac{360° \cdot \Delta AR}{24}$ (ovvero trasformando la differenza di AR in gradi) la distanza angolare γ_{AB} tra i due punti vale:

$$\gamma_{AB} = \arccos\ (\cos k\ \cdot \cos \delta_A\ \cdot \cos \delta_B + \sin \delta_A\ \cdot \sin \delta_B)$$

Dalla distanza angolare possiamo ricavare la distanza di cerchio massimo **d** per due punti A e B sulla superficie di una sfera di raggio R

Tra distanza angolare e distanza di cerchio massimo vale la relazione:

$\gamma : 360° = d : 2\,\pi\,R$ da cui ricaviamo: $d = \frac{2\,\pi\,R}{360°} \simeq \frac{R}{57.296}$

Consideriamo il caso di due punti A e B sulla superficie della Terra con coordinate Lon_A, Lat_A e Lon_B, Lat_B, con $\Delta Lon = |Lon_A - Lon_B| \leq 180°$

Vale la relazione:

$$\mathrm{d}(km) \simeq \frac{R_{Terra}}{57.296} \cdot \gamma_{AB} \simeq 111.3\ \cdot \arccos\ (\cos \Delta Lon\ \cdot \cos Lat_A\ \cdot \cos Lat_B + \sin Lat_A\ \cdot \sin Lat_B)$$