# Capitolo 3

## *Tempo e sua misura*

### *3.1 - Generalità*

"Che cos'è il *tempo* ?" - "Ha avuto esso un inizio ?" A queste domande anche l'uomo più saggio difficilmente sa dare una risposta precisa. Probabilmente c'è stata la nascita del *nostro tempo*, relativo al *nostro universo* poiché altri universi potranno formarsi quando accadranno le opportune condizioni favorevoli.

Oggi più che mai, di fronte al concetto evolutivo dell'universo, il tempo rappresenta una delle questioni più importanti per i fisici e per i filosofi. Lasciando a questi il concetto del *divenire* (passato, presente, futuro), occorre in pratica considerare del tempo due distinti problemi, uno *cronologico* e l'altro *cronometrico*.

Il problema cronologico consiste nel sistemare ogni evento in una scala di tempo uniforme che risale al lontano passato, per il quale si dovrà determinare un'origine ed un'unità di misura. Il problema cronometrico riguarda la misura precisa di un intervallo di tempo che a volte può essere molto breve (misure di frequenza). Questo problema, che riguarda specialmente le trasmissioni di tipo elettromagnetico, non ha bisogno dell'origine del tempo.

Il primo problema è prettamente astronomico e la scala di tempo(*tempo astronomico*) è dedotta dalla regolarità dei moti degli astri del sistema solare, specialmente di quello di rotazione della Terra intorno al proprio asse, moti liberati da tutte le cause sistematiche di perturbazione.
Il secondo problema è più fisico che astronomico, utilizzando per le misure degli intervalli una scala di tempo ( *tempo fisico*) basata sulle transizioni atomiche. I due problemi non sono indipendenti l'uno dall'altro, potendo, come si vedrà più avanti, operare un'integrazione tra il tempo astronomico e quello fisico.
Ad ogni buon conto, sarà per prima analizzato il tempo astronomico, premettendo per dovuta necessità le varie relazioni sugli angoli orari, che presenteranno dei pedici per indicare l'astro al quale si riferiscono. I pedici sono i se-

guenti*:* *A* = astro in generale; S = Sole; L = Luna; s = punto gamma (γ); • = pianeta; ∗= stella.

### *3.2 - Sfera celeste in proiezione ortografica equatoriale. Diagramma orario*

Le relazioni sugli angoli orari vengono ricavate con grande facilità dal *diagramma orario*, ottenuto proiettando dall'infinito la sfera celeste sul piano dell'equatore celeste (*proiezione ortografica equatoriale*). L'equatore celeste ed i paralleli di declinazione vengono rappresentati da circonferenze concentriche, i cui raggi sono uguali a quelli che essi hanno sulla sfera celeste proiettata (detta *sfera celeste obiettiva*); gli orari, invece, sono rappresentati da raggi. Al centro della proiezione viene proiettato il polo celeste nord o quello sud, a seconda della posizione del punto di vista.
La figura 3.1b rappresenta la proiezione della sfera celeste di figura3.1a, sulla quale sono segnati il meridiano celeste di Greenwich e quello di un dato osservatore di longitudine positiva; sul primo è segnato lo zenit dell'osservatorio astronomico di Greenwich ($Z_G$ ), sul secondo quello dello osservatore ($Z$).Con $M_{sG}$ e $M_{iG}$ sono indicati i punti di mezzocielo superiore ed inferiore relativi al meridiano celeste di Greenwich e con $M_s$ e $M_i$ gli stessi relativi al meridiano celeste dell'osservatore.

Il percorso apparente diurno di un astro fisso sulla sfera celeste, dovuto alla rotazione della Terra intorno al suo asse, è rappresentata sul diagramma da un parallelo di declinazione, cioè da una circonferenza concentrica a quella equatoriale. Il senso di questo moto apparente coincide con quello di misura degli angoli orari ed è indicato in figura dalla freccia *f*.

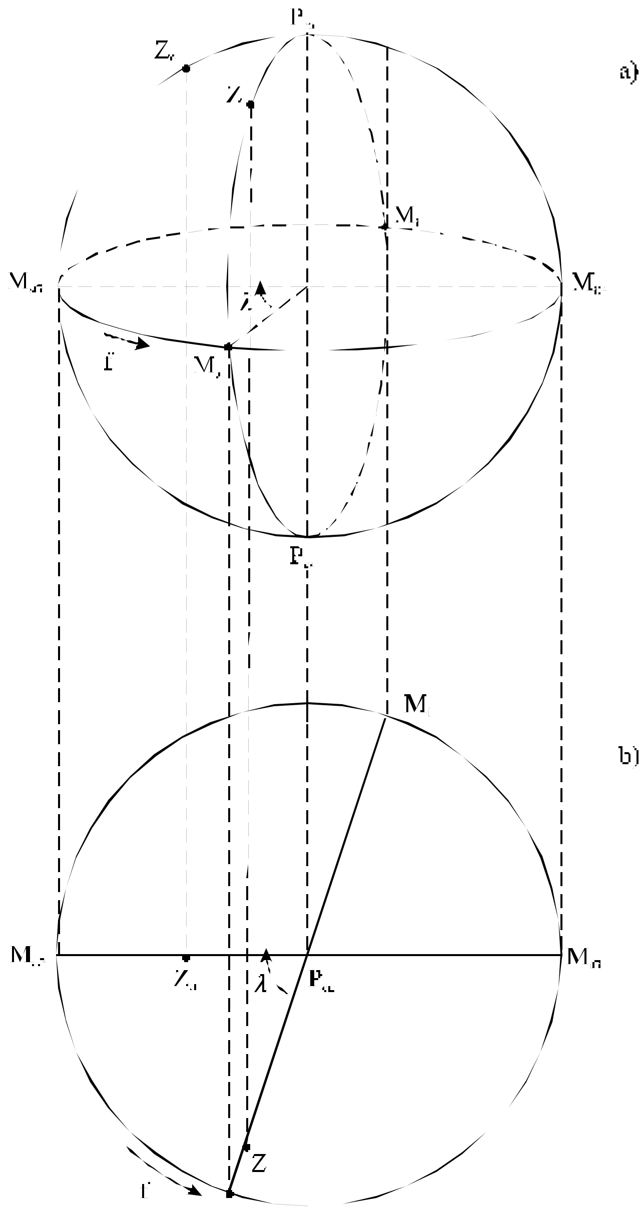


**Figura 3.1** - Rappresentazione ortografica equatoriale; diagramma orario

.

### *3.3 - Relazione fra simultanei angoli orari relativi a due meridiani.*

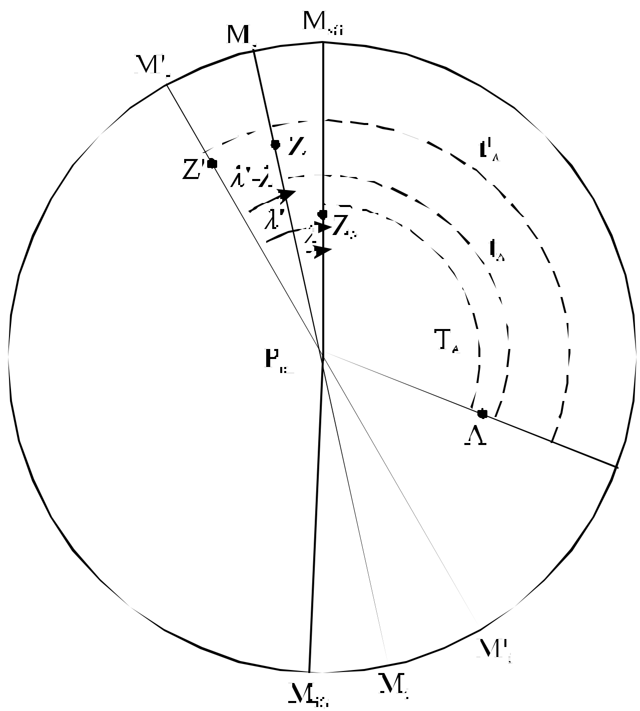

**Figura 3.2** - Relazione fra gli angoli orari

Siano sul diagramma orario di figura3.2 *Z* e *Z'* gli zenit di due osservatori situati entrambi nell'emisfero terrestre orientale. I loro meridiani, definiti rispettivamente dalle longitudini $\lambda$ e $\lambda'$ , sono rappresentati dai raggi $P_{cn}\ M_s$ e $P_{cn}\ M_s'$; il meridiano di Greenwich è rappresentato dal raggio $P_{cn}\ M_{sG}$ . Su quest'ultimo è segnato anche lo zenit dell'omonimo osservatorio astronomico. Sul diagramma è considerata per un dato istante la posizione dell'astro *A*.
Facilmente si ricava la seguente relazione da considerare algebrica:

$$\begin{aligned} t_{A'} - t_A &= l' - l \\ AOL_{A'} - AOL_A &= l' - l \end{aligned} \qquad (3.1)$$

Cioè: la differenza dei simultanei angoli orari di un astro rispetto a due dati meridiani è uguale alla differenza di longitudine esistente fra questi.

Se uno dei meridiani è quello di Greenwich, indicando $T_A$ (o con $AOG_A$) il corrispondente angolo orario dell'astro *A*, la (3.1) diventa:

$$
\begin{aligned}
t_A - T_A &= l \\
AOL_A - AOG_A &= l
\end{aligned}
\qquad (3.2)
$$

Anche questa formula va considerata algebrica. Non sfuggono al lettore i significati delle sigle *AOL* e *AOG*, angolo orario locale e angolo orario riferito al meridiano di Greenwich.

### *3.4 - Relazione fondamentale degli angoli orari*

Rappresenti la figura3.3 ancora il diagramma orario, sul quale sono considerate per un dato istante le posizioni del punto $\gamma$ e dell'astro *A*, i cui orari sono rispettivamente $P_{cn}\,\gamma$ e $P_{cn}A_1$.

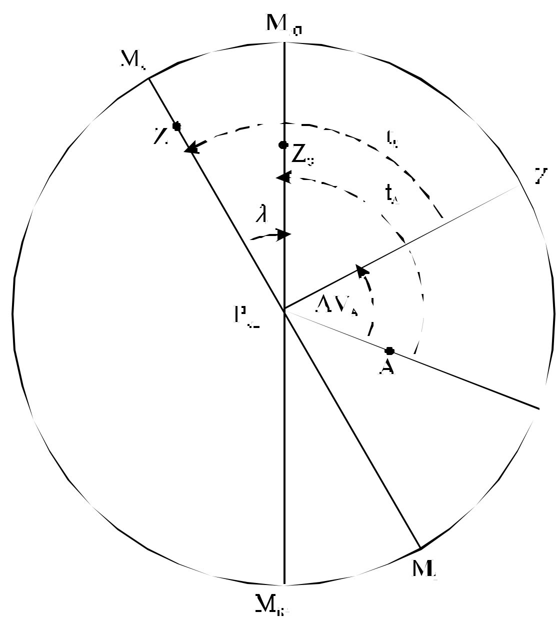


**Figura 3.3** - Relazione fra angoli orari ed ascensione retta

Dalla figura si ricava:

$$t_A - t_s = AV_A \qquad (coa_A)$$
$$AOL_A - AOL_s = AV_A \qquad (coa_A) \qquad (3.3)$$

Se gli angoli orari sono riferiti al meridiano di Greenwich la formula (3.3) va così scritta:

$$T_A - T_s = coa_A$$
$$AOG_A - AOG_s = coa_A$$

Sapendo che:

$$coa_A = 360^\circ - a_A$$

la prima delle (3.3) diventa:

$$t_A - t_s = 360^\circ - a_A$$

e togliendo 360$^o$:

$$t_A - t_s = -a_A \qquad , \qquad t_s - t_A = a_A$$

La formula (3.3) è detta *relazione fondamentale degli angoli orari*; questa lega, per un dato istante, l'angolo orario del punto γ con l'angolo orario e l'ascensione versa (o l'ascensione retta) di un astro.

### *3.5 - Giorno stellare e giorno sidereo*

Come già detto, il *giorno* definisce il periodo di rotazione della Terra, considerato costante se si trascurano le lievissime fluttuazioni dovute principalmente a cause meteorologiche ed il piccolissimo rallentamento dovuto alle maree. Per la valutazione di questo periodo occorre riferirsi ad un astro, per cui l'intervallo tra due consecutivi passaggi di un dato meridiano di fronte all'astro preso in considerazione darà la durata del giorno. Per il moto apparente diurno della sfera celeste, il giorno può definirsi anche come l'intervallo tra due consecutivi passaggi di un astro su un dato meridiano. A seconda dell'astro preso come riferimento (stella, Sole, Luna, pianeti) il giorno viene denominato *stellare*, *solare*, *lunare* e *planetario*. Il *giorno stellare* è quello che definisce con più esattezza la durata della rotazione terrestre, potendosi considerare le stelle come punti fissi nello spazio, al contrario del Sole, della Luna e dei pianeti.

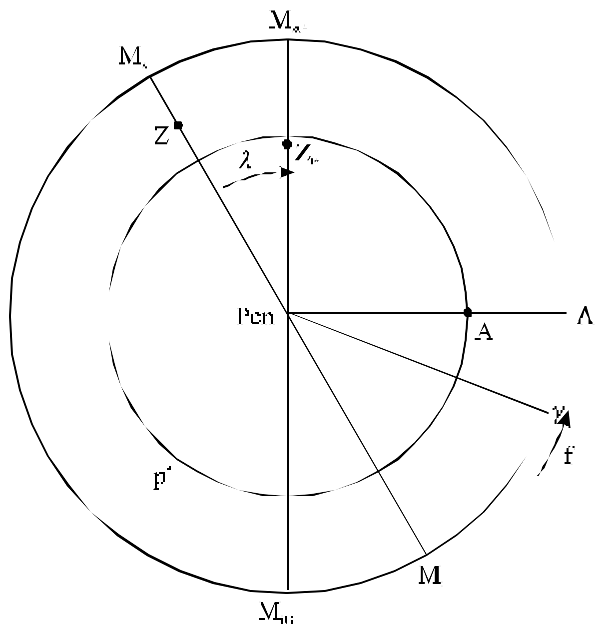


**Figura 3.4** – Diagramma orario

Si consideri sul diagramma orario di figura 3.4 la stella *A* e rappresenti la freccia *f* il senso del moto di rotazione (apparente) della sfera celeste. Per lo studio di questo moto vengono considerati fissi i due meridiani celesti, dell'osservatore e di Greenwich. Il percorso apparente diurno della stella è rappresentato dal parallelo di declinazione *p*. Al fluire del tempo, l'orario della stella, rappresentato dal raggio $P_{cn}$ $A_1$, ruota nel senso della freccia *f*, per cui il giorno stellare è dato dall'intervallo tra due consecutivi passaggi dell'orario dell'astro sul meridiano celeste dell'osservatore o su quello di Greenwich.
Per l'osservatore *Z* e per tutti i punti situati sul suo meridiano il giorno stellare inizia al passaggio del piede dell'orario della stella (punto $A_1$) al mezzocielo superiore ($M_s$ ) e termina al passaggio successivo. Per tutti i punti posti sul

meridiano di Greenwich l'inizio e la fine del giorno stellare sono ovviamente riferiti al passaggio del piede dell'orario della stella al mezzocielo superiore di detto meridiano ($M_sG$). È questo il *modo astronomico* di considerare l'inizio e fine del giorno.
Il giorno stellare può essere suddiviso in 24 ore, ciascuna a sua volta divisa in 60 minuti ed ogni minuto suddiviso in 60 secondi.

Fissata un'epoca di partenza per la misura di queste rotazioni riferite ad un prefissato meridiano, il *tempo stellare* relativo ad una stella, in un dato istante, è dato dall'angolo orario locale di questa e da un numero intero di rotazioni (*giorni stellari*), che definisce quella nota entità conosciuta sotto il nome di *data*.

Il diagramma orario di figura 3.4 è, dunque, un orologio: l'orario della stella $A$ rappresenta la lancetta del tempo; i comuni orologi non sono altro che una riproduzione di questo diagramma.

Per la misura del tempo stellare è opportuno scegliere una stella equatoriale (avente $d$ = 0), anche per avere il più lungo percorso apparente diurno (equatore celeste). Ma per il fenomeno della precessione degli equinozi, accompagnato da quello di nutazione, le coordinate equatoriali celesti $\alpha,\delta$ delle stelle subiscono una lenta variazione, per cui se una stella è oggi equatoriale non lo sarà nel futuro.
Per questo, è stato scelto il punto $\gamma$ come punto di riferimento per la definizione del giorno e quindi per la misura del tempo. Essendo questo punto sempre sull'equatore celeste, l'intervallo (v. figura 3.4) tra due consecutivi passaggi del punto $\gamma$ al punto $M_s$ di un dato meridiano definisce *sidereo* (o *siderale*), che viene diviso in 24 ore sideree, ciascuna comprendente 60 minuti siderei ed ogni minuto sidereo 60 secondi siderei.

Il giorno sidereo è più corto di quello stellare di circa 1 centesimo di secondo (con più precisione di 8 millesimi di secondo), non essendo il punto $\gamma$ un punto fisso sulla sfera celeste, spostandosi sull'eclittica verso il Sole di circa 50",26 in un anno per il noto fenomeno di precessione.

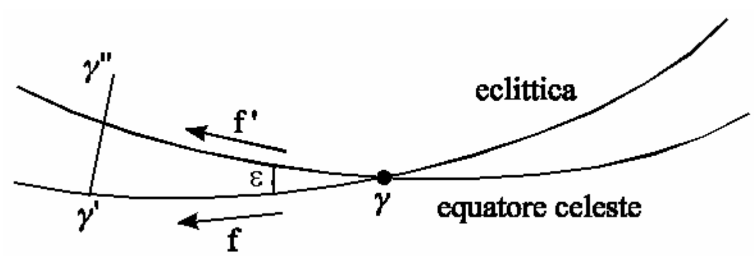

**Figura 3.5** – Punto equinoziale o punto vernale gamma (g**)**; intersezione tra equatore ed eclittica

In figura 3.5 lo spostamento precessionale annuo del punto γ, nel senso della freccia *f*, è rappresentato dall'arco d'eclittica $\gamma\gamma'$; la sua proiezione sull'equatore celeste (spostamento precessionale equatoriale secondo la freccia *f'*), data dall'arco γγ'', può ottenersi considerando piano il triangolo infinitesimo γγ'γ'':

$$\gamma\gamma'' = \gamma\gamma' \cos\varepsilon = 50.26'' \cos(23^\circ 26') \cong 45''$$

Lo spostamento equatoriale giornaliero, che avviene nel senso orario guardando dal polo celeste nord, è dato da:

$$\frac{45''}{366} \cong 0.123'' \cong 0.008^s$$

Di qui, l'intervallo tra due consecutivi passaggi del punto γ su un dato meridiano (giorno sidereo) è più corto di $0.008^s$ rispetto a quello di una data stella (giorno stellare). Gli orologi regolati sul punto γ vengono chiamati *orologi siderei* e quelli di precisione, in dotazione presso gli osservatori astronomici, *cronometri siderei*; i quadranti di questi ultimi sono generalmente graduati in 24 ore.

### *3.6 - Giorno solare vero e medio*

La nostra vita è legata al Sole, onde il tempo va regolato su questo astro. Muniti di un cronometro sidereo, misurando gli intervalli tra i consecutivi passaggi del Sole al meridiano celeste superiore della nostra località, facilmente constatiamo che questi intervalli (*giorni solari veri*) sono tutti più lunghi del giorno sidereo e differenti tra loro (di ben 52 secondi è la differenza tra il giorno solare vero più lungo e quello più corto).

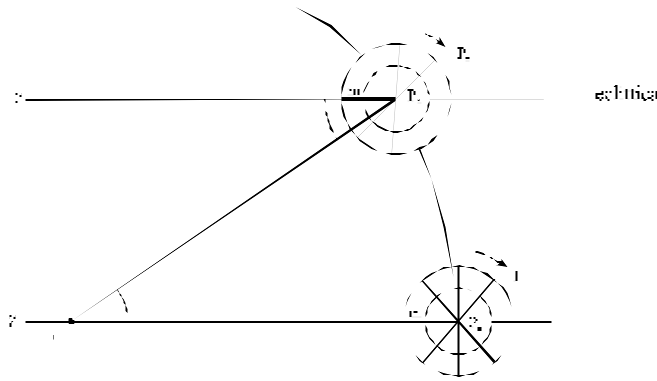

**Figura 3.6** – Posizioni del terra sull'eclittica e passaggio del meridiano al punto equinoziale

Che il giorno solare sia più lungo di quello sidereo è giustificato dal fatto che la Terra, nel compiere una rotazione completa intorno al proprio asse, descrive anche un tratto d'orbita, considerata circolare, intorno al Sole, ampio circa 1° (360°:366,26 giorni), essendo 366,26 il numero di giorni siderei compreso in un anno siderale.

Si consideri, figura 3.6, la Terra nella posizione 1 dell'orbita; il suo meridiano *m* si trova contemporaneamente di fronte al Sole ed al punto γ. Dopo una sua rotazione completa, la Terra passa nella posizione 2 ed il meridiano *m* si presenta di nuovo di fronte al punto γ: è trascorso, dunque, un giorno sidereo. Per ripresentarsi di fronte al Sole il meridiano dovrà ruotare ancora di circa 1° , cioè dovranno trascorrere ancora circa 4 minuti per completarsi il giorno solare. La non uniformità, poi, dei giorni solari è dovuta al fatto che l'orbita descritta dalla Terra nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole non è nel piano dell'equatore celeste e che la sua velocità di rivoluzione non è costante (massima al perielio, minima all'afelio). Ciò si traduce in un moto apparente non uniforme del Sole sull'eclittica in un anno; ma anche se questo moto fosse uniforme, non lo sarebbe il suo corrispondente proiettato sull'equatore celeste.

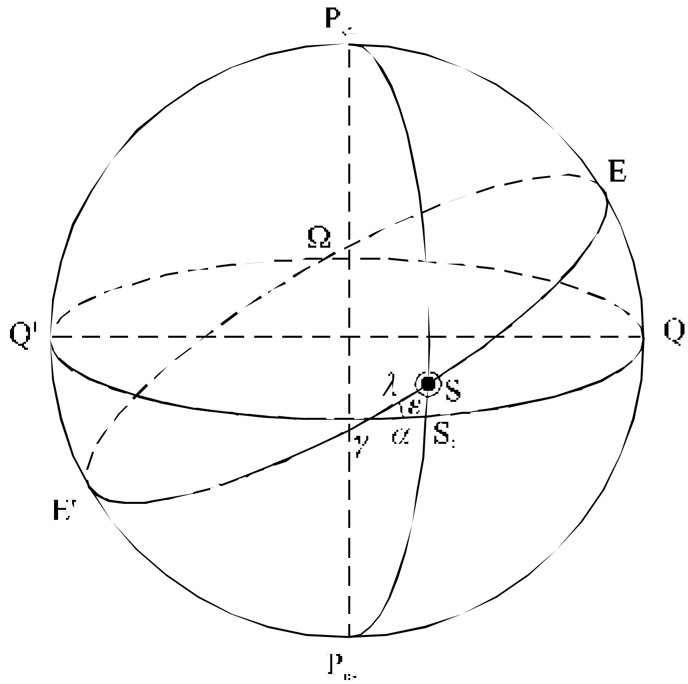


**Figura 3.7** – Differenza tra longitudine eclittica ed ascensione del sole vero

La figura 3.7 considera in un dato istante il Sole vero nel punto *S* dell'eclittica. Tra le sue coordinate $\alpha$ e $\lambda$ esiste la relazione:

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

ricavata dal triangolo sferico rettangolo $SS_1\gamma$.

Derivando queste coordinate rispetto al tempo, si ottiene:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \cos\varepsilon \frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\lambda}\frac{d\lambda}{dt}$$

ed essendo:

$$\frac{\cos a}{\cos l} = \sec d \text{ si perviene a: } \quad \frac{da}{dt} = \cos e \sec^2 d \, \frac{dl}{dt}$$

dal che alla velocità costante del Sole sull'eclittica non corrisponde una velocità costante del suo moto proiettato sull'equatore. Di qui la necessità di considerare, per la misura del tempo, un Sole fittizio, che percorra in un anno l'equatore celeste con moto uniforme, donde il suo nome di *Sole medio equatoriale* o semplicemente *Sole medio*. Quest'ultimo è legato a quello vero mediante un secondo Sole fittizio che percorre l'eclittica con moto uniforme, donde il nome a quest'ultimo di *Sole medio eclittico*.

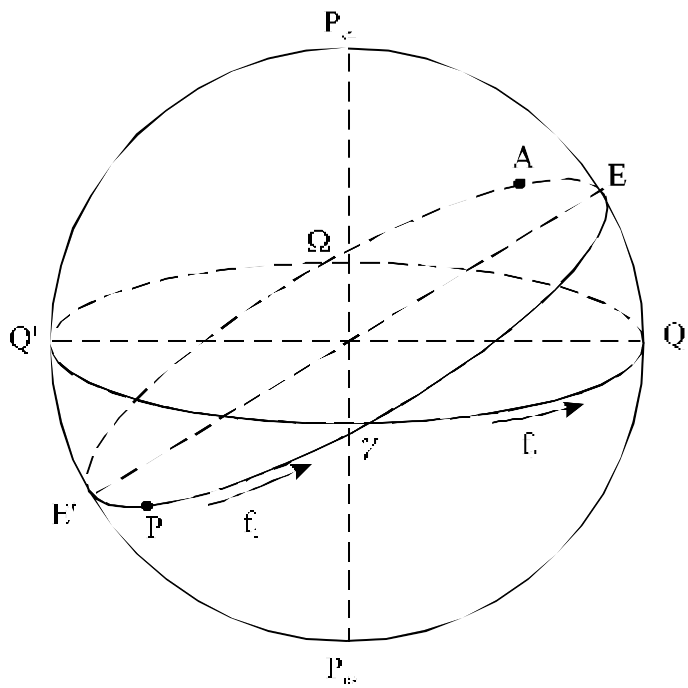


**Figura 3.8** - Moto medio del sole eclittico e sole medio

Quando il Sole vero passa per il perigeo (punto *P*, figura 3.8),si fa partire il Sole medio eclittico; entrambi percorreranno l'eclittica nel senso della freccia $f_1$ ,con moto vario il primo, con moto uniforme il secondo. Si ritroveranno al passaggio all'apogeo (punto *A*), e poi al perigeo, dopo un anno tropico.
Nell'istante in cui il Sole medio eclittico passa per il punto $\gamma$ si fa partire da questo punto il Sole medio che percorrerà l'equatore celeste con moto uniforme nel senso della freccia $f_2$. I due soli fittizi si ritroveranno nel punto Ω

e, dopo un anno tropico, di nuovo nel punto γ. In ogni istante la longitudine celeste del Sole medio eclittico è uguale all'ascensione retta del Sole medio. Il Sole medio, che si trova sempre nell'equatore celeste, si sposta apparentemente su questo ogni giorno di un arco costante pari a:

$$\frac{360^{\circ}}{366.2422} = 59.14'$$

nel senso antiorario guardando dal $P_{cn}$ (dalla posizione 1 a quella 2, figura3.9). Pertanto, gli intervalli tra due consecutivi passaggi del Sole medio al $M_s$ o $M_i$ di una data località ( *giorni solari medi*) sono tutti uguali tra di loro e più lunghi del giorno sidereo.

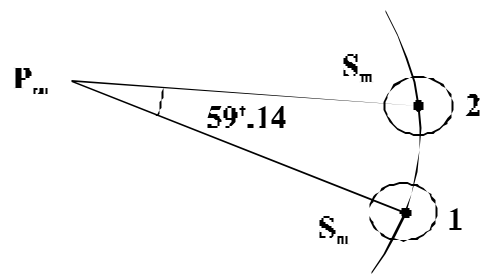


**Figura 3.9** – Posizioni del sole medio sull'equatore dopo l'intervallo di un giorno medio

Si conviene, per una data località, date le nostre attività, fare iniziare il giorno medio nell'istante del passaggio del Sole medio al $M_i$ della località ed il suo intervallo viene suddiviso in 24 ore medie, ciascuna a sua volta divisa in 60 minuti medi ed ogni minuto medio in 60 secondi medi: è questo il *modo civile* di considerare l'inizio e fine del giorno.

Lo spostamento costante del Sole medio sull'equatore celeste in un giorno, di cui alla figura 3.9, fa si che esso, in un anno tropico, passi esattamente una volta in meno, rispetto al punto γ, al meridiano di una data località; di qui l'anno tropico comprende 366,2422 giorni siderei e 365,2422 giorni medi. Dato un intervallo di tempo *I*, si può scrivere la seguente proporzione:

$$I_m - I_S = 365.2422 : 366.2422$$

con $I_m$ e $I_s$ il detto intervallo espresso in giorni e frazioni di giorno medi e siderei; di qui la possibilità di trasformare un intervallo di tempo dalle unità medie a quelle sideree e viceversa. Allo scopo sono a disposizione apposite tavole. Dalla proporzione risulta:

$$\begin{aligned} &1 \text{ giorno medio } = 24^h 03^m 56.56^s \\ &1 \text{ giorno sidereo } = 23^h 56^m 04.09^s \end{aligned}$$

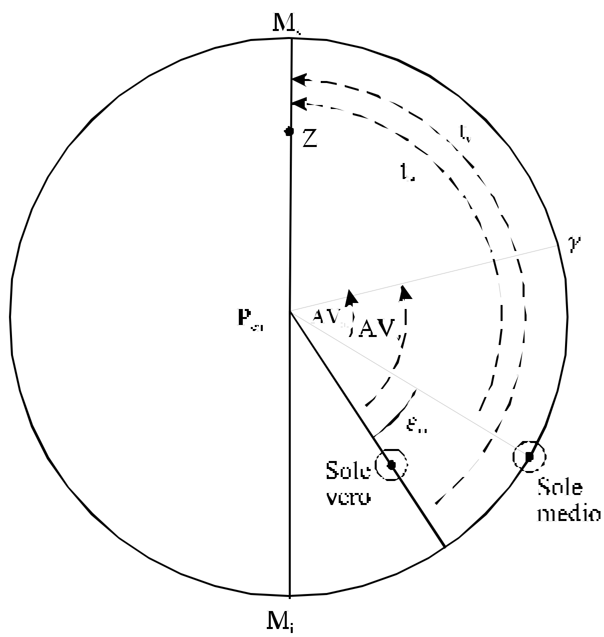


**Figura 3.10** – Relazione dell'ascensione retta fra sole vero e medio

La differenza algebrica, figura (3.10), tra l'angolo orario del Sole vero ($t_v$) e quello del Sole medio ($t_m$) è detta *equazione del tempo medio* ($\varepsilon_m$):

$$\begin{aligned} e_m &= t_v - t_m \\ e_m &= AOL_v - AOL_m \end{aligned} \quad (3.4)$$

La parola equazione ha il significato di correzione, rappresentando $\varepsilon_m$ quella correzione che, apportata col proprio segno all'angolo orario del Sole medio, permette di ottenere il simultaneo angolo orario del Sole vero. Dalla figura risulta ancora che:

$$\varepsilon_m = co\alpha_v - co\alpha_m = \alpha_m - \alpha_v \qquad (3.5)$$

Se gli angoli orari sono riferiti al meridiano di Greenwich, la (3.4) diventa:

$$\varepsilon_m = T_v - T_m$$
$$\varepsilon_m = AOG_v - AOG_m$$

Essendo l'ascensione retta del Sole medio ($\alpha_m$) uguale in ogni istante alla longitudine celeste del Sole medio eclittico ($\lambda_E$), la (3.5) può essere così scritta:

$$\varepsilon_m = \lambda_E - \alpha_v \text{ ed ancora } \varepsilon_m = (\lambda - \alpha_v) - (\lambda - \lambda_E) \qquad (3.6)$$

con $\lambda$ la longitudine celeste del Sole vero. Il primo termine della (3.6) è chiamato *riduzione all'eclittica*, il secondo *equazione del centro*.

La (3.6) può essere trasformata secondo una serie i cui termini sono funzioni dei *sin* e *cos* di $\lambda_E$ e suoi multipli:

$$\varepsilon_m = A\sin\lambda_E + B\cos\lambda_E + C\sin 2\lambda_E + D\cos 2\lambda_E + \dots \qquad (3.7)$$

con *A, B*,..... dei coefficienti dipendenti dall'eccentricità dell'orbita terrestre e dall'obliquità dell'eclittica, lievemente variabili col tempo.

Operando sulla (3.7) considerata espressa soltanto dai primi tre termini (i più importanti), si ottengono i valori di $\lambda_E$ che annullano o rendono massima la detta relazione. La seguente tabella riporta i giorni in cui $\varepsilon_m$ si annulla o diventa massima:

| ***Giorno/mese*** | $\varepsilon_m$ ***(gradi)*** | $\varepsilon_m$ ***(minuti)*** |
|---|---|---|
| 12/2 | -3.8 | -14.4 |
| 15/4 | 0 | 0 |
| 15/5 | 0.95 | 3.8 |

| | | |
|---|---|---|
| 27/7 | -1.6 | -6.3 |
| 1/9 | 0 | 0 |
| 3/11 | 4.1 | 16.4 |
| 25/12 | 0 | 0 |

A volte viene considerata la differenza algebrica tra l'angolo orario del Sole medio e quello del Sole vero, nota quale *equazione del tempo vero* ($e_v$ ):

$$e_v = t_m - t_v \quad , \text{ per cui} \quad e_v = -e_m$$

L'esperimento di cui all'inizio del paragrafo, può essere eseguito per notare l'uniformità o non del giorno di un qualsiasi astro. Il cronometro sidereo utilizzato, regolato sul meridiano locale e senza errore, segnerà ai vari istanti dei passaggi al meridiano dell'astro, alla luce della relazione fondamentale degli angoli orari:

$$t_s = \alpha_A \qquad \text{al primo passaggio}$$
$$t_s^{'} = 24^h + \alpha^{'}_A \qquad \text{al secondo passaggio}$$
$$t_A^{''} = 48^h + \alpha^{''}_A \qquad \text{al terzo passaggio e cosi' via}$$

per cui:

$$t_s^{'} - t_s = 24^h + (\alpha^{'}_A - \alpha_A)$$
$$t_s^{''} - t_s^{'} = 24^h + (\alpha^{''}_A - \alpha^{'}_A)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

I vari intervalli, cioè i vari giorni dell'astro, saranno uguali se risulteranno uguali le differenze ($\alpha'_A$ - $\alpha_A$) e ($\alpha''_A$ -$\alpha'_A$) e viceversa. Di qui il tempo di un astro è uniforme se la sua velocità in ascensione retta o ascensione versa è costante. Questo giustifica la necessità del Sole medio e porta a non tenere conto del giorno lunare e di quello planetario.

### *3.7 - Tempo Medio*

Fissata l'epoca di partenza (nascita di Gesù Cristo per i paesi occidentali), il tempo medio, in un dato istante, è dato dal numero intero di rotazioni e frazione di rotazione compiute dal Sole medio a partire dal $M_i$ di un dato meridiano.

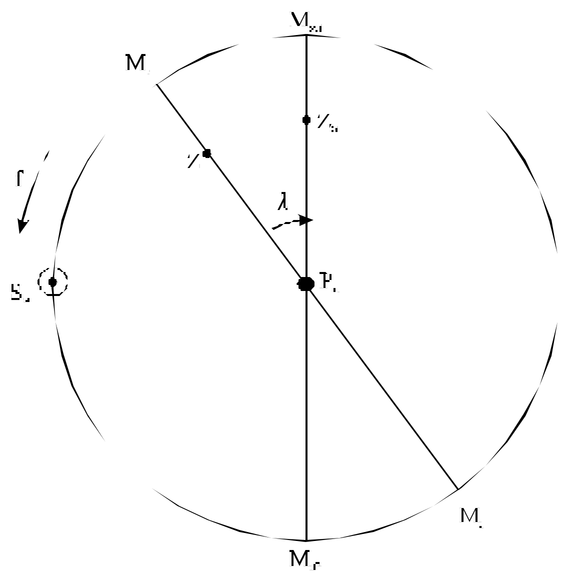

**Figura 3.11** - Diagramma orario

Queste rotazioni, nel senso della freccia *f* (v. figura 3.11), sono ovviamente apparenti, ruotando la Terra in senso inverso. La frazione di rotazione è espressa in ore, minuti e secondi; il numero intero di rotazioni definisce la data (giorno, mese ed anno).
Il giorno inizia quando il Sole medio passa al $M_i$; in tale istante scatta la data, aumentando di una unità il numero di giorni: *modo civile*, come già detto, per *contare il tempo*.
In riferimento al Mi del meridiano di Greenwich il tempo medio viene indicato con vari simboli di facile interpretazione: $T_m$ ,$T_{MG}$ o *GMT* (*Tempo Medio di Greenwich* o *Greenwich Mean Time*); se in riferimento al $M_i$ di un qualsiasi meridiano il tempo è indicato coi simboli $t_m$ ,$t_{mL}$ o *LMT* (*Tempo Medio Locale* o *Local Mean Time*). Valgono per il tempo medio le seguenti relazioni algebriche, identiche a quelle per gli angoli orari:

$$l' - l = t'_m - t_m$$
$$l = t_m - T_m \tag{3.8}$$

$$t_m = T_m + l \tag{3.9}$$

La (3.8) lega i simultanei tempi medi relativi a due dati meridiani; la (3.9) lega, invece, il tempo medio locale con quello simultaneo di Greenwich. Per una data località è *mezzo giorno vero* o *astronomico* quando il Sole vero passa sul meridiano; di conseguenza si ha il *mezzogiorno medio* nell'istante del passaggio del Sole medio al $M_s$.

Non è possibile regolare la vita civile sul tempo medio locale o di Greenwich. Per questa ragione la Terra viene suddivisa in 24 spicchi, detti *fusi orari*, ampi $15^o$ in longitudine, aventi per meridiani centrali quelli di longitudine espressa da numeri multipli di 15°, a partire da 0°. Per tutte le località di un fuso il tempo viene riferito al meridiano centrale, ottenendo il *tempo medio del fuso* (o più semplicemente *tempo fuso*), indicato col simbolo $t_f$ ; in tutto il fuso si ha la stessa ora.

L'Italia è situata nel fuso il cui meridiano centrale ha longitudine $\lambda = 15^o$ *E* ($l = 1^h$ *E*): orbene, un orologio regolato sull'ora fuso indica $t_f = 12^h\ 00^m\ 00^s$ di un dato giorno quando il Sole medio passa sul detto meridiano (al $M_s$ di questo sulla sfera celeste) e indica $t_f = 24^h\ 00^m\ 00^s$ quando passa sull'antimeridiano $l = 165^o$ *W*), cioè quando passa al $M_i$ del meridiano $l = 15^o$ *E* (in questo istante inizia un nuovo giorno). Per due fusi consecutivi i simultanei tempi fuso differiscono di un'ora esatta: avanzato di un'ora quello del fuso più a levante.

Volendo ricavare la longitudine del meridiano centrale del fuso, indicata con $\lambda_f$ , in cui si trova una località di nota longitudine, si trasforma quest'ultima in tempo, arrotondandola, poi, all'ora intera più vicina. Ovvia la relazione algebrica che lega il tempo fuso con il simultaneo tempo di Greenwich:

$$l_f = t_f - T_m \quad , \quad t_f = T_m + l_f \quad , \quad T_m = t_f - l_f \tag{3.10}$$

la seconda permette il passaggio dal tempo di Greenwich al tempo fuso, la terza il passaggio inverso.

Tra il tempo fuso ed il simultaneo tempo locale, alla luce della (3.1) esiste la relazione algebrica:

$$l_f - l = t_f - t_m \quad \text{da cui} \quad t_f = t_m + (l_f - l) \quad \text{e} \quad t_m = t_f - (l_f - l) \qquad (3.11)$$

dove la differenza algebrica ($\lambda_f$ - $\lambda$) non supera i 30 minuti se il meridiano è compreso nel fuso espresso da $\lambda_\phi$ . Detta differenza viene comunemente chiamata *correzione del fuso*.

### *3.8 - Linee di cambiamento di data*

Si consideri l'istante $T_m=12^h$ del giorno 20/4 il Sole medio si trova al passaggio al meridiano di Greenwich. La figura 3.12, che rappresenta l'emisfero terrestre Nord in proiezione ortografica equatoriale, indica per questo istante i corrispondenti tempi medi locali relativi ad alcuni meridiani. Su tutta la Terra si ha un'unica data, il giorno 20/4; all'antimeridiano di Greenwich il tempo medio locale è contemporaneamente:

$$t_m = 0^h \text{ del } 20/4 \qquad \text{e} \qquad t_m = 0^h \text{ del } 21/4$$

esprimendo due date: la data 20/4 e quella 21/4.
Sommando infatti algebricamente $\lambda=\pm 12^h$ all'istante $T_m=12^h$ del 20/4, come indica la (3.9), si ottengono le due suddette date. Si consideri, ora, l'istante $T_m=18^h$ del 20/4/93: il Sole medio si trova al passaggio sul meridiano $\lambda=90^o$ W $=6^h$ *W*. In figura 3.13 si notano i valori dei corrispondenti tempi medi locali per i meridiani segnati, che possono anche essere ottenuti mediante la citata (3.9).
La parte di superficie terrestre dell'emisfero orientale compresa tra l'antimeridiano di Greenwich ed il meridiano $\lambda = 90^o$ *E* $=6^h$ *E* (opposto quest'ultimo a quello sul quale si trova il Sole medio) ha data 21/4 e la rimanente parte ha data 20/4. Alle $T_m=21^h$ del 20/4 il sole medio si troverà sul meridiano $\lambda = 135^o$ *W* $= 9^h$ *W* e la superficie terrestre con data 21/4 si estenderà fino al meridiano $\lambda = 45^o$ *E* $= 3^h$ *E*. La data 21/4 avanzerà al fluire del tempo secondo la freccia *f*, dall'emisfero *E* a quello *W*; ha avuto inizio alle $T_m=12^h$ del 20/4.

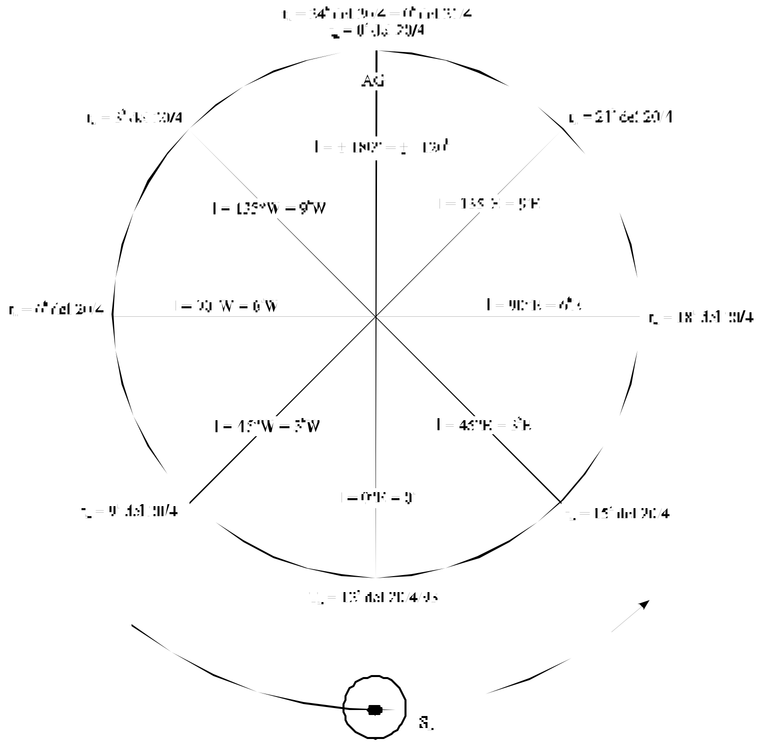


**Figura 3.12** – Variazione dell’ora sulla terra in funzione della longitudine

Or dunque, si può concludere che in un dato istante una parte di superficie terrestre ha data x ed un'altra parte ha data *x+1*. Queste sono limitate da due linee: dall'antimeridiano di Greenwich e dal meridiano opposto a quello su cui trovasi il Sole medio, linea quest'ultima continuamente variabile, spostandosi, come detto, secondo la freccia *f* la data *x+1* avanza dall'emisfero orientale a quello occidentale. Si hanno, pertanto, due linee di cambiamento di data: una fissa (l'antimeridiano di Greenwich) e l'altra mobile (il meridiano opposto a quello su cui si trova il Sole medio); interessa quella fissa, per le modeste velocità dei mobili sulla superficie terrestre. Giunti all'antimeridiano di Greenwich si aumenta di un giorno la data se si passa nell'emisfero *Est*, si diminuisce di un giorno se si passa nell'emisfero *Ovest*. La fig 3.14, riportata dalla copertina posteriore delle *Effemeridi Nautiche* dell'Istituto Idrografico Italiano, mostra la disposizione dei 24 fusi orari, coi meridiani limiti o quelli centrali.

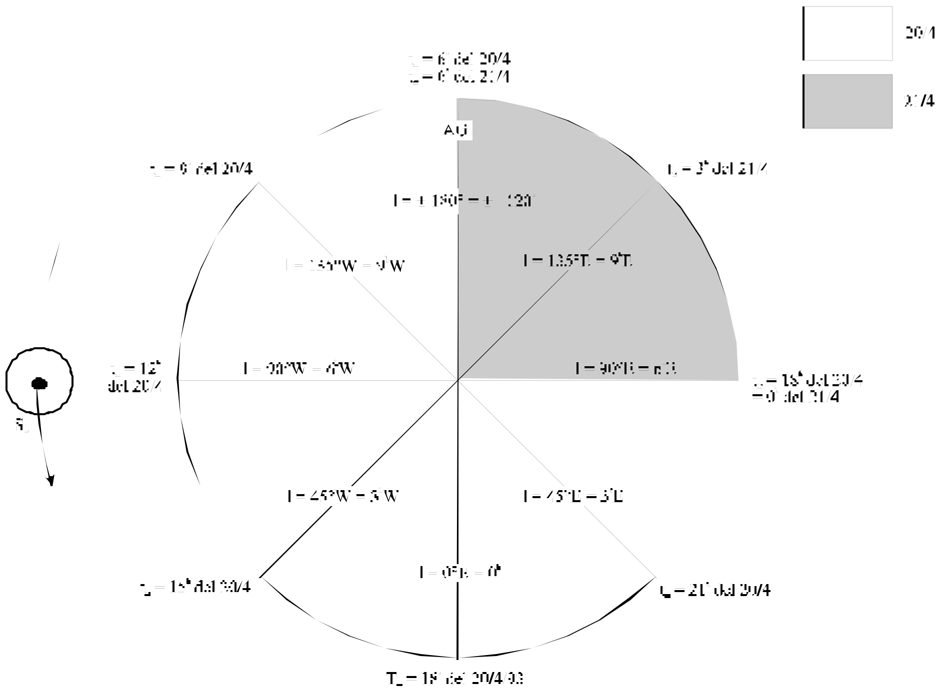

**Figura 3.13** - Cambio data sulla terra

Ciascun fuso è caratterizzato da una lettera dell'alfabeto; quello che ha per meridiano centrale l'antimeridiano di Greenwich è caratterizzato da due lettere, la parte orientale dalla lettera *M*, quella occidentale alla lettera *Y*. In corrispondenza di ogni lettera si nota la longitudine in ore del meridiano centrale del fuso col segno cambiato; questa rappresenta l'entità che bisogna apportare al tempo fuso *tf* per avere il corrispondente tempo di Greenwich $T_m$; per le due zone di cui alle lettere *M* ed *Y* sono riportate evidentemente due longitudini fuso col segno cambiato.

### *3.9 - Data giuliana*

È nota la definizione di anno tropico, detto anche l'*anno delle stagioni*; intervallo di tempo compreso tra due consecutivi passaggi del Sole vero o medio all'equinozio di primavera. Quest'anno non è costante in quanto il punto $\gamma$ non si muove sull'eclittica con moto uniforme, se si considera oltre al fenomeno della precessione anche quello della nutazione.

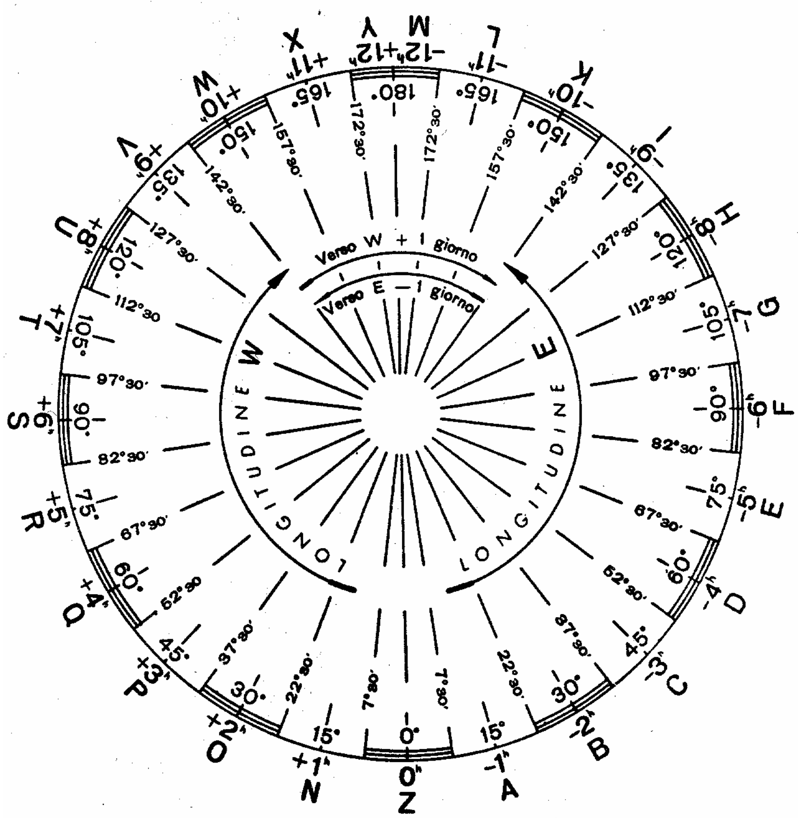


**Figura 3.14** – Diagramma dei fusi orari

In pratica, per eliminare l'effetto di questo secondo fenomeno, si considera come anno tropico la media di un grandissimo numero di anni che risulta di 365,24219864 giorni medi, pari a 31.556.925,9747 secondi medi, con una diminuzione di circa 6 milionesimi di giorno (=0,52$^s$ ) in un secolo.

Molto importante in Astronomia è la *data giuliana* (in sigla *DJ* o *JD*), proposta nel 1853 per scopi prettamente cronologici da Giuseppe Giusto Scaligero, umanista e matematico, nel suo trattato *De Emendatione temporum.* Questa data, i cui anni hanno una durata esattamente di 365,25 giorni, ha come origine l'istante *UT*=12h dell'ultimo giorno dell'anno che precedette il primo giorno del 4713 a.C.; essa viene espressa in giorni e frazioni di giorno. Il tempo *UT* (*tempo universale*), di cui al prossimo paragrafo, è il $T_m$ (*GMT*) opportunamente corretto. Iniziando il giorno giuliano a mezzogiorno di Greenwich, per gli astronomi le loro osservazioni notturne capitano nello capitano nello stesso giorno. È chiaro che dovendo partire da un'epoca così remota, la data giuliana risulta espressa da un numero eccessivo di giorni; ad esempio, a UT=$0^h$ del 30 gennaio 1991 *JD*=2448297,5. Ad ovviare questo inconveniente in generale ci si riferisce all'epoca *JD1900* (*JD0*=2415020,0). Conoscendo *UT*, per il calcolo della data giuliana, può essere preso in considerazione il seguente algoritmo, intendendo col simbolo int(x) la parte intera del numero x:

$$\begin{aligned} JD = {} & \mathrm{int}(365.25 \times anno) + \mathrm{int}(30.6001 \times (mese + 1)) + \\ & + giorno + 1720994.5 + UT \end{aligned} \tag{3.12}$$

dove *UT* è espresso in frazione di giorno. Se la data è posteriore al 4 ottobre 1582 occorre aggiungere la quantità *B* data da:

$$B = 2 - \mathrm{int}(\frac{anno}{100}) + \mathrm{int}\left[\frac{\mathrm{int}(\frac{anno}{100})}{4}\right]$$

Per UT=9h 48m 30s 10/04/93 si ha:

$$JD = \mathrm{int}(365.25 \times 1993) + \mathrm{int}(30.6001 \times 5) + 10 + 1720994.5 + \frac{9 + \frac{48}{60} + \frac{30}{60 \times 60}}{24}$$

$$JD = 727943 + 153 + 10 + 1720994.5 + 0.4097 = 2449100.9087$$

$$B = 2 - \mathrm{int}(\frac{1993}{100}) + \mathrm{int}\left[\frac{\mathrm{int}(\frac{1993}{100})}{4}\right] = 2 - 19 + 4 = -13$$

$$JD = 2449100.9087 - 13 = 2449087.9087$$

L'algoritmo che segue è riportato *nell'Almanac for Computers* del *Nautical Almanac Office* degli Stati Uniti d'America con K, M ed I rispettivamente l'anno, il mese ed il giorno. Il simbolo *int* indica il troncamento alla parte intera; *segno(x)=1* per *x/ 0*, *segno(x)=-1* per *x<0*.

$$JD = 367K - \mathrm{int}\left[\frac{\mathrm{int}\left[K + \left[\frac{M+9}{12}\right]\right]}{4}\right] + \mathrm{int}\left[\frac{275M}{9}\right] + I + \qquad (3.13)$$

$$+1721013.5 + \frac{UT}{24} \quad \text{- segno}\left(100\mathrm{K} + \mathrm{M} \text{ -19002.5}\right) + 0.5$$

Per tutte le date posteriori al 28/2/1900 non vanno considerati gli ultimi due termini; inoltre la (3.13) è valida per date gregoriane comprese tra il 1801 ed il 2099.

Per l'istante $UT$ precedentemente considerato, la risoluzione della (3.13) dà:

$$JD = 367 \times 1993 \mathrm{int}\left(\frac{7(1993 + \mathrm{int}(\frac{13}{12})}{4}\right) + \mathrm{int}\left(\frac{275 \times 4}{9}\right) + 10 + 172110113.5 + \frac{9.8083}{24} =$$

$$= 731431 - 3489 + 122 + 10 + 1721013.5 - 0.4087 = 2449087.9087$$

Per la trasformazione di un istante di tempo universale in data giuliana può essere utilizzata un'apposita tavola riportata da alcuni almanacchi astronomici, che dà i giorni trascorsi dall'origine del tempo giuliano fino a quello UT=$12^h$ del primo giorno di ciascun mese di un dato anno. Si ricordi che un anno giuliano, per quanto in precedenza accennato, inizia alle UT=$12^h$ dell'ultimo giorno (31 dicembre) dell'anno precedente; di qui il primo giorno di un dato mese inizia alle UT=$12^h$ dell'ultimo mese precedente. Quindi di seguito viene riportata quella parte di tavola relativa agli anni compresi tra il 1980 ed il 1999.

***JULIAN DAY NUMBER, 1980-1999 OF DAY COMMEMSING AT GREENWICH NOON ON:***

***(sommare ad ogni valore il numero 2440000)***

| Year | Jan. 0 | Feb. 0 | Mar.0 | Apr. 0 | May 0 | June 0 | July 0 | Aug.0 | Sep. 0 | Oct. 0 | Nov.0 | Dec. 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1980** | *4239* | *4270* | *4299* | *4330* | *4360* | *4391* | *4421* | *4452* | *4483* | *4513* | *4544* | *4574* |
| **1981** | *4605* | *4636* | *4664* | *4695* | *4725* | *4756* | *4786* | *4817* | *4848* | *4878* | *4909* | *4939* |
| **1982** | *4970* | *5001* | *5'29* | *5060* | *5090* | *5121* | *5151* | *5182* | *5213* | *5243* | *5274* | *5304* |
| **1983** | *5335* | *5366* | *5394* | *5425* | *5455* | *5486* | *5516* | *5547* | *5578* | *5608* | *5639* | *5669* |
| **1984** | *5700* | *5731* | *5760* | *5791* | *5821* | *5852* | *5882* | *5913* | *5944* | *5974* | *6005* | *6035* |
| **1985** | *6066* | *6097* | *6125* | *6156* | *6186* | *6217* | *6247* | *6278* | *6309* | *6339* | *6370* | *6400* |
| **1986** | *6431* | *6462* | *6490* | *6521* | *6551* | *6585* | *6612* | *6643* | *6674* | *6704* | *6735* | *6765* |
| **1987** | *6796* | *6827* | *6855* | *6886* | *6916* | *6947* | *6977* | *7008* | *7039* | *7069* | *7100* | *7130* |
| **1988** | *7161* | *7192* | *7221* | *7252* | *7282* | *7313* | *7343* | *7374* | *7405* | *7435* | *7466* | *7496* |
| **1989** | *7527* | *7558* | *7586* | *7617* | *7647* | *7678* | *7708* | *7739* | *7770* | *7800* | *7831* | *7861* |
| **1990** | *7892* | *7923* | *7951* | *7982* | *8012* | *8043* | *8073* | *8104* | *8135* | *8165* | *8196* | *8226* |
| **1991** | *8257* | *8288* | *8316* | *8347* | *8377* | *8408* | *8438* | *8469* | *8500* | *8530* | *8561* | *8691* |
| **1992** | *8622* | *8653* | *8682* | *8713* | *8743* | *8774* | *8804* | *8835* | *8866* | *8896* | *8927* | *8957* |
| **1993** | *8988* | *9019* | *9047* | *9078* | *9108* | *9139* | *9169* | *9200* | *9231* | *9261* | *9292* | *9322* |
| **1994** | *9353* | *9384* | *9412* | *9443* | *9473* | *9504* | *9534* | *9565* | *9596* | *9626* | *9657* | *9687* |
| **1995** | *9871* | *9749* | *9777* | *9808* | *9838* | *9869* | *9899* | *9930* | *9961* | *9921* | *10022* | *10052* |
| **1996** | *10083* | *10114* | *10143* | *10174* | *10204* | *10235* | *10265* | *10296* | *10327* | *10357* | *10388* | *10418* |
| **1997** | *10449* | *10490* | *10508* | *10539* | *10569* | *10600* | *10630* | *10661* | *10692* | *10722* | *10753* | *10783* |
| **1998** | *10814* | *10845* | *10873* | *10904* | *10934* | *10965* | *10995* | *11026* | *11057* | *11087* | *11118* | *11148* |
| **1999** | *11179* | *11210* | *11238* | *11269* | *11299* | *11330* | *11360* | *11391* | *11422* | *11452* | *11483* | *11513* |

Sempre per l'istante UT=$9^h\ 48^m\ 30^s$ del 10/04/1993, utilizzando la detta tavola, il calcolo della data giuliana è immediato tenendo presente il grafico di figura 3.15.

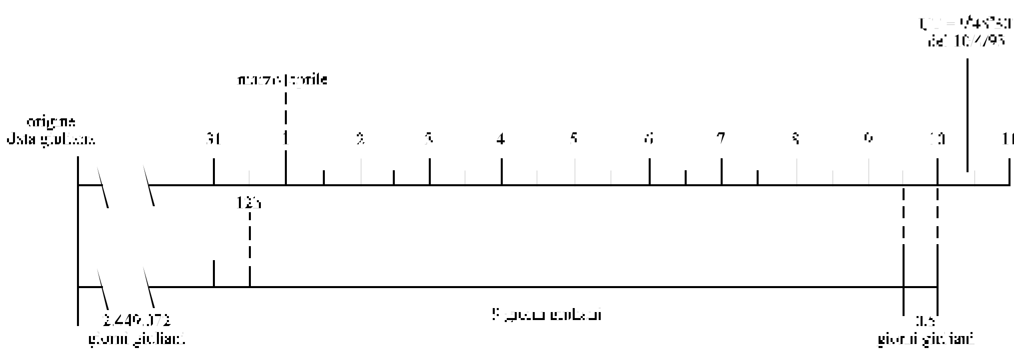


**Figura 3.15** – Diagramma giorni giuliani

La data in argomento poggia sul *periodo giuliano* definito dallo Scaligero, comprendente 7980 anni, dei quali il primo corrisponde all'anno 4713 a.C. Il numero 7980 risulta dal prodotto di tre numeri base, rappresentanti le durate di tre cicli minori: 15 dell'*indizione romana*, 28 del *ciclo solare* e 19 del *numero aureo*. Il periodo di 15 anni dell'indizione romana non ha relazione con cicli solari o lunari; ebbe origine nell'antica Roma per precisare gli anni per l'imposta fondiaria. Il ciclo solare, costituito da 28 anni, è caratterizzato dal fatto che in capo a questi il medesimo giorno dell'anno ritorna in corrispondenza del medesimo giorno della settimana. Infine, il periodo di 19 anni del numero aureo è fondato sulla considerazione del tempo necessario affinché le eclissi di Sole e di Luna ritornino nei medesimi giorni dell'anno.

Si noti che l'origine del periodo giuliano è anteriore a quella di tutte le ere storiche e di tutti i periodi cronologici adottati nei nostri giorni, per cui la data giuliana procede a computazioni cronologiche evitando l'uso di numeri negativi.

### *3.10 - Tempo Universale*

Il tempo medio, in precedenza trattato, è una scala di tempo non uniforme a causa delle irregolarità della rotazione terrestre, messa in luce con l'impiego di oscillatori atomici congiuntamente alle osservazioni astronomiche.

La Terra va progressivamente rallentando, perciò la lunghezza del giorno medio cresce di circa sedici millisecondo al secolo. Questo rallentamento è dovuto essenzialmente agli effetti d'attrito delle maree provocate dalla Luna e dal Sole sugli oceani. Come seconda irregolarità si dovrà considerare lo spostamento dei poli terrestri noto come *moto polare* o *polodia*, capace di produrre una differenza anche di 30 millisecondi; inoltre, al rallentamento della Terra contribuiscono fluttuazioni regolari ed irregolari. L'effetto da esse prodotte è dell'ordine di pochi millisecondi all'anno. In primavera la Terra rallenta ed in autunno accelera, a causa delle variazioni stagionali sulla sua superficie; nell'emisfero boreale, durante la stagione invernale, l'acqua degli oceani evapora e si accumula sotto forma di ghiaccio e di neve sulle più alte cime delle montagne, cosicché la Terra rallenta e questo effetto non è compensato da quello opposto nell'altro emisfero, dal momento che le terre emerse sono più estese nell'emisfero boreale.

L'insieme di questi effetti fa della Terra un orologio piuttosto irregolare; a questo occorre anche aggiungere che per il Sole medio non possono verificarsi le due condizioni addotte: moto uniforme sull'equatore e la sua ascensione retta sempre uguale alla longitudine del sole medio eclittico in quanto queste due coordinate sono soggette a variazioni differenti per i fenomeni di precessione e nutazione.

Per questo è stato introdotto il *tempo universale* (in sigla *TU* o *UT*) che si *adatta* in buona parte al moto del Sole medio, cioè questo tempo non si discosta sensibilmente dal tempo medio.

Del tempo universale si hanno tre scale indicate con UT0, UT1 e UT2:

- UT0 è la scala di tempo dedotta direttamente dalle osservazioni astronomiche;
- UT1 è l'UT0 corretto per la polodia, ovvero l'UT0 corretto per le oscillazioni del meridiano fondamentale dovute al moto polare;
- UT2 è ottenuto apportando all'UT1 le correzioni determinate empiricamente da osservazioni e dovute alle variazioni stagionali della rotazione terrestre.

La media ponderata dei valori di UT2 ottenuti da tutti gli osservatori astronomici della Terra è calcolata ogni giorno dal Bureau International de l'Heure (BIH) di Parigi.

La definizione del *secondo di tempo medio* che ne deriva è quasi uniforme a $10^{-7}$ perché le irregolarità di rotazione diurna della Terra non sono completamente eliminate nei processi. Ogni passaggio dall'UT0 all'UT2 porta ad una scala di tempo più precisa. In ogni caso quando si fa uso della denominazione generica di UT si fa riferimento alla scala di tempo UT1.

Fino al 1984 il tempo universale di identificava col $T_m$ (GMT); da questa data, invece, viene dedotto da osservazioni dei moti diurni stellari; esso viene, cioè, legato al tempo sidereo con la condizione che per ciascun giorno l'istante UT= $0^h$ coincide con l'istante $\upsilon_o$ di tempo sidereo medio di Greenwich (punto $\gamma$ sottoposto al solo moto di precessione), dato che:

$$q_o = C_o + C_1 T + C_2 T \tag{3.14}$$

con

$$C_o = 6.69737456^h \quad , \quad C_1 = 2400.051336^h \quad , \quad C_2 = 0.0000258622^h$$

e T la frazione di secolo giuliano compreso tra l'istante UT=$0^h$ del giorno dato ed il I gennaio 2000, $12^h$ UT (JD=2451545.0):

$$T = \frac{JD(0^h UT) - 2451545.0}{36525} \tag{3.15}$$

Per epoche anteriori al I Gennaio 2000 l'intervallo T è negativo.

Ad un dato istante UT giornaliero di tempo universale corrisponde l'istante di tempo sidereo medio di Greenwich dato da:

$$GMST = q_o + 1.002737909UT \tag{3.16}$$

con GMST (Greenwich Mean Sideral Time) espresso in ore e frazione di ora alla stregua di UT. Il secondo termine della (3.16) converte UT, intervallo di tempo medio, in intervallo di tempo sidereo.

Per i calcoli nautici occorre il tempo sidereo apparente (GAST) riferito alla posizione del punto $\gamma$, tenendo conto sia dei fenomeni di precessione e nutazione che quelli di aberrazione. Questo tempo è dato da:

$$\mathrm{GAST=GMST+E} \tag{3.17}$$

Con E l'*equazione degli equinozi*, espressa da:

$$E = 0.00029^h \sin\ l_N \tag{3.18}$$

essendo $\lambda_N$ la longitudine media del nodo ascendente della Luna, ottenuta dalla risoluzione del polinomio:

$$l_N = 125.04452^\circ - 1934.13626^\circ T + 0.002071^\circ T^2 \tag{3.19}$$

dopo aver calcolato T con la (3.15), avendo considerato la data giuliana JD per l'istante UT considerato.

### *3.11 - Tempo delle Effemeridi*

L'UT2, per quanto in precedenza accennato, non è un tempo uniforme, donde la sua determinazione di *tempo universale provvisorio*. E' pertanto evidente che i tempi previsti (valutati in detta scala) per le osservazioni di eventi astronomici non concordano con quelli in cui effettivamente questi si verificano. Di qui, assumendo che gli eventi astronomici osservati definiscano il *tempo corretto*, si può legare la scala di detto tempo a questi eventi. Si ricorre allora al moto orbitale della Terra attorno al Sole, oppure al moto orbitale dei pianeti ed ancora a quello dei satelliti artificiali. Così fu fatto nel 1956 e la scala di tempo introdotta fu denominata *Tempo delle Effemeridi* (*TE* o *ET*).

L'ET è dunque il tempo *T* della Meccanica, un tempo cioè dedotto dalle osservazioni dei corpi del sistema solare. Così, se il moto orbitale considerato è quello di rivoluzione della Terra intorno al Sole, la longitudine celeste media del Sole, cioè la longitudine celeste del Sole medio eclittico, può essere posta sotto la forma di uno sviluppo in serie del tempo T della Meccanica arrestato ai termini del II ordine:

$$l_N = A_o + A_1 T + A_2 T \tag{3.20}$$

dove *T* è espresso in secoli giuliani. La (3.20), proposta da *Newcomb*, è stata leggermente modificata nei coefficienti in seguito a più recenti osservazioni astronomiche. Detta longitudine, d'altra parte, può essere dedotta dalle osservazioni astronomiche, perciò sostituendola nella (3.20) si potrà risolvere l'equazione e dedurre il tempo *T* della Meccanica indipendentemente dalla rotazione diurna della Terra.

Questo tempo, denominato in origine *newtoniano*, fu poi chiamato *tempo delle effemeridi* (*ET*), denominazione proposta dall'Unione Astronomica Internazionale (UAI) perché le effemeridi astronomiche sono state dal 1960 al 1984 calcolate sul tempo *T* della Meccanica così determinato. Dal I Gennaio 1984 l'argomento delle Effemeridi astronomiche è stato sostituito dalle scale dette di *tempo dinamico*, *TDT* e *TDB*, di cui si dirà più avanti. La scala di tempo ET rappresenta una scala di tempo uniforme con una precisione dell'ordine $10^{-9}$.

L'*ET* non è però facilmente accessibile; per esempio, al fine di ottenere un *ET* con precisione di 0.05 secondi sono necessarie osservazioni per un periodo superiore a 9 anni. Invece l'UT può essere determinato con una precisione di pochi millesecondi in un giorno per mezzo di osservazioni giornaliere di stelle.

Il ritardo con cui viene ad essere determinato l'*ET* non è incompatibile con le necessità dell'Astronomia, in quanto questo tempo serve soltanto per correggere una differenza di longitudine misurata, le coordinate di certe stelle, l'ora di osservazione di un dato fenomeno, ecc.

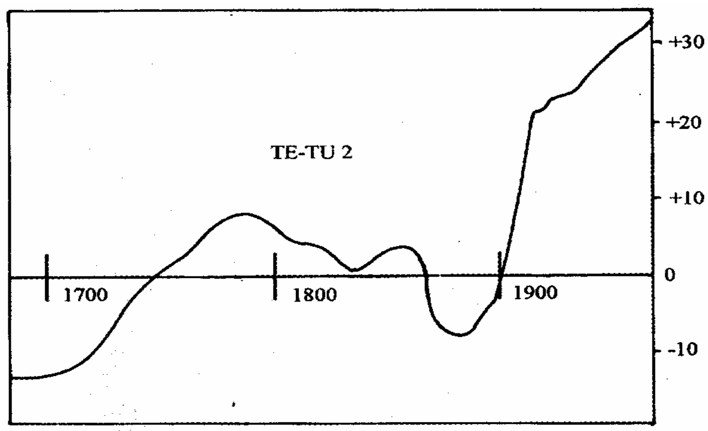


**Figura 3.16** – Variazione secolare fra tempo effemeridi e UT2

La figura 3.16 riporta la curva che dà la differenza tra il tempo delle effemeridi e quello universale uniforme provvisorio (ET-UT2); si noti che dal 1900 questa differenza è continuamente crescente.

### *3.12 - Tempo Atomico e Tempo Universale Coordinato.*

Fino al 1956 il secondo di tempo era considerato quale 86400$^{ma}$ parte del giorno solare medio; da allora e fino al 1967 fu assunta quale sua durata la 31556925,9747$^{ma}$ di quella dell'anno tropico all'epoca 1900 ossia le $T_m$ = $12^h$ del 1899.

Dal 1967 il secondo fu definito in termini di frequenza di radiazione emessa da un atomo di Cesio, introducendo così il *Tempo Atomico*. Il secondo nel *Sistema Internazionale delle unità* (SI) è dato dalla durata di 9192631770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione dal livello iperfino *F=4, M=0* al livello iperfino *F=3, M=0* dello stadio fondamentale dell'atomo di Cesio 133.

Dispositivi elettronici associati ad un orologio atomico *contano* le oscillazioni ed in definitiva la lunghezza del secondo può essere determinata accuratamente in meno di 1 minuto con precisione dell'ordine di $10^{-13}$ $10^{-14}$.

Sulla base delle indicazioni di più orologi atomici dislocati nelle varie parti del mondo, il già citato Bureau International de l'*Heure* di Parigi, mediando le informazioni ricevute, definisce la scala di *tempo Atomico Internazionale* (*TAI*).

Nasce così il problema di dar luogo ad una scala di tempo legata da una parte al TAI, per le esigenze di precisione della ricerca scientifica, e dall'altra al tempo universale UT, per le esigenze della vita pratica legata al susseguirsi del giorno e della notte.

Considerato che fra UT e TAI non può sussistere alcuna relazione teorica perché il primo è funzione della posizione della Terra nel suo moto di rotazione ed il secondo non ha origine astronomica, la differenza fra questi tempi è dunque del tutto imprevedibile e la si può conoscere solamente a posteriori in seguito ad osservazioni astronomiche.

Per realizzare il compromesso tra i diversi utenti del tempo dall'ottobre del 1971, è stata introdotta nell'uso pratico una nuova scala di tempo il *Tempo Universale Coordinato* (*TUC* o *UTC*).

La scala di tempo UTC ha una parte atomica ed un'astronomica: la lunghezza del secondo è determinata da osservazioni atomiche ed il numero di secondi in un anno da osservazioni astronomiche.

L'UTC si ottiene sottraendo al TAI (scelto con origine tale da coincidere con l'UT il I gennaio 1958) un numero intero di secondi in modo che la differenza tra UTC e l'UT1 si mantenga inferiore a nove decimi di secondo, cioè: $UT1\text{-}UTC < 0.9^s$. Per fare ciò l'UTC viene regolarmente aggiornato mediante l'introduzione, a cura del BIH, di salti di scala di $1^s$ (secondo) per tenere conto delle irregolarità nella velocità di rotazione terrestre.

Il salto di scala di $1^s$ è realizzato all'ultimo minuto dell'anno in dicembre e, se necessario, all'ultimo minuto di giugno, secondo quanto viene reso noto con ampio anticipo dal BIH.

I segnali orari (radio) sono nella scala UTC, che si discosta poco da quella dell'UT; da questa ultima gli sperimentatori possono facilmente risalire al TAI.

Nella navigazione astronomica ritenere l'UTC coincidente con l'UT può comportare errori di posizionamento di frazione di miglio: la differenza

DUT1=UT1-UTC viene anch'essa radiodiffusa dalle stazioni campioni, utilizzando la quale si potrà evitare di incorrere nei detti errori.

### *3.13 - Tempo dinamico e scale di tempo dinamico TDB e TDT*

Sono scale di tempo introdotte nel 1984 per realizzare il tempo delle effemeridi ET come argomento delle teorie dinamiche celesti e delle effemeridi. Per *tempo dinamico* s'intende una migliore scala di tempo che governa i moti dei corpi in un campo gravitazionale: cioè l'argomento indipendente nelle equazioni del moto per un corpo secondo particolari teorie gravitazionali tali come la Meccanica Newtoniana oppure la Relatività Generale.

Quando il tempo è misurato rispetto ad un sistema di riferimento avente il suo centro di massa coincidente con quello del sistema solare (baricentro) viene chiamato *Tempo Dinamico Baricentrico* (*TDB*). Il predecessore del TDB era proprio il tempo delle effemeridi.

Per la costruzione delle effemeridi geocentriche o per descrivere il moto orbitale di satelliti artificiali intorno alla Terra, si può usare una scala di tempo dinamico detta *Tempo Dinamico Terrestre* (*TDT*). Essa è una scala indipendente da qualsivoglia teoria e rappresenta una scala di tempo migliore per i moti entro il campo di gravitazione terrestre ed ha lo stesso *passo* del tempo atomico internazionale TAI.

$$TDT = TAI + 32.184$$

la scelta di $32.184^s$ è stata stabilita per rifasare il TDT con il precedente argomento delle effemeridi che era il *Tempo delle Effemeridi*. Nel capitolo 5 le argomentazioni relative al tempo sono ulteriormente discusse ed applicate nel calcolo della posizione apparente dei pianeti del sistema solare e delle stelle.

### *3.14 - Cronometri*

I cronometri sono orologi di precisione, generalmente regolati sul meridiano fondamentale, indicanti tempo sidereo o tempo universale coordinato; di qui

la denominazione di *cronometri siderei* o di *cronometri medi*. I primi hanno il quadrante graduato da 0 a $24^h$.
E' noto (v. paragrafo 3.6) che un giorno medio è più lungo di quello sidereo e precisamente: $24^h$ medie corrispondono a $24^h\ 03^m\ 56.56^s$ di tempo sidereo e $24^h$ sideree corrispondono a $23^h\ 56^m\ 04.09^s$ di tempo medio.

Pertanto, avendo a disposizione due cronometri, uno medio e l'altro sidereo, a due rotazioni complete della lancetta delle ore del cronometro medio corrisponde più di una rotazione completa della lancetta delle ore del cronometro sidereo, cioè una rotazione completa più una frazione di rotazione corrispondente all'intervallo $3^m\ 56.56^s$, comunemente chiamato *accelerazione delle stelle fisse*. Viceversa ad una rotazione completa della lancetta delle ore del cronometro sidereo, corrisponde un pò meno di una doppia rotazione della lancetta delle ore del cronometro medio, cioè la seconda rotazione è incompleta di un intervallo di $3^m\ 55.91^s$ , comunemente chiamato *ritardo del sole medio*.

Quasi sempre l'ora indicata dal cronometro medio (e nel caso specifico da quello marino) non corrisponde esattamente all'ora del primo meridiano, per cui viene considerata la differenza algebrica:

$$K = UTC - UTC_C \tag{3.21}$$

tra l'ora esatta *UTC* e la corrispondente ora indicata dal cronometro $UTC_C$.
Questa differenza, indicata col simbolo *K*, è chiamata *correzione assoluta* o *stato assoluto* del cronometro; essa è positiva se il cronometro ritarda, negativa se avanza.

La correzione assoluta può essere determinata diverse volte al giorno ed in qualsiasi località mediante segnali orari radio telegrafici. Infatti apposite stazioni radiotelegrafiche trasmettono in dati istanti di tempo universale coordinato speciali segnali radiotelegrafici: leggendo al cronometro l'ora corrispondente alla ricezione di questi segnali è possibile determinare *K*. Dai detti segnali si può ricavare, come già detto, la correzione *DUT1*, in modo da ottenere il tempo universale:

$$UT = UTC + DUT1 \tag{3.22}$$

Bisogna, pertanto, consultare specifiche pubblicazioni; per i naviganti queste sono edite dagli Istituti Idrografici dei principali stati marittimi. Il nostro Istituto Idrografico pubblica i *Radio Servizi* per la navigazione; in una sezione di questo volume si trovano tutte le notizie riguardanti i segnali orari radiotelegrafici. La correzione *DUT1* è espressa in decimi di secondo e può variare da $0.7^s$ a $-0.7^s$.

Dei vari codici che, incorporati nei segnali orari radiotelegrafici, danno questa correzione si menziona il codice CCIR ( *Comitato Consultivo Internazionale Radio*), di facile interpretazione ed applicato dalle stazioni di Roma (IAM) e di Torino (IBF). Con questo codice viene contrassegnato un certo numero di segnali del secondo rendendoli doppi.

La correzione *DUT1* positiva viene indicata da un numero *n* di doppi segnali consecutivi del secondo a partire dall'inizio del minuto, cioè a partire dal secondo $N^o$ 1 fino al secondo $N^n$ (con *n* al massimo uguale a 8), per cui: $DUT1 = +(0.1n) \quad \text{secondi}$ . La correzione $DUT1$ negativa viene indicata da un numero *m* di doppi segnali consecutivi del secondo a partire dal secondo $N^o$ 9 (*m* al massimo uguale a 9), per cui:

$$DUT1 = -(0.1m) \qquad \text{secondi}$$

L'assenza di segnali doppi sta ad indicare che *DUT1=0*. Dal confronto di due valori di *K* relativi a due istanti di tempo universale coordinato intervallati di alcuni giorni è possibile notare se il cronometro marcia regolarmente. Se le due correzioni assolute sono uguali, vuol dire che il cronometro batte in un giorno il numero esatto di secondi ,altrimenti avanza o ritarda, cioè ha un suo *andamento giornaliero* che può evidentemente essere determinato. Noto il valore di *K*, volendo l'ora esatta per un istante letto al cronometro, occorre eseguire la somma algebrica:

$$UTC = UTC_C + K \tag{3.23}$$

All'istante *UTC* ottenuto dalla (3.23) bisogna assegnare la giusta data di Greenwich e chiarire se le ore lette sono antimeridiane o pomeridiane, essendo il quadrante del cronometro, come già detto, graduato da 0 a $12^h$ . E' di aiuto la conoscenza del tempo fuso della località in cui si naviga che permette di definire l'istante e la data di Greenwich. Con la (3.22) si ottiene, poi, il tempo universale UT.

### *3.15 - Notizie storiche sul cronometro*

L'avvento del cronometro permise di risolvere il problema della longitudine. Non si sa quando né da chi sia stato costruito il primo orologio meccanico ad ingranaggi; la cattedrale di S. Paolo a Londra aveva già qualche tipo di orologio nel 1286, visto che ad un uomo chiamato Bartolomeo l'*Orologiaio* furono assegnate una pagnotta ed una razione di birra ogni giorno perché se ne prendesse cura.

Per molto tempo l'orologio fu considerato più un monile prezioso che strumento di misura del tempo, data la non costante velocità con cui si muovevano i suoi rotismi; molto influivano gli sbalzi di temperatura ed a bordo erano causa di errori i continui movimenti della nave: un solo minuto di errore causa un errore sulla longitudine di ben 15 primi d'arco. Ed è per questo che il Parlamento inglese nel 1714, nell'istituire una speciale *Commissione per la longitudine* (*Board of Longitude*), decretò un premio di 20.000 sterline a chiunque fosse riuscito a costruire un orologio in grado di non sbagliare di più di due minuti dopo un viaggio dalla Gran Bretagna alla Giamaica, nelle Indie Occidentali, corrispondente a questo scarto un errore in longitudine di $0.5^{o}$. Il premio veniva ridotto a 15.000 e 10.000 sterline per un errore in longitudine rispettivamente di $0.75^{o}$ e $1^{o}$.

Dopo più di due decenni di silenzio, nel 1735, un carpentiere dello Yorkshire di nome John Harrison presentò alla commissione del Board of Longitude il primo cronometro marino, da lui denominato *time keeper, atto a conservare l'ora malgrado le vicissitudini e le variazioni dell'atmosfera , i movimenti della nave, la dilatazione dei metalli e la loro contrazione dovute al caldo ed al freddo*. Il cronometro fu provato con soddisfacente risultati in un viaggio di andata e ritorno tra l'Inghilterra e Lisbona, ma l'autore ricevette soltanto una piccola sovvenzione.

Ben altri tre cronometri costruì l'Harrison; il quarto, più piccolo degli altri, con un diametro di soli 12 cm, ebbe un successo trionfale. Nel 1761 suo figlio William portò questo cronometro alla Giamaica con la nave di Sua Maestà *Deptford*. Dopo 161 giorni di viaggio per mare il cronometro risultò in errore di soli 5 secondi (determinazione della longitudine con un margine di errore di meno di un miglio e mezzo). Non bastò questa prova a convincere che l'autore era meritevole del massimo premio e soltanto dopo un definitivo esperimento compiuto nel 1772 sulla nave *Resolution*, comandata dal celebre Cook, non senza discussioni e difficoltà, fu finalmente assegnato all'Harrison l'intero premio.

Perfezionamenti al cronometro furono successivamente apportati dal francese Pierre Le Roy, dallo svizzero Ferdinand Berthoud e dagli inglesi John Arnold e Thomas Earnshaw, non dimenticando che precedentemente fu il matematico olandese Cristian Huyghens a pensare, nel 1675, di applicare la spirale al bilanciere degli orologi, evento importante nella loro evoluzione tecnica, premessa fondamentale per la costruzione del cronometro marino. I cronometri marini hanno raggiunto negli ultimi tempi un'elevata precisione col controllo dei cristalli di quarzo, le cui vibrazioni, molto regolari, furono studiate tra il 1920 ed il 1930.

Gli orologi al quarzo, poi, possono essere controllati a loro volta mediante le vibrazioni degli atomi del cesio; questo controllo avviene con una precisione tale da sbagliare di un solo secondo in un periodo di 3000 anni.

### *3.16 - Calendario*

Presso le famiglie romane col nome *Calendarium* veniva indicato il registro, affidato ad uno schiavo, a un liberto o ad uno dei figli, in cui si segnavano i prestiti a interesse, i mutui, i depositi con le relative scadenze; anche i municipi tenevano un simile registro sul quale soprintendeva un magistrato dell'ordine equestre, il *curator calendari*. Gli interessi (*usurae*) maturavano generalmente il primo giorno di ogni mese (*Kalendae*), donde il nome al suddetto registro. Con la denominazione di Calendarium si passò poi a significare un intero mese ed infine alla enumerazione annuale del tempo.

Come unità di misura dei calendari vanno annoverati il *giorno*, legato alla rotazione del Terra, il *mese*, quale periodo delle fasi lunari, diviso in quattro *settimane*, l'*anno*, legato al moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole e quindi al ciclo delle stagioni.

Il nostro calendario, in uso presso quasi tutti i popoli della Terra, deriva da quello romano antico, il *romuleo*, del quale viene qui fatto un breve cenno. Sembra che questo considerasse l'anno di 304 giorni, diviso in 10 mesi, 4 mesi di 31 e 6 di 30 giorni.

Sotto Numa Pompilio, imitando il calendario greco, l'anno venne considerato di 355 giorni, diviso in 12 mesi e, per tenere conto del vero periodo del ciclo delle stagioni, fu proposto d'intercalare ogni due anni un altro mese di 22 o 23 giorni, detto *mercedonio*. Ma per bassa speculazione ed anche per le guerre civili, questa intercalazione fu spesso alterata e a volte annullata dai pontefici massimi, ai quali era demandata, per cui nell'anno 708 dalla fondazione di Roma(46 a. C.) l'equinozio di primavera finì con essere ritardato di 90 giorni rispetto alla data corrispondente.

Proprio in quell'anno Giulio Cesare, al suo terzo consolato, quale pontefice massimo, a seguito degli studi di Sozigene, matematico alessandrino, diede vita alla riforma del calendario passata alla storia come *riforma giuliana*.

Secondo Sozigene, per rispettare la durata dell'anno tropico di 365, 25 giorni solari, il calendario doveva prevedere dopo 3 anni di 365 giorni un anno con un giorno in più, intercalandolo tra il 23 ed il 24 febbraio. Detto giorno, poiché ripeteva il sesto giorno precedente le Kalendae di marzo, fu chiamato *bis sexto Kalendas Martias*, di qui il nome di *anno bisestile* a questo quarto anno. Com'è noto il giorno da aggiungere è ora il 29 dello stesso mese di febbraio. Per eliminare, poi, lo sfasamento tra le date ufficiali del calendario di Numa Pompilio e le rispettive astronomiche l'anno 708 di Roma fu considerato di 445 giorni, donde giustamente la sua denominazione di *anno della confusione*.

La valutazione di giorni 0.0078 in eccesso dell'anno giuliano rispetto all'esatta durata dell'anno tropico, pari a 365,2422 giorni (con l'approssimazione alla quarta cifra decimale), porta ad un errore di 78 centesimi di giorno in un secolo e di un giorno intero in 128 anni.

Si venne pertanto a verificare, col trascorre del tempo, un crescente disaccordo del calendario giuliano col ciclo delle stagioni; il reale ritorno del Sole all'equinozio di primavera avveniva sempre più con anticipo, tanto che alla fine del XVI secolo l'inizio astronomico della primavera si verificava l'11 marzo quando il calendario indicava il 21 marzo.

Nel Medio Evo papi, monaci e sovrani s'interessarono alla questione, ma fu il papa Gregorio XIII che il 24 febbraio 1582, con la bolla pontificia *Inter gravissimas*, mise fine al detto divario, a seguito di uno studio elaborato da insigni matematici del tempo sotto la guida dell'astronomo e medico calabrese Luigi Lilio Ghirardi. Si ebbe la *riforma gregoriana* del calendario, in vigore presso quasi tutti i popoli del pianeta (i Russi ed i Greci seguono ancora quello giuliano).

Fu stabilito che il giorno seguente al 4 ottobre di quell'anno (giovedì ) doveva essere considerato 15 ottobre (venerdì ) e che per l'avvenire andava sempre rispettata la regola giuliana degli anni bisestili, considerando però comuni gli anni secolari non divisibili per 400.

Con questa riforma l'anno tropico viene considerato di 365,2425 giorni e quindi più lungo della sua vera durata di 0,0003 giorni, pari a 3 centesimi di giorno in un secolo e di un giorno in 33,3 secoli: penseranno i posteri a tenerne conto. Il calendario gregoriano, come quello giuliano, è un calendario *solare*. Un calendario *lunare* è adottato presso molti popoli arabi; questo comprende 12 lunazioni in un periodo di 354 giorni (*anno comune*); un *ciclo completo* è composto da 19 anni comuni e da 11 *anni intercalari* (di 355 giorni). Il più perfetto calendario lunisolare è quello ebraico, che ha come base il mese lunare considerato alternativamente di 29 e 30 giorni.

Negli ultimi tempi sono state avanzate da più parti richieste per una riforma del calendario gregoriano, principalmente allo scopo di fissare la data della Pasqua e di stabilire trimestri uguali con uguale numero di settimane. Anche l'ONU, come la Società delle Nazioni, ne è stata investita.

### *3.17 - Data della Pasqua*

Il Concilio Ecumenico di Nicea, in Bitinia, del 325 d.C. stabilì che la data dell'equinozio di primavera doveva corrispondere al 21 marzo e che la Pasqua doveva cadere la prima domenica dopo il plenilunio immediatamente successivo all'equinozio di primavera. Di qui la data della Pasqua oscilla tra il 22 marzo (*Pasqua bassa*) ed il 25 aprile (*Pasqua alta*): il lettore facilmente troverà la spiegazione per quanto testé accennato.

La *Tabula Paschalis* della Chiesa Cattolica fornisce per un qualsiasi anno la data della Pasqua, alla quale sono legate le date di tutte le *feste mobili*, quali le *Ceneri*, l'*Ascensione*, ecc.

Non sembra superfluo riportare qui di seguito la regola del grande matematico ed astronomo Carlo Federico Gauss per ottenere per un dato anno la suddetta data.

Si indichino con $N$ l'anno e con $a, b, c, d, e$ i resti rispettivamente delle divisioni:

$$\frac{N}{19}\ ,\ \frac{N}{4}\ ,\ \frac{N}{7}\ ,\ \frac{19a+x}{30}\ ,\ \frac{2b+4c+6d+y}{7}\ ,$$

il giorno di Pasqua è dato da:

$$(22+d+5)\ \text{marzo, oppure} \qquad (d+e-9)\ \text{aprile}$$

essendo le costanti $x$ ed $y$, per il calendario gregoriano e per il periodo 1900 42099, uguali rispettivamente a 24 e 5. Per il 1993 si ricava:

$$a=17 \quad , \quad \mathrm{b}=1 \quad , \quad \mathrm{c}=5 \quad , \quad \mathrm{d}=17 \quad , \quad \mathrm{e}=3$$

per cui la data della Pasqua risulta:

$$(22+17+3)\ \text{marzo} = 42\ \text{marzo} = 11\ \text{aprile}$$
$$(17+3-9)\ \ \text{aprile} = 11\ \text{aprile}$$

Viene ora data una regola molto pratica per il calcolo del giorno della settimana in un dato anno $N$ del calendario gregoriano. Detto $t$ il numero che il giorno occupa nell'anno, il giorno richiesto risulta dal resto della divisione per 7 dell'entità $K$ data da:

$$K = N + \frac{N-1}{4} - \frac{N-1}{100} + \frac{N-1}{400} + t$$

Il giorno sarà sabato, domenica, lunedì, ….., se il resto risulta 0,1,2, ….; vanno trascurati i resti delle varie divisioni relative ai termini della relazione che dà $K$.
Che giorno sarà l'11 aprile 1993 che è il 101esimo giorno dell'anno ?
Il valore di K risulta:

$$K = 1993 + 498 - 19 + 101 = 2577$$
$$\frac{K}{7} \quad \text{da resto } 1 = \text{ domenica}$$

per cui il giorno della settimana è domenica.

## *3.18 - Effemeridi nautiche*

Il calcolo del punto astronomico, oltre alle necessarie misure dirette delle altezze degli astri, richiede l'uso manuale delle Effemeridi Nautiche che forniscono le coordinate astronomiche degli astri osservati.

L'automazione del calcolo comprende quindi la sostituzione delle tavole con algoritmi astronomici che in funzione dell'istante di osservazione forniscono, con la stessa precisione delle Effemeridi , tutti gli elementi necessari al calcolo del punto astronomico.

Le osservazioni astronomiche effettuate nel corso dei secoli negli Osservatori Astronomici hanno permesso di esprimere la posizione dei corpi celesti per mezzo di serie temporali i cui coefficienti derivano direttamente dalle osservazioni per mezzo della variabile indipendente espressa in termini di frazione di secolo a partire da una data prefissata. Molti algoritmi sono riferiti alla data Giuliana 1900; altri invece si riferisco all'epoca 2000.

In ogni polinomio, il primo coefficiente rappresenta il valore del parametro astronomico all'istante dell'epoca di riferimento; il secondo la derivata prima; il terzo la derivata seconda sempre all'istante dell'epoca di riferimento. In ogni caso, tutti i sistemi di riferimento astronomici sono di tipo inerziale.

### *3.18.1 - Definizione del tempo effemeridi*

Come precedentemente studiato in questo capitolo, abbiamo già visto che la misura del tempo è un problema fondamentale che si affronta nel calcolo delle posizioni dei corpi celesti, naturali o artificiali che siano.

Alla base della misura del tempo è posto necessariamente un movimento: per esempio, il moto apparente della sfera celeste.

In generale sono presi in considerazione quattro tipi di tempo:

- *tempo dinamico;*
- *tempo atomico;*
- *tempo siderale;*
- *tempo universale;*

### *3.18.2 - Tempo dinamico*

Il tempo dinamico è la scala temporale uniforme che governa il moto dei corpi nel campo gravitazionale. E' la variabile indipendente nelle equazioni del moto di un corpo in accordo alla teoria gravitazionale come la newtoniana o la relatività generale.

In Astronomia si definiscono due tipi di tempo dinamico:

- Tempo Dinamico Baricentrico (*TDB*);
- Tempo Dinamico Terrestre (*TDT*).

La differenza fra i due tempi dinamici dipende dal centro del sistema di riferimento; quando il sistema di riferimento rispetto al quale è misurato il tempo dinamico ha origine nel centro di massa del sistema solare si parla di *tempo dinamico baricentrico* (*TDB*); quando l'origine del sistema è nel baricentro della Terra si parla di *Tempo Dinamico Terrestre* (*TDT*). Un orologio fisso sulla Terra presenterà variazioni periodiche, che raggiungono anche 1.6 ms, rispetto al *TDB*. Ciò a causa del moto della Terra nel campo gravitazionale solare.

$$\begin{aligned} &TDB = TDT + 0.0016858^{s}\, seng + 0.000014 sen 2g \\ &g = 353.53 + 0.9856003 * (JD - JD2000) \\ &JD = \text{giorno giuliano}, \quad \text{JD2000} = 2451545.0 \end{aligned} \qquad (3.24)$$

### *3.18.3 - Tempo atomico*

Il tempo atomico è il tempo fornito da un orologio atomico. Esso è la base temporale uniforme sulla Terra (una scala temporale è definita dalla frequenza di oscillazione di un elemento atomico e da un'origine, adottata per convenzione internazionale). Questo tempo è detto *Tempo Atomico Internazionale (TAI);* l'unità fondamentale è il secondo definito da 9 192 631 770 periodi della radiazione fondamentale di un atomo di CESIO 133. A causa del moto terrestre il *TAI* perde la sincronizzazione con il giorno solare. Per questo motivo è stato introdotto *l'Universal Time Coordinated (UTC)* che insegue il *TAI* ma una o due volte all'anno viene aggiornato per tenere conto della differenza accumulata tra *TAI* e giorno solare.

### *3.18.4 - Tempo siderale*

Il tempo siderale è misurato dalla rotazione terrestre intorno al proprio asse, ovvero è la misura dell'angolo fra un fissato meridiano ed un punto fisso nello spazio (*punto vernale gamma o punto equinoziale*, $\gamma$)

La forma più comune di tempo siderale , il *Tempo Universale* (*UT1*), che è il tempo solare medio di Greenwich, dedotto dalle osservazioni astronomiche, è riferito al polo d'inerzia detto *Origine Internazionale Convenzionale* (*CIO*), riferito ad una fissata epoca.

### *3.18.5 - Tempo universale (UT)*

Il tempo universale è la misura del tempo per gli usi civili; esso è assimilabile al moto medio diurno del Sole. Il moto apparente diurno del Sole comprende sia la rotazione non uniforme della Terra che il suo moto di rivoluzione attorno al Sole; sebbene dovrebbe essere possibile la misura del tempo in termini dell'angolo orario del Sole, tale misura non potrebbe mai correlarsi con il tempo siderale e quindi non potrebbe essere determinato dai passaggi al meridiano delle stelle. Il risultato di ciò è che il tempo universale può essere associato a quello siderale per mezzo di relazioni numeriche.

Il tempo universale è perciò determinato mediante osservazioni del moto diurno della stelle o da radio sorgenti; la misura di *UT*, che dipende dalla località di misura, è indicata con la sigla *UT0*; correggendo questa misura dello spostamento in longitudine della località per il moto polare si ottiene il tempo *UT1* che risulta essere indipendente dalla località di osservazione ma che comunque è influenzato leggermente dalla anomalie delle rotazione terrestre. Dal I gennaio 1984 il tempo siderale medio di Greenwich (*GMST*) è stato associato al *UT1*.

### *3.18.6 - Il Tempo delle effemeridi (ET)*

La rotazione siderale della Terra non è costante e le sue variazioni non seguono una legge semplice, cosicché il tempo siderale legato alla sua rotazione non risponde alle necessità della *Meccanica Celeste*.

Nei problemi astronomici occorre invece un tempo uniforme, determinabile mediante osservazioni, che rappresenti nel migliore dei modi il tempo dinamico, nonché un istante iniziale di riferimento per cui $t=t_o=0$.

Il tempo dinamico è calcolato negli Osservatori Astronomici per mezzo della longitudine del Sole che può essere definita dal seguente sviluppo temporale:

$$\begin{aligned} l &= C_o + C_1 T + C_2 T^2 \\ C_o &= 270^o 41' 48''.04 \\ C_1 &= 129602768.13'' \\ C_2 &= 1.089'' \end{aligned} \tag{3.25}$$

con $T$ frazione di secolo giuliano (36525) all'epoca 1900, oppure dalla relazione:

$$l = a_o - \Delta_P = a_{\mathrm{om}} \tag{3.26}$$

dove $\alpha_o$ è l'ascensione retta del Sole e $\Delta_P$ rappresenta le ineguaglianze periodiche di questa.
Poiché la quantità:

$$a_o - \Delta_P$$

è determinabile sperimentalmente, indipendentemente dalla rotazione diurna terrestre, allora dalla (3.25) dopo la sostituzione (3.26) è possibile dedurre il tempo dinamico T. Questo tempo, in passato detto *newtoniano*, è oggi chiamato *Tempo delle Effemeridi* (*Ephemeris Time* , *ET*). L'origine è per definizione:

$$\text{1900(2000) Gennaio 0.5 ET} \tag{3.27}$$

istante in cui nella (3.25) si ha $\lambda = C_o$. Questo istante coincide con il mezzogiorno medio di Greenwich del 31 dicembre 1899(1999), origine del TU, ma non va confuso con esso. L'unità di misura introdotta, è stata definita nel 1956 dall'*Unione Astronomica Internazionale* (*UAI*) come la frazione 1/31556925.9747 dell'anno tropico, definito a sua volta come il tempo necessario affinché la longitudine media del Sole vari esattamente di $360^o$ , per il 1900 gennaio 0.5 ET. In pratica esiste una correzione da apportare all'*UT* per ottenere l'*ET*. La correzione:

$$\Delta_T ET - UT$$

è determinabile solo sperimentalmente. Le Effemeridi Astronomiche sono dunque riferite ad un meridiano (*Ephemeris Meridian*), variabile di anno in anno, che si trova a:

$$\Lambda_{EM} = 1.002739\Delta_T \quad \text{Est}$$

cioè ad Est del meridiano di Greenwich. Tuttavia, almeno nel contesto delle precisioni richieste nelle applicazioni nautiche, è possibile calcolare le effemeridi in base al Tempo delle Effemeridi ed assumere i valori ottenuti come relativi al meridiano fisso di Greenwich.

### *3.19 - La data giuliana (JD)*

In tutti i calcoli l'ET viene contato in frazione di secolo giuliano a partire dal 1900 (JD0) oppure dal 2000 (JD0) gennaio 0.5 ET . La relazione per il suo calcolo è:

$$T = \frac{(JD - JD0)}{36525} \tag{3.28}$$

essendo JD il giorno giuliano relativo alla data assegnata, JD0 il giorno giuliano relativo all'epoca di riferimento e 36525 il numero di giorni contenuti in un secolo giuliano. JD è dato dall'espressione (v. cap. III par.9):

$$JD = INT(365.25 \bullet anno) + INT(30.6001(mese + 1)) + giorno + 1720994.5 + UT \tag{3.29}$$

relativamente alla data giorno/mese/anno. Alla (3.26) va aggiunta la frazione di giorno data dalla quantità :

$$g = \left( \text{ora} + \frac{\dfrac{\text{minuti} + \dfrac{\text{secondi}}{60}}{60}}{24} \right) \qquad (3.30)$$

e, se la data non è gregoriana (ovvero se la data è posteriore al 4 ottobre 1582) la quantità :

$$B = 2 - INT(\frac{anno}{100}) + INT(\frac{INT(\frac{anno}{100})}{4}) \qquad (3.31)$$

All'epoca di riferimento del Tempo Effemeridi(ET) è JD0 = 2415020.0 ; in qualche caso JD0 può essere riferito all'Epoca di riferimento *J2000* (*JD0=2451545.0*).

Si noti che la (3.27) deve essere calcolata con il maggior numero possibile di cifre decimali, onde non introdurre nei calcoli eccessive approssimazioni. Infatti, T è espresso in frazione di secolo cosicché un suo valore fornito con 5 cifre decimali ( 0.00001) corrisponde ad un'approssimazione del tempo effemeridi pari a 0.37 giorni. Occorre, allora, definire la variabile *T* con un numero sufficiente di cifre significative. Ricordando che in un secolo giuliano vi sono:

$$36525g \times 86400s = 315500000s$$

allora il troncamento del tempo effemeridi alla decima cifra decimale produce un'approssimazione nel calcolo di 315500000 $10^{-10}$ = 0.03155s = 0.123''. Il risultato trovato significa che per limitare errori di troncamento occorre lavorare con almeno dodici cifre decimali significative. Nel calcolo di qualunque relazione astronomica su Personal Computer occorrerà sempre effettuare i calcoli con variabili in doppia precisione.

ESERCIZIO N.1. Calcolare il giorno giuliano per le seguenti date:

| data | giorno giuliano(JD) |
|---|---|

| | |
|---|---|
| 30/12/1971 | 2441315.5 |
| 30/12/1981 | 2444968.5 |
| 30/12/1991 | 2448620.5 |
| 30/12/2001 | 2452213.5 |
| 30/12/2011 | 2455925.5 |

ESERCIZIO N. 2. Calcolare il tempo effemeridi per i seguenti istanti di osservazione:

| Data | Ora | T |
|---|---|---|
| 30/12/1971 | 12.00 | 0.719931553703170 |
| 30/12/1981 | 12.00 | 0.819945242984257 |
| 30/12/1991 | 12.00 | 0.919931553730322 |
| 30/12/2001 | 12.00 | 1.01994524294257 |
| 30/12/2011 | 12.00 | 1.11993155373032 |

### *3.20 - Il tempo siderale a Greenwich.*

Il fatto che il punto vernale gamma $\gamma$ non sia fisso rispetto alle stelle (che in questa situazione può considerarsi come punto di riferimento) ha per conseguenza che il giorno siderale non coincide con il periodo di rotazione diurna della Terra. E più precisamente poiché il moto dell'equinozio è retrogrado, il giorno siderale è leggermente più breve del periodo di rotazione diurna terrestre. Inoltre il moto dell'equinozio non è uniforme e quindi il giorno siderale non ha durata costante. Riservandoci di tornare sull'argomento, l'Astronomia fornisce il polinomio temporale che permette di calcolare il tempo siderale medio a Greenwich, per una certa data e per l'istante UT=0:

$$q_o = C_o + C_1 T + C_2 T^2 \text{ con } C_0 = 6.6460656$$
$$C_1 = 2400.052262, C_2 = 0.00002581 \qquad (3.32)$$

di significato noto.

All'istante *UT* di osservazione:

$$GMST = q_o + 1.002737908 UT \qquad (3.33)$$

con *GMST* (*Greenwich Mean Sideral Time*). Dato che la (3.33) esprime $\theta_o$ in ore e decimi, anche *UT* dovrà essere espresso in ore e frazione di ore. Naturalmente, per i motivi prima esposti, occorrerà apportare alla (3.32) una correzione al fine di ottenere il tempo siderale apparente(*GAST*). Tale correzione, in secondi di tempo è:

$$\frac{\Delta\Psi \cos e}{15}$$

essendo $\Delta\Psi$ la nutazione in longitudine, che sarà trattata in seguito ed e-spressa in secondi d'arco ed $\varepsilon$ l'obliquità media dell'eclittica fornita in gradi dalla:

$$e_m = 23.452294 - 0.0130125T - 0.00000164T^2 + 0.000000503T^3 \qquad (3.34)$$

La (3.33) deve essere ridotta all'intervallo (0-24) ed espressa in ore, minuti e secondi.

ESERCIZIO N.4 Calcolare il tempo sidereo apparente di Greenwich per i seguenti istanti di osservazione:

| ***Data*** | ***Ora(GMT)*** | ***T*** | ***GAST*** |
|---|---|---|---|
| 30/12/1971 | 12 00 00 | 0.719931553703170 | 278° 11.6' |
| 30/12/1981 | 12 30 20 | 0.819959508961306 | 286° 26.6' |
| 30/12/1991 | 18 40 10 | 0.919952851294143 | 18° 44.8' |
| 30/12/2001 | 06 15 30 | 1.019952382310437 | 192° 37.9' |
| 30/12/2011 | 12 00 00 | 1.11993155373032 | 278° 35.1' |