CAPITOLO 2

LA MISURA DEL TEMPO

La lunghezza di un minuto dipende dal lato della porta del bagno in cui ti trovi.

(*Ballance*)

2.1 L'Anno

Si definisce *anno siderale* il tempo necessario alla Terra per compiere una rivoluzione completa intorno al Sole rispetto alle stelle fisse. In altre parole, dopo un anno siderale il Sole torna ad essere visto dalla Terra nella stessa posizione rispetto alle stelle fisse. Un anno siderale dura $365^d\ 06^h\ 09^m\ 09^s{,}5$ circa.

Si definisce *anno tropico* l'intervallo di tempo tra due successivi equinozi di primavera. Dal punto di vista dell'osservatore terrestre, dopo un anno tropico il Sole si ritrova al punto d'Ariete. L'anno tropico coinciderebbe con quello siderale se non esistessero delle irregolarità del moto della Terra, la più importante delle quali è il *moto di precessione.*

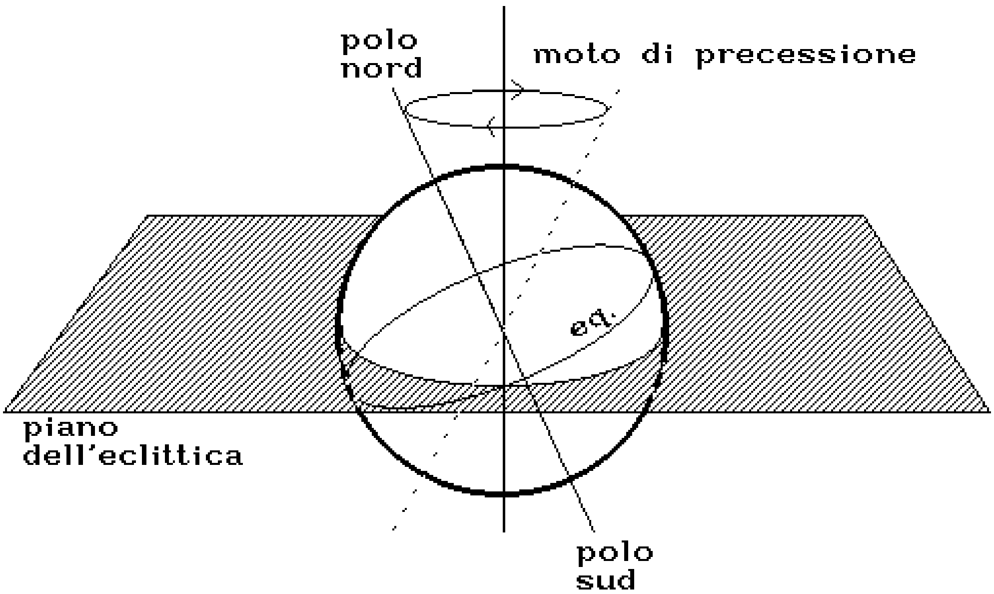

Figura 2.1

La Terra, come è noto, non è perfettamente sferica, bensì risulta schiacciata ai poli. Il Sole e la Luna esercitano delle forze sul rigonfiamento equatoriale col risultato di provocare un moto simile a quello di una trottola il cui asse di rotazione sia spostato dalla verticale. L'asse terrestre, inclinato di 23°27' rispetto alla normale al piano dell'eclittica, descrive nel suo moto una superficie conica intorno al *polo dell'eclittica* (l'intersezione tra la normale al piano dell'eclittica e la sfera celeste), il cui semiangolo al vertice è appunto 23°27' (fig. 2.1).

L'asse terrestre presenta poi un ulteriore moto, detto *nutazione*, causato dall'attrazione lunare sul rigonfiamento equatoriale della Terra. La nutazione è una piccola oscillazione di ampiezza 9" e periodo 18,6 anni che, combinandosi col moto di precessione, fa sì che la superficie conica descritta dall'asse terrestre non sia liscia ma leggermente "increspata".

Contemporaneamente, anche l'intersezione tra il piano dell'eclittica e il piano equatoriale (il punto d'Ariete) si muove, poiché è vincolata a rimanere sempre perpendicolare all'asse terrestre. Lo spostamento del punto d'Ariete è di circa 50" all'anno in senso opposto a quello di rivoluzione della Terra. Ciò vuol dire che per tornare al punto d'Ariete la Terra non deve compiere 360° intorno al Sole, ma soltanto 359°59'10". Ciò avviene, per l'appunto, in un anno tropico, la cui durata (determinabile con una semplice proporzione) è di $365^d\ 05^h\ 48^m\ 45^s,2$ circa.

> **Problema 2.1.** Qual è, approssimativamente, il periodo del moto di precessione, cioè il tempo impiegato dal polo Nord celeste a descrivere la sua traiettoria completa intorno al polo dell'eclittica?

Conseguenza fondamentale del moto di precessione è lo spostamento del punto equinoziale sulla sfera celeste (*precessione degli equinozi*). Questo fenomeno, sebbene di piccola entità ed evidente solo in tempi lunghissimi, fu scoperto dall'astronomo greco Ipparco di Nicea già nel II secolo a.C..

Duemila anni fa, quando in Grecia nasceva l'astronomia occidentale e, con essa, prendevano forma le costellazioni, il punto equinoziale segnava la fine della costellazione dei Pesci e l'inizio di quella dell'Ariete (da cui il nome di punto d'Ariete). Oggi, per effetto del lento moto di precessione, esso si è spostato di oltre 25° e si trova in piena costellazione dei Pesci.

Poiché il moto di precessione non è "riconosciuto" dagli astrologi, al giorno d'oggi esiste una marcata differenza tra i *segni* e le *costellazioni* dello *zodiaco*. Nella figura 2.2 e nella tabella 2.1 sono mostrati lo zodiaco degli astrologi (internamente) e quello degli astronomi (esternamente).

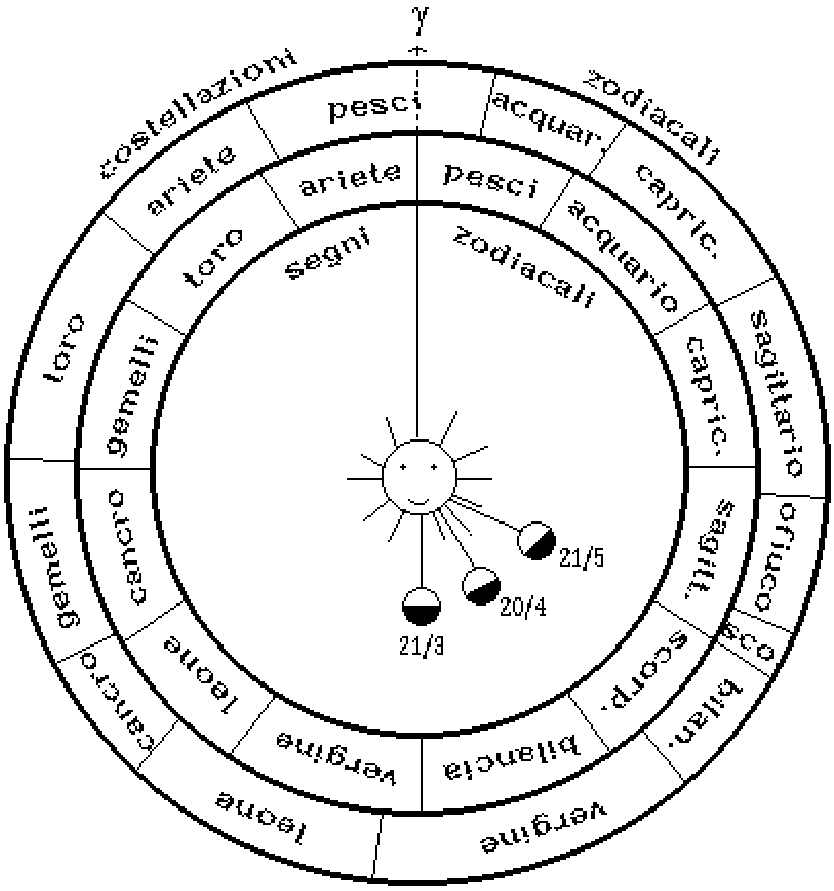

Figura 2.2

Tabella 2.1 - Lo Zodiaco astronomico

Costellazione	**Periodo**
Ariete	18 aprile – 13 maggio
Toro	14 maggio – 19 giugno
Gemelli	20 giugno – 17 luglio
Cancro	18 luglio – 7 agosto
Leone	8 agosto – 12 settembre
Vergine	13 settembre – 27 ottobre
Bilancia	28 ottobre – 19 novembre
Scorpione	20 novembre – 27 novembre
Ofiuco	28 novembre – 15 dicembre
Sagittario	16 dicembre – 18 gennaio
Capricorno	19 gennaio – 16 febbraio
Acquario	17 febbraio – 11 marzo
Pesci	12 marzo – 18 aprile

Un'ulteriore conseguenza della precessione degli equinozi è che per evitare un progressivo sfasamento delle stagioni, i calendari devono basarsi sull'anno tropico e non sull'anno siderale.

Il calendario giuliano, istituito da Giulio Cesare nel 45 a.C., contava 365 giorni. Ogni quattro anni, per tener conto delle frazioni di tempo in più, veniva eccezionalmente inserito un giorno tra il 24 e il 25 febbraio (*dies bissextus*, così chiamato perché il 24 febbraio, *dies sextus ante calendas martias*, veniva ripetuto due volte). L'*anno giuliano* veniva così a durare, in media, $365^d\ 06^h$, ossia circa $11^m\ 15^s$ più dell'anno tropico. Come è facile calcolare, questa differenza comportava un anticipo dell'equinozio di primavera di un giorno ogni 128 anni circa.

Sebbene già nell'VIII secolo d.C. il filosofo ed astronomo inglese Beda avesse evidenziato il problema dello sfasamento del calendario giuliano in séguito alla precessione degli equinozi, si dovette arrivare al 1582 perché papa Gregorio XIII decretasse la riforma del calendario, che così prese la forma attuale – ed il suo nome.

A quell'epoca, l'anticipo dell'equinozio di primavera, fissato al 21 marzo dal Concilio di Nicea (325 d.C.), era di

$$(1582 - 325) \times 11^m\ 15^s \ = \ 235^h\ 41^m\ 15^s$$

ossia poco meno di 10 giorni!

La riforma stabilì che, per perdere i giorni di troppo, si saltasse dalla mezzanotte del 4 ottobre 1582 all'ora zero del 15 ottobre successivo. Tale modifica, da sola, non sarebbe bastata, perché continuando a seguire il calendario giuliano si sarebbe presentato ben presto un nuovo anticipo. Perciò, la commissione di astronomi incaricata di redigere il nuovo calendario, guidata da Christopher Clavius (1537-1612), decise di eliminare tre anni bisestili (nella fattispecie, quelli secolari non divisibili per 400) ogni quattro secoli.

Problema 2.2. Qual è la durata media di un anno gregoriano?

Il calendario *gregoriano* non elimina completamente il problema della precessione, anche se con esso si ha soltanto un giorno d'anticipo ogni 3226 anni. In epoca moderna, si è provveduto ad introdurre ulteriori regole per eliminare anche questo sfasamento, stabilendo, tra l'altro, che gli anni millenari divisibili per 4000 siano comuni anziché bisestili.

Problema 2.3. In che giorno cadeva l'equinozio di primavera nel 45 a.C.?

2.2 La Data Giuliana

Per la soluzione di molti problemi di astronomia è necessario determinare quanto tempo è intercorso tra due date spesso molto distanti fra loro. Per evitare le complicazioni insite in questo calcolo, Giuseppe Scaligero, un umanista del XVI secolo, ideò la *data giuliana* (che non ha niente a che spartire con il calendario giuliano).

In pratica, e molto semplicemente, lo Scaligero non fece altro che scegliere una "data zero" molto lontana nel passato, e attribuire ad ogni giorno successivo un numero progressivo, in modo che la distanza tra due date potesse essere calcolata facendo banalmente la differenza tra esse.

La "data zero" è il mezzogiorno a Greenwich del 1° gennaio del 4713 a.C., data scelta in modo che tutte le osservazioni di cui esiste testimonianza scritta avessero data giuliana positiva[1].

La data giuliana (spesso abbreviata in JD, *Julian Date*) può essere determinata utilizzando la tabella 2.2.

Tabella 2.2 - La data giuliana

Anno		**Gen**	**Feb**	**Mar**	**Apr**	**Mag**	**Giu**	**Lug**	**Ago**	**Set**	**Ott**	**Nov**	**Dic**
1990	2447000	892	923	951	982	1012	1043	1073	1104	1135	1165	1196	1226
1991	2448000	257	288	316	347	377	408	438	469	500	530	561	591
1992		622	653	682	713	743	774	804	835	866	896	927	957
1993		988	1019	1047	1078	1108	1139	1169	1200	1231	1261	1292	1322
1994	2449000	353	384	412	443	473	504	534	565	596	526	657	687
1995		718	749	777	808	838	869	899	930	961	991	1022	1052
1996	2450000	083	114	143	174	204	235	265	296	327	357	388	418
1997		449	480	508	539	569	600	630	661	692	722	753	783
1998		814	845	873	904	934	965	995	1026	1057	1087	1118	1148
1999	2451000	179	210	238	269	299	330	360	391	422	452	483	513
2000		544	575	604	635	665	696	726	757	788	818	849	879
2001		910	941	969	1000	1030	1061	1091	1122	1153	1183	1214	1244
2002	2452000	275	306	334	365	395	426	456	487	518	548	579	609
2003		640	671	699	730	760	791	821	852	883	913	944	974
2004	2453000	005	036	065	096	126	157	187	218	249	279	310	340
2005		371	402	430	461	491	522	552	583	614	644	675	705

Il procedimento è semplice e lo illustriamo con un esempio. Si voglia calcolare la data giuliana corrispondente alle 18^h del 13 settembre 1999. All'incrocio tra la riga "1999" e la colonna "Set" si legge il numero 422. Ad esso va sommato il numero nella seconda colonna (dove non c'è, conta quello immediatamente sopra), nel nostro caso 2451000, e il giorno, 13, ottenendosi così 2451435. Questa è la data giuliana a mezzogiorno del 13

[1] Ovviamente, nel 4713 a.C. non esistevano né il primo gennaio, né tantomeno Londra o Greenwich; si tratta di un'estrapolazione all'indietro del calendario gregoriano

settembre 1999. Noi però vogliamo la data giuliana alle 18^h di quel giorno: poiché dalle 12^h alle 18^h sono passati 6/24 = 1/4 di giorno, alle 18^h del 13 settembre 1999 è JD = 2451435,25.

> **Problema 2.4.** Determinare la data giuliana relativa alle 0^h del 1° gennaio 1999.

Un algoritmo matematico per determinare la data giuliana è riportato in appendice D.

2.3 Le Stagioni

L'inizio delle stagioni è univocamente determinato una volta fissata la posizione del punto d'Ariete. I punti equinoziali e solstiziali sono situati a 90° di distanza l'uno dall'altro lungo l'orbita terrestre.

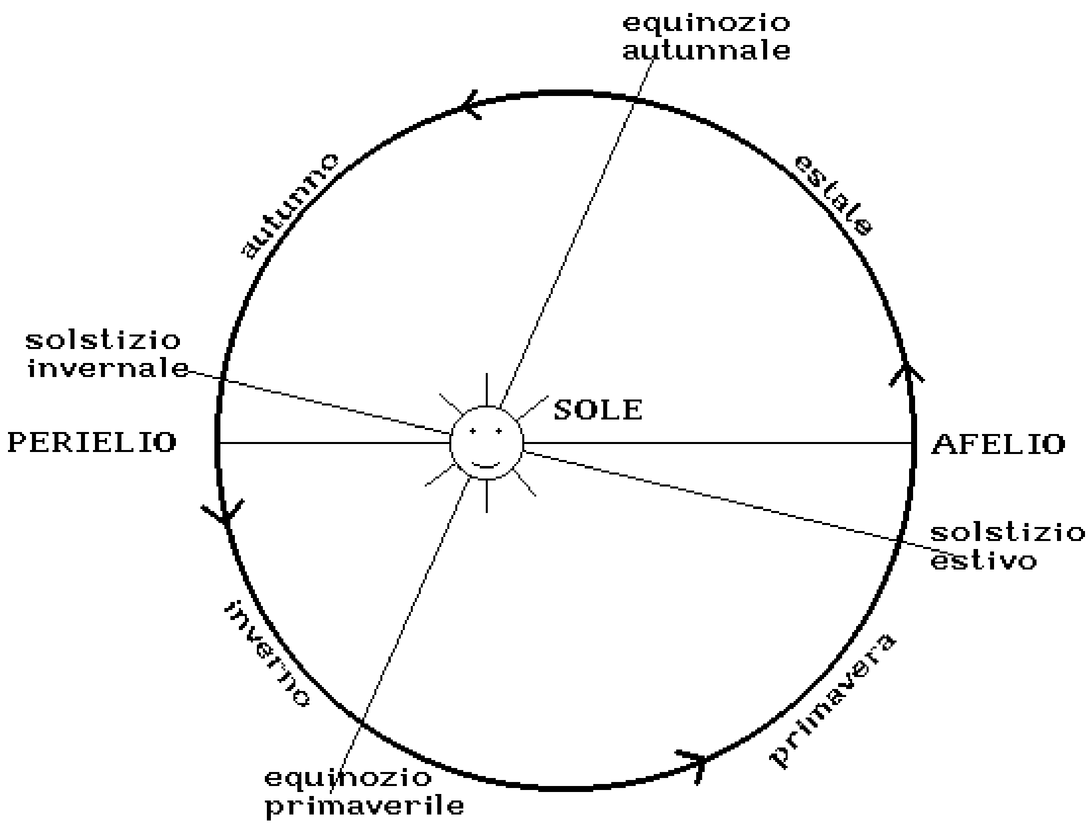

Figura 2.3

Poiché la velocità di orbitazione della Terra non è costante, le stagioni hanno durata differente. In particolare, la Primavera dura attualmente 92^d 18^h, l'Estate 93^d 16^h, l'Autunno 89^d 20^h e l'Inverno 89^d 00^h. "Attualmente", perché la precessione degli equinozi, facendo spostare il punto d'Ariete di 50" all'anno in senso orario (*retrogrado*), determina una variazione del trat-to di orbita corrispondente alle singole stagioni, e quindi della loro durata.

A questo, si aggiunge un ulteriore importante fenomeno: a causa delle perturbazioni causate dagli altri pianeti, l'orbita terrestre non è chiusa (fig. 2.4).

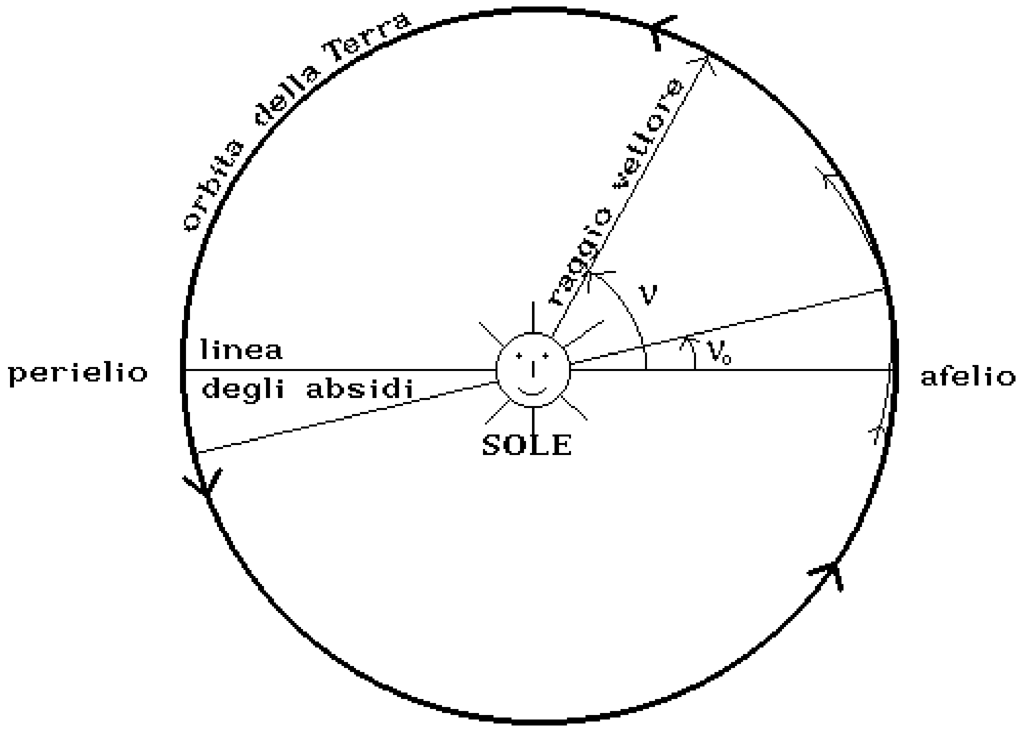

Figura 2.4

La *linea degli absidi*, congiungente *afelio* e *perielio* (rispettivamente i punti più vicino e più lontano dal Sole, anche chiamati *absidi* dell'orbita), ruota lentamente sul piano dell'eclittica in senso concorde con il moto della Terra (o *diretto*), facendo spostare questi punti di circa ν_0 = 11",3 ogni anno (esagerati per chiarezza in figura). Perciò, per tornare al perielio, la Terra dovrà percorrere quest'ulteriore arco di orbita, cosa che fa in circa 4^m $43^s,5$.

Si definisce allora *anno anomalistico* l'intervallo tra due successivi passaggi della Terra al perielio. Per quanto detto, esso ha una durata di circa $365^d\ 06^h\ 13^m\ 53^s$. Il nome anomalistico deriva dal fatto che l'angolo ν tra il raggio vettore e la direzione del perielio si chiama *anomalia*, e quindi l'anno anomalistico è il tempo che occorre alla Terra per avere nuovamente la stessa anomalia.

Per effetto del moto di precessione e dello spostamento della linea absidale, ogni anno il perielio si allontana di 50" + 11",3, ossia circa 1' dall'equinozio di primavera. In corrispondenza di ciò, inverno e primavera si accorciano mentre estate ed autunno si allungano. L'entità di tali variazioni è dell'ordine di 1^h ogni secolo.

Come si vede dalla fig. 2.3, al solstizio d'inverno la Terra si trova in prossimità del perielio. Nonostante la minor distanza dal Sole, l'inverno è la stagione più fredda a causa dell'inclinazione dell'asse terrestre.

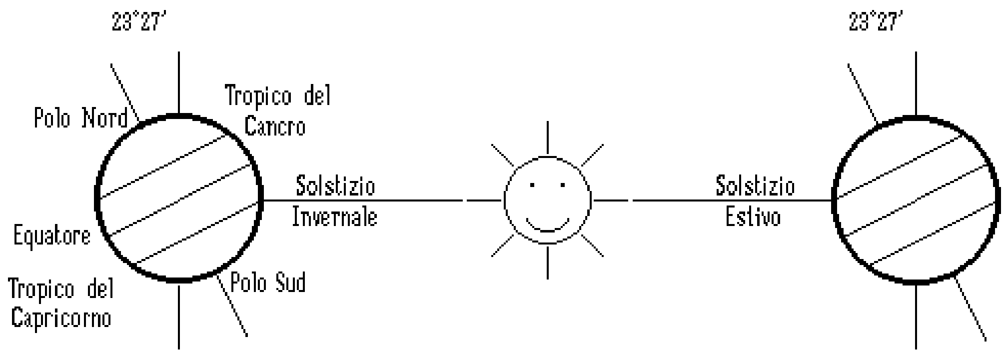

Figura 2.5

Al solstizio invernale, il raggio vettore Terra-Sole forma, rispetto al piano equatoriale, un angolo di –23°27' e perciò il Sole è basso sull'orizzonte nell'emisfero boreale. Al solstizio estivo, il suddetto angolo è +23°27' e quindi il Sole è più alto. Ovviamente, per l'emisfero australe valgono considerazioni opposte (fig. 2.5).

Le conseguenze di ciò sono due: una maggior permanenza del Sole sopra l'orizzonte, ed un minor tragitto dei raggi solari nell'atmosfera. Entrambi questi fattori fanno sì che d'estate arrivi al suolo una maggiore quantità di energia solare che non d'inverno. Il fatto poi che i giorni più caldi e quelli più freddi seguano i solstizi è legato all'*inerzia termica* dell'atmosfera, che impiega un po' di tempo a riscaldarsi e raffreddarsi.

Problema 2.5. Determinare le massime altezze raggiunte dal Sole nei giorni dei solstizi e degli equinozi nelle seguenti località: polo Nord, circolo polare artico, Roma (latitudine 42°), tropico del Cancro, equatore, tropico del Capricorno, circolo polare antartico, polo Sud.

2.4 Tempo Solare Locale Medio e Tempo Universale.

Al § 1.4 abbiamo definito il giorno siderale come il tempo impiegato dalla Terra per compiere una rotazione completa intorno al suo asse rispetto alle stelle fisse. Un giorno siderale dura poco meno di un giorno solare, ed esattamente:

$$\begin{aligned}1 \text{ giorno siderale medio} &= 23^h\,56^m\,04^s{,}09054 = \\ &= 0{,}9972695664 \text{ giorni solari medi}\end{aligned}$$

Equivalentemente,

$$1 \text{ giorno solare medio} = 24^h = 1{,}0027379093 \text{ giomi siderali medi}$$

Abbiamo così definito dei tempi medi. Ma due giorni solari non avranno mai esattamente la stessa durata a causa della non costante velocità orbitale della Terra (conseguenza del fatto che la sua orbita è ellittica) e dell’inclinazione del suo asse rispetto al piano dell’eclittica.

Per evitare irregolarità nella lunghezza di un giorno solare, si definisce un *giorno solare medio* supponendo che l’asse terrestre sia perpendicolare al piano dell’orbita e che quest’ultima sia circolare. In tal modo, un normale orologio che conta 24 ore in un giorno solare medio, batterà il mezzodì – ossia l’istante dell’effettivo passaggio del Sole al meridiano locale – un po’ prima in certi periodi dell’anno e un po’ dopo in altri. La differenza massima tra il mezzogiorno solare apparente e il mezzogiorno solare vero (detta *equazione del tempo*) è di circa 15^m in più o in meno.

Il “mezzogiorno”, così come ogni altra ora segnata dal Sole, è un fatto locale, nel senso che avviene in istanti diversi da luogo a luogo. La superficie terrestre è divisa convenzionalmente in 24 fusi orari, ciascuno dell’ampiezza di 15° (in longitudine). Il Tempo Solare Locale Medio (TSLM) di ogni fuso differisce da quello del fuso adiacente di 1 ora. Il TSLM del meridiano di Greenwich è preso come riferimento ed è chiamato *Tempo Universale* (TU), o anche Tempo Medio di Greenwich (Greenwich Mean Time, GMT)[2].

[2] In realtà gli astronomi adottano un riferimento temporale ancora più preciso del TU detto *Tempo Dinamico* (TD) che è basato sui moti planetari. A causa di irregolarità a lungo termine del moto della Terra il periodo di rotazione tende a variare nel corso dei secoli. La correzione apportata dal TD rispetto al TU è, per ogni anno, dell’ordine di pochi decimi di secondo.

Il tempo relativo ad un particolare fuso orario può essere convertito in TU semplicemente aggiungendo o sottraendo un determinato numero di ore. Ulteriori dettagli in proposito si trovano in appendice C.

2.5 Determinazione del Tempo Siderale di Greenwich

Si definisce *Tempo Siderale di Greenwich* l'angolo, misurato in ore e minuti, tra la direzione del punto d'Ariete e il meridiano di Greenwich (fig. 2.6).

La determinazione dell'angolo θ_G è di fondamentale importanza in astronomia. Infatti, come abbiamo già detto al capitolo precedente, esso rappresenta l'ascensione retta delle stelle che passano al meridiano nell'istante considerato. Abbiamo quindi bisogno di un metodo conveniente per calcolarlo per una qualsiasi data ed ora.

Se conosciamo il valore di θ_G per una particolare ora di un particolare giorno dell'anno, possiamo calcolare il suo valore per un qualsiasi istante futuro dal momento che in un giorno la Terra compie 1,0027379093 giri intorno al suo asse.

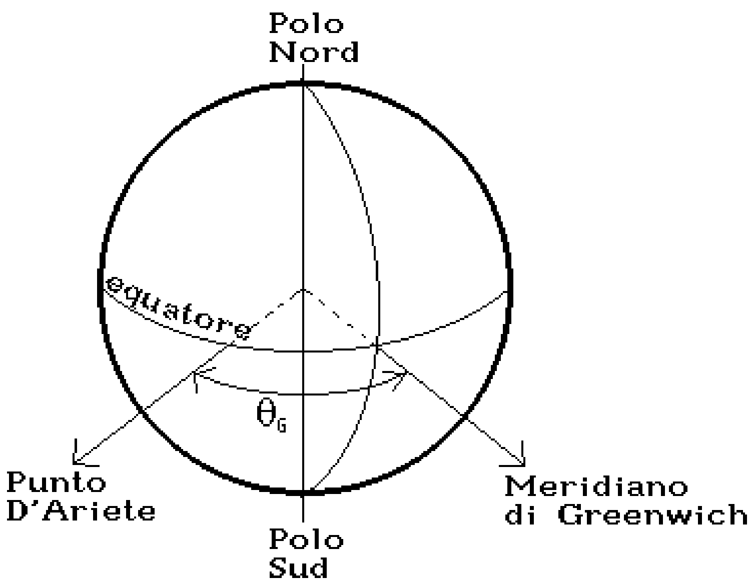

Figura 2.6

Supponiamo allora di conoscere il valore di θ_G alle 0^h di TU del 1° Gennaio di un certo anno, e indichiamo il suo valore con θ_{G0}. Calcoliamo poi, con l'aiuto della data giuliana, quanti giorni e frazioni di giorno sono passati da quel 1° Gennaio al momento di cui si vuol calcolare il tempo siderale. Indicando con D questo numero, è

$$\theta_G = \theta_{G0} + 1{,}0027379093 \times D$$

La parte frazionaria di θ_G è il tempo siderale a Greenwich all'istante considerato.

Il valore di θ_{G0} è riportato negli almanacchi. Alcuni suoi valori per i prossimi anni sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 2.3
Tempo Siderale a Greenwich alle 0^h TU del 1° Gennaio

Anno	θ_{G0}	Anno	θ_{G0}
1993	$6^h\ 42^m\ 36^s$	1999	$6^h\ 40^m\ 50^s$
1994	$6^h\ 41^m\ 40^s$	2000	$6^h\ 39^m\ 52^s$
1995	$6^h\ 40^m\ 42^s$	2001	$6^h\ 42^m\ 52^s$
1996	$6^h\ 39^m\ 45^s$	2002	$6^h\ 41^m\ 54^s$
1997	$6^h\ 42^m\ 44^s$	2003	$6^h\ 40^m\ 57^s$
1998	$6^h\ 41^m\ 47^s$	2004	$6^h\ 40^m\ 00^s$

Con la tabella e la formula precedenti è possibile calcolare il valore di θ_G per un qualsiasi giorno dell'anno: ad es., per il 13 settembre 1999 alle 18^h TU (v. § 2.2 e Problema 2.4), risulta

$$\begin{aligned}
\theta_{G0} &= 6^h\ 40^m\ 50^s = 0^d{,}278356 \\
D &= 2451435{,}25 - 2451179{,}50 = 255^d{,}75 \\
\theta_G &= 0^d{,}278356 + 1{,}0027379093 \times 255^d{,}75 = 256^d{,}72858 = \\
&= (256^d)\ 17^h\ 29^m\ 09^s
\end{aligned}$$

2.6 Calcolo del Tempo Siderale Locale

Si definisce *tempo siderale locale* l'angolo, misurato sempre in ore e minuti, tra la direzione del punto d'Ariete e il meridiano locale.

Nella fig. 2.7, λ è la longitudine. Come già osservato nel cap. 1, le longitudini delle località poste a Est di Greenwich sono positive, quelle delle località a Ovest sono negative. Roma, ad es., ha una longitudine λ = 12°29' Est di Greenwich, ossia +12°29'.

Come si vede dalla figura, il tempo siderale locale non è altro che la somma di tempo siderale di Greenwich e longitudine:

$$\theta_L = \theta_G + \lambda = \theta_{G0} + 1{,}0027379093 \times D + \lambda$$

Naturalmente, λ va espresso nelle stesse unità di θ_G; a tal proposito, ricordiamo che $1° = 4^m$ e che $1^h = 15°$ (v. appendice B).

Noto perciò θ_G, è immediato determinare il tempo siderale locale. Il tempo siderale locale a Roma nel caso dell'esempio precedente è

$$\begin{aligned}\theta_L &= (256^d)\ 17^h\ 29^m\ 09^s + (12°29' / 15°)^h = \\ &= 17^h\ 29^m\ 09^s + 0^h\ 49^m\ 56^s = \\ &= 18^h\ 19^m\ 05^s\end{aligned}$$

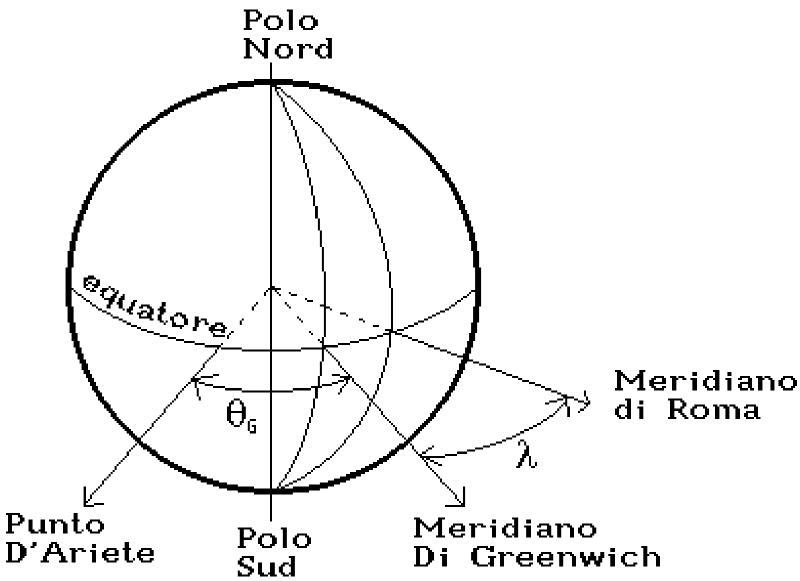

Figura 2.7

Va detto che il metodo ora illustrato per il calcolo del tempo siderale locale fornisce un tempo medio, non tenendo conto dei moti secondari della Terra e delle variazioni della velocità orbitale. Tuttavia, di solito l'errore commesso è molto piccolo (nell'esempio di calcolo è inferiore a 1^s) ed ampiamente trascurabile. Rimandiamo, per ulteriori approfondimenti, all'appendice D dove viene presentato un algoritmo più "sofisticato".

Problema 2.6. Il prossimo transito di Venere sul Sole si verificherà l'8 giugno 2004 (l'ultimo è stato nel 1882), con inizio alle $5^h\,30^m$ e fine alle $11^h\,00^m$ TU. Sapendo che in quell'occasione l'ascensione retta di Venere sarà $\alpha = 5^h\,07^m$, dire se il fenomeno sarà visibile da Roma.