

Capitolo 2

La Terra e i suoi movimenti^[1]

2.1 – Parametri fisici della Terra

La Terra è il terzo pianeta a partire dal Sole. È il più grande dei pianeti rocciosi.

Il semiasse maggiore della sua orbita è di $149\,597\,870\,691$ m. Ha la forma di una sfera leggermente schiacciata ai poli: il raggio è massimo all'equatore ed è

$$R_E = 6\,378\,137 \text{ m}$$

e minimo ai poli dove è

$$R_P = 6\,356\,752 \text{ m}$$

La differenza è di $21\,385$ m. Lo schiacciamento è:

$$\frac{R_E - R_P}{R_E} \approx \frac{1}{298} \approx 0,003353.$$

In molti calcoli la Terra viene considerata come una sfera di raggio $R = 6\,372\,797$ m (questo valore è in effetti il raggio medio). Tali valori del raggio portano al fatto che la lunghezza dell'equatore è di $40\,075\,017$ m, mentre la lunghezza del Circolo Meridiano (una circonferenza passante per i poli) è di $39\,940\,650$ m.

La superficie totale della Terra è di $509\,495\,000 \text{ km}^2$ dei quali $361\,640\,000 \text{ km}^2$ (circa il 70,98%) sono ricoperti dal mare, mentre il restante 29,02%, pari a $147\,855\,000 \text{ km}^2$, è la superficie delle terre emerse.

La profondità media degli oceani è di $3\,794$ m, con un massimo di $10\,924$ m nella Fossa delle Marianne. L'altezza media dei continenti, sul livello del mare, è di 874 m, il massimo è il Monte Everest alto $8\,850$ m.

Il volume totale della Terra è di $1,08 \cdot 10^{12} \text{ km}^3$, di cui gli oceani occupano solo $1,37 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ pari allo 0,126%.

La massa complessiva della Terra è di $5,9726 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, il che significa che la densità media è di $5\,515 \text{ kg/m}^3$ (si ricordi che l'acqua ha una densità di $1\,000 \text{ kg/m}^3$).

L'accelerazione di gravità varia in funzione della latitudine, è minima all'equatore e massima ai poli, ma varia anche con l'altezza. Un'espressione che ne consente il calcolo (in metri su secondo al quadrato) è data da:

$$g = 9,7803184 \cdot (1 + A \sin^2 \varphi - B \sin^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} h$$

dove $A = 0,0053024$, $B = 0,0000059$, φ è la latitudine del luogo e h l'altezza in metri sul livello del mare.

Il valore medio è $g_0 = 9,8091 \text{ m/s}^2$ [2], il valore minimo all'equatore è $g_E = 9,7803 \text{ m/s}^2$ e un valore massimo ai poli: $g_P = 9,8322 \text{ m/s}^2$.

La velocità di fuga all'equatore è $v_F = 11,18 \text{ km/s} = 40\,248 \text{ km/h}$.

La temperatura superficiale media è di 15°C con valori estremi che possono raggiungere $+60^\circ\text{C}$ e



Figura 2.1 – La Terra dallo spazio ripresa dall'Apollo 17 nel 1972

[1] Le figure 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 di questo capitolo sono tratte dal libro Accordi, Lupia Calmieri, Parlotto: Il Globo Terrestre, Zanichelli

[2] Considerando la Terra una sfera di raggio pari al raggio medio.

– 90°C.

La Terra ha un unico satellite naturale: la Luna. L'esplorazione spaziale ha creato una gran quantità di detriti spaziali di varie dimensioni che orbitano intorno alla Terra. Il Comando Strategico degli Stati Uniti è in possesso di un catalogo contenente circa 13000 oggetti. Alla metà del 2009 la NASA quantificava in 19000 il numero di detriti di dimensioni superiori ai 10 cm, a 500000 quelli compresi tra 1 e 10 cm e stimava in svariate decine di milioni quelli più piccoli. Secondo l'ESA, in orbita, ci sono più di 600000 oggetti di dimensioni superiori al centimetro. Nel 2000 si stimava che circa 1500 oggetti avessero una massa superiore a 100 kg e che contribuissero al 98% del totale della massa dei detriti in orbita bassa^[3]. Questi detriti su orbita bassa sono distribuiti su un guscio sferico tutt'attorno alla Terra. Alla distanza di 36000 km si trovano i satelliti geostazionari che sono concentrati sul piano equatoriale a formare un vero e proprio anello.



2.2 – Il moto di rotazione

2.2.1 – Generalità

Uno dei principali moti della Terra è il moto di rotazione che essa compie intorno al proprio asse, da ovest verso est, cioè in senso inverso all'apparente moto diurno della Sfera Celeste e del Sole. La durata di questo movimento, che si può ritenere praticamente uniforme, è di 23,9344726 ore = 23h 56min 4,1s.

Ogni punto della Terra compie in un giorno un intero giro di 360°, quindi, qualunque sia la lunghezza del parallelo da esso descritto, la velocità angolare di rotazione è identica a tutte le latitudini ed è pari a 15° ogni ora. La velocità periferica (ossia la distanza percorsa da un punto della superficie nell'unità di tempo) è invece variabile con la latitudine λ :

$$[0.1] \quad v(\lambda) = \frac{2\pi R_e}{T} \cos \lambda$$

essa è massima all'Equatore, dove raggiunge il valore di circa 465 m/s (= 1674 km/h), e va diminuendo verso i poli, dove diventa nulla; alla latitudine di Camerino (Lat: 43°08'23" Long: 13°04'04") la velocità è di 339 m/s (= 1221 km/h).

Con il diminuire della velocità periferica diminuisce la forza centrifuga a cui sono sottoposti i vari punti della superficie terrestre per effetto della rotazione, mentre parallelamente va aumentando la

^[3] Per orbita bassa si intende un'orbita compresa tra l'atmosfera e le fasce di van Allen, ossia tra i 160 e i 2000 km.

forza di gravità.

Il movimento di rotazione della Terra non avviene in maniera perfettamente uniforme, infatti, le misure della sua durata, eseguite con «orologi atomici» di altissima precisione hanno dimostrato l'esistenza di diverse piccolissime variazioni. Le osservazioni astronomiche moderne e antiche ed alcune prove paleontologiche, hanno evidenziato un graduale rallentamento della velocità di rotazione per cui la durata del movimento si allungerebbe di circa 2 millesimi di secondo per secolo. Questo rallentamento si spiega con l'attrito delle maree; la Luna infatti esercita un'azione frenante sulla Terra, perché questa ruota su se stessa più velocemente di quanto non faccia la Luna nel suo moto di rivoluzione intorno alla Terra. Nella sua rotazione la Terra tende a trascinarsi dietro i rigonfiamenti delle maree, mentre la Luna esercita un'attrazione maggiore proprio su di essi e quindi si oppone al trascinamento e rallenta la rotazione terrestre; come conseguenza si ha anche, per reazione, un'accelerazione della Luna sulla sua orbita ed un aumento della forza centrifuga che tende ad allontanare la Luna dalla Terra. Ciò dovrebbe verificarsi fino a che la durata della rivoluzione della Luna attorno alla Terra non diverrà uguale alla durata della rotazione terrestre: allora la Terra presenterà alla Luna sempre la stessa faccia e terminerà l'effetto di frenamento della Luna. Ammettendo che l'attrito delle maree sia stato sempre lo stesso e che la Luna e la Terra abbiano avuto un'origine comune, si calcola che per raggiungere la posizione attuale la Luna dovrebbe aver impiegato circa 4 miliardi di anni.

Anche se in pratica possono essere considerate trascurabili queste variazioni non consentono di fissare l'unità di misura del tempo basandosi sulla effettiva durata della rotazione terrestre^[4].

2.2.2 – Prove della rotazione terrestre

Al movimento di rotazione della Terra si era pensato già nell'antichità, ma è dovuto passare molto tempo prima che l'idea potesse essere accettata da tutti. In effetti, se non si tiene conto della gravità terrestre, con un ragionamento semplicistico si può essere indotti a pensare che la rotazione terrestre debba portarci alternativamente con la testa «verso il basso» e «verso l'alto»; è evidente però che i concetti di «alto» e «basso» riferiti al Cosmo non hanno alcun senso perché qualunque sia il movimento che la Terra compie nello spazio, la nostra posizione rispetto ad essa, che ci attrae, rimane sempre invariata. Ma gli antichi non erano a conoscenza della gravità terrestre e quindi per loro era più facile credere alla sfericità di una Terra immobile e disabitata nelle regioni poste «al di sotto» del mondo allora conosciuto, piuttosto che ammettere la rotazione del nostro pianeta.

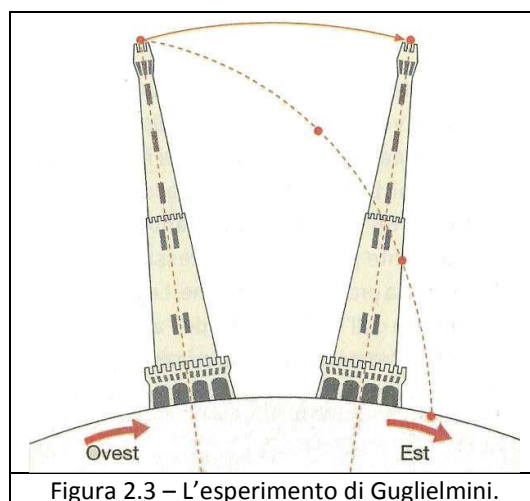


Figura 2.3 – L'esperimento di Guglielmini.

I nostri sensi non possono avere alcuna percezione diretta della rotazione terrestre, alla quale partecipiamo anche noi; tuttavia abbiamo ormai numerosissime prove di questo movimento.

Una prima prova si può desumere dall'esame dell'apparente spostamento dei corpi celesti da est verso ovest. A prima vista questo spostamento potremmo spiegarlo indifferentemente sia con un movimento di rotazione degli astri intorno alla Terra, sia con una rotazione in senso contrario (cioè da ovest verso est) della Terra su se stessa. Però, dato che i vari corpi celesti non sono fissati su una sfera, ma si trovano a distanze molto diverse da noi, per ammettere che siano essi a girare intorno alla Terra bisognerebbe ammettere che gli astri abbiano velocità esattamente proporzionali alle loro distanze dall'asse terrestre, perché altrimenti non li vedremmo muoversi tutti insieme solidalmente; quindi i corpi celesti più lontani, che distano da noi milioni di anni-luce, dovrebbero avere velocità assai maggiori di quella della luce.

Un'altra prova indiretta della rotazione terrestre può essere ricavata dall'analogia con gli altri pianeti: tutti quanti mostrano un evidente moto rotatorio assiale e non abbiamo motivo per ritenere

[⁴] Vedi capitolo 3.

che solo il nostro pianeta debba esserne privo.

Altre prove possiamo dedurle da alcuni esperimenti di Fisica eseguiti sulla Terra stessa. Uno di questi si basa sull'osservazione della caduta libera dei corpi: un grave che viene lasciato cadere da un punto elevato sulla superficie terrestre (per esempio, dalla sommità di un'alta torre) devia dalla verticale del punto di partenza e giunge sul suolo spostato verso est. Questo fenomeno era già stato previsto da Galileo ed enunciato da Newton, ma fu verificato per la prima volta da G.B. Guglielmini che tra il 1791 e il 1792 eseguì numerose prove dalla Torre degli Asinelli in Bologna, osservando uno spostamento di 17 mm per una altezza di caduta di 97,20 m. Il fenomeno è spiegabile se si ammette il moto rotatorio della Terra da ovest verso est, poiché in questo caso anche il corpo che si trova sulla torre dovrà partecipare alla rotazione terrestre, assumendo la stessa velocità del punto di partenza e mantenendola per inerzia anche durante la caduta; d'altra parte, essendo il punto di partenza più lontano dall'asse terrestre rispetto al punto di arrivo (la base della torre o il suolo), il corpo avrà una maggiore velocità lineare di rotazione rispetto a quest'ultimo, quindi ruoterà di più e andrà a cadere più avanti, ossia spostato ad est. Naturalmente, la deviazione della verticale è tanto più grande quanto maggiore è l'altezza dalla quale si lascia cadere il corpo perché maggiore è la distanza di un punto dall'asse di rotazione e maggiore è la velocità.

Un'altra prova del moto di rotazione della Terra è data dall'esperienza di Foucault, che consiste nell'osservare lo spostamento del piano di oscillazione di un pendolo rispetto agli oggetti terrestri; essa fu eseguita prima nell'Osservatorio di Parigi e poi pubblicamente, nel 1851, nel Panthéon di Parigi.

2.2.3 – I ciclo del dì e della notte

La conseguenza più immediata del moto di rotazione è l'alternarsi del dì e della notte. I raggi solari, che giungono sulla Terra quasi paralleli tra loro, illuminano in ogni istante solo la parte di superficie terrestre che è rivolta verso il Sole; poiché la rotazione si compie in un tempo molto più breve della intera rivoluzione intorno al Sole sulla superficie terrestre si alternano un periodo di illuminazione, che chiamiamo dì, e uno di oscurità, che chiamiamo notte. Con il termine giorno indichiamo il tempo dell'intera rotazione, cioè l'insieme del dì e della notte.

L'emisfero illuminato è diviso da quello in ombra da un circolo massimo che va spostandosi di continuo ed al quale diamo il nome di circolo d'illuminazione. Esso in realtà non separa nettamente la parte illuminata da quella buia, ma tra le due zone c'è una fascia di una certa ampiezza dove il passaggio dal dì alla notte è graduale. Ciò dipende della presenza dell'atmosfera, i cui alti strati sono penetrati dai raggi un po' prima del sorgere del Sole sull'orizzonte ed un po' dopo il tramonto: fenomeni di diffusione, riflessione e rifrazione della luce negli strati dell'atmosfera ci danno un po' di chiarore solare durante le aurore ed i crepuscoli, la cui durata aumenta nella stagione invernale e nelle regioni polari.

Costellazione	data di entrata	
	giorno	ora
Capricorno	20 gennaio	15
Acquario	17 febbraio	3
Pesci	12 marzo	6
Ariete	18 aprile	20
Toro	14 maggio	2
Gemelli	21 giugno	12
Cancro	20 luglio	14
Leone	10 agosto	14
Vergine	16 settembre	15
Bilancia	31 ottobre	3
Scorpione	23 novembre	6
Ophiuco	29 novembre	18
Sagittario	18 dicembre	1
Tabella 2 – Data e ora dell'entrata del Sole nelle costellazioni dello Zodiaco nel 2020.		

2.3 – Il moto di rivoluzione

2.3.1 – Generalità

Di notevole interesse è la rivoluzione che la Terra compie, come gli altri pianeti del Sistema Solare, descrivendo un'orbita ellittica intorno al Sole in senso antiorario, immaginando di osservare il

movimento dal Polo nord celeste. Come sappiamo dalla I legge di Keplero, la distanza tra la Terra ed il Sole varia a seconda che la Terra si trovi all'afelio ($d_A = 152100000$ km circa) o al perielio ($d_P = 147100000$ km circa); quella media è di 149600000 km^[5]. La Terra viene a trovarsi al perielio tra il 5 e il 6 gennaio, all'afelio tra il 6 e il 7 luglio.

L'orbita descritta dalla Terra è un'ellisse molto poco schiacciata, tanto da potersi assimilare quasi ad una circonferenza; la sua eccentricità, ossia il rapporto tra la distanza del Sole dal centro dell'ellisse

e la lunghezza del semiasse maggiore dell'ellisse stessa, è $e = \frac{d_A - d_P}{d_A + d_P} = 0,01671$.

L'intero percorso orbitale ha una lunghezza di circa 940 milioni di chilometri; esso viene percorso ad una velocità variabile (II legge di Keplero) compresa tra 29,3 km/s all'afelio ed i 30,3 km/s al perielio: la velocità media è di circa 29,8 km/s. Il tempo che la Terra impiega a compiere un'orbita completa, cioè l'effettiva durata della rivoluzione terrestre, è di 365,25636 d = 365d 6h 9min 9,5s e viene chiamato anno siderale^[6].

2.3.2 – Prove e conseguenze della rivoluzione terrestre

Tra le prove indirette del moto di rivoluzione terrestre possiamo considerare l'analogia con gli altri pianeti del Sistema solare, per i quali si è potuta osservare l'esistenza di un complesso movimento intorno al Sole, regolato dalle leggi di Keplero. Inoltre la periodicità annua di alcuni gruppi di stelle cadenti dovrebbe indicare che la Terra si muove nello spazio descrivendo un'orbita di forma tale (circolare o ellittica) che le consenta di passare periodicamente attraverso regioni in cui sono presenti sciame di materia cosmica.

La prova diretta e più sicura del moto orbitale della Terra è fornita da un

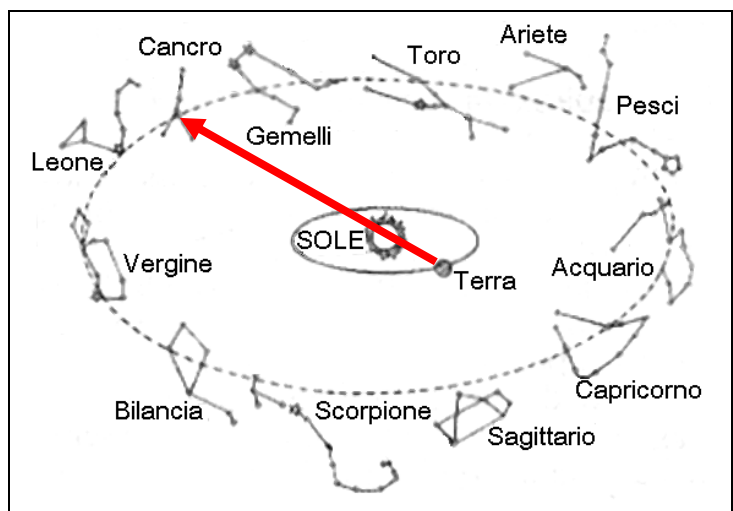


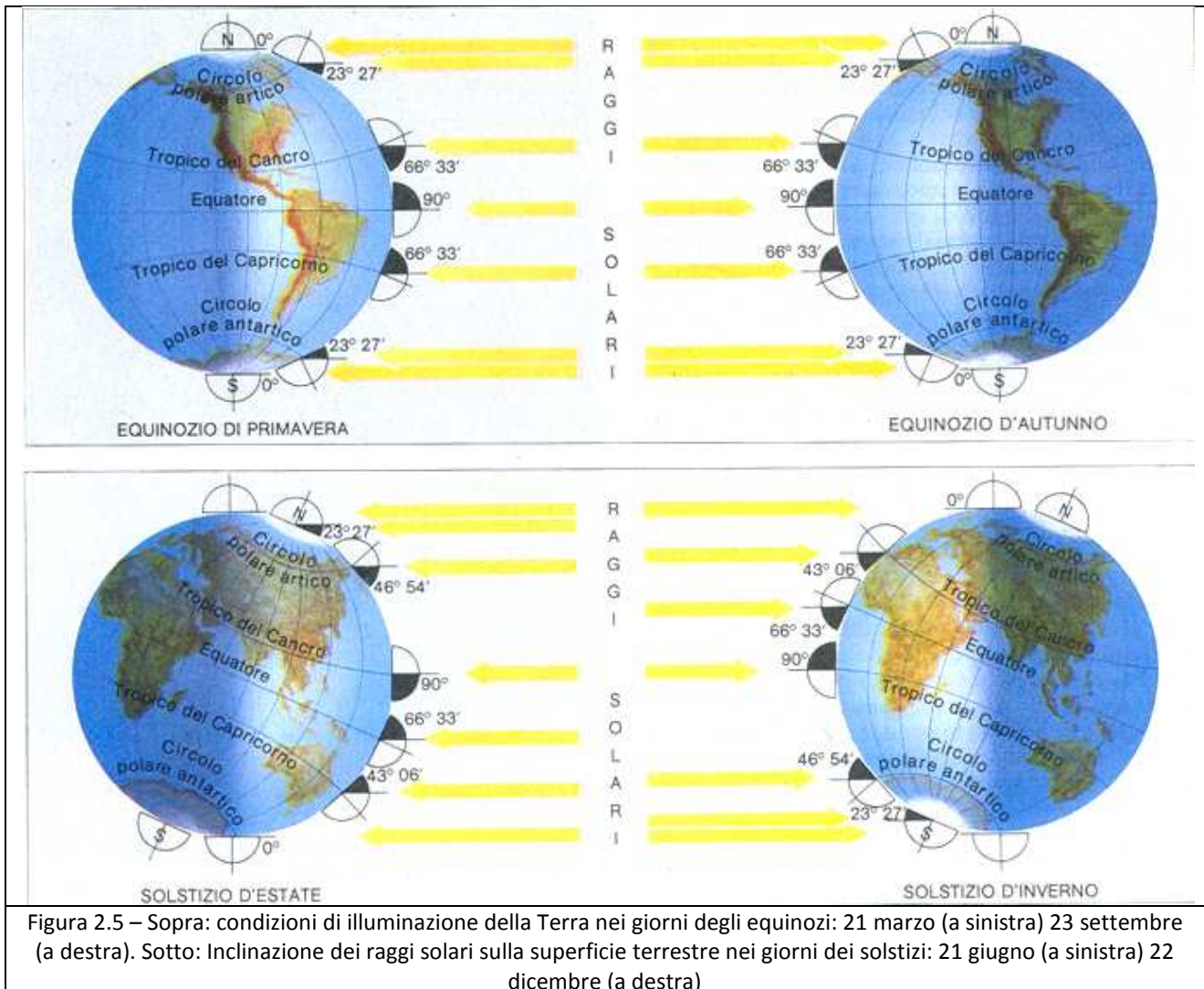
Figura 2.4 – Moto del Sole sullo Zodiaco

fenomeno di natura fisica scoperto nel 1727 da J. Bradley, dell'Osservatorio astronomico di Greenwich: l'aberrazione della luce proveniente dagli astri (vedremo meglio più avanti). Ulteriori prove del moto orbitale della Terra intorno al Sole si basano su due fatti di estrema importanza, e cioè: che l'asse terrestre è inclinato di $66^\circ 33'$ rispetto al piano dell'orbita ($23^\circ 27'$ rispetto alla perpendicolare a tale piano) e che, se si considerano tempi non troppo lunghi, esso si mantiene costantemente parallelo a se stesso. Se l'asse terrestre fosse perpendicolare al piano dell'orbita, il circolo d'illuminazione passerebbe per i poli e coinciderebbe in qualsiasi momento con un circolo meridiano, tagliando in due parti uguali tutti i paralleli; di conseguenza, in ogni punto della superficie terrestre e per tutto l'anno il dì e la notte avrebbero la stessa durata (12 ore ciascuno) e in nessun luogo si verificherebbe l'alternarsi delle stagioni. In tali condizioni la quantità di luce e di calore ricevuti dalle varie parti della superficie terrestre dipenderebbe solo dall'inclinazione dei raggi solari e quindi, a causa della sfericità della Terra, sarebbe tanto più piccola quanto maggiore è la latitudine; comunque, per una determinata località essa si manterrebbe uniforme durante tutto

^[5] Sulla base di questo valore l'Unione Astronomica Internazionale ha definito una unità di misura per le distanze astronomiche, l'Unità Astronomica (simbolo UA) pari a $1,4959787061 \cdot 10^{11}$ m.

^[6] Il sistema Terra-Sole in realtà si muove attorno al centro di massa comune, cioè attorno al punto che divide la congiunte i due corpi in due parti inversamente proporzionali alle loro masse (con la parte più corta vicina al corpo di massa più grande e quella più lunga vicina al corpo di massa più piccola). Dato che la massa del Sole è molto maggiore (circa 334 000 volte) di quella della Terra, il centro di massa si trova però tanto prossimo al Sole da potersi ritenere praticamente coincidente con il suo centro (è mediamente a 450 km da esso); di conseguenza si può approssimativamente considerare che la Terra sia in movimento intorno al Sole.

l'anno. Una certa variabilità nel corso dell'anno si avrebbe solo per il fatto che il Sole non si trova sempre alla stessa distanza dalla Terra; ma poiché la differenza tra la distanza massima e la distanza minima è relativamente piccola, le variazioni legate a questo fattore sono piuttosto modeste.



La nostra esperienza quotidiana ci dimostra però che queste condizioni si verificano solo in due momenti dell'anno, il 21 marzo ed il 23 settembre. In tutti gli altri momenti solo i punti che si trovano sull'Equatore hanno dì e notte sempre uguali, mentre nei luoghi situati a Nord e a Sud di esso osserviamo una diversa durata del dì e della notte. E questa differenza è piccola in prossimità dell'Equatore, ma diventa molto sensibile andando verso i poli, in corrispondenza dei quali si raggiunge addirittura una durata di sei mesi per il dì e sei mesi per la notte. Come si può spiegare tutto ciò? Cerchiamo di rendercene conto partendo dai fenomeni che possiamo osservare sulla Sfera Celeste.

Come abbiamo già notato, apparentemente sembra che il Sole giri intorno alla Terra percorrendo una traiettoria che giace sullo stesso piano dell'orbita terrestre ed è quindi inclinata di $23^{\circ}27'$ rispetto al piano equatoriale celeste (o terrestre). In questo movimento il Sole si sposta perciò da un emisfero celeste all'altro, mantenendosi per sei mesi a nord dell'equatore e per altri sei mesi a sud di esso. I due punti in cui la traiettoria solare attraversa l'equatore celeste sono gli equinozi, le cui date cadono appunto il 21 marzo (equinozio di primavera o punto γ) ed il 23 settembre (equinozio d'autunno o punto Ω); quando il Sole si trova in uno di questi punti, giace sul piano equatoriale, quindi culmina allo zenit dell'equatore terrestre, e allora il dì e la notte presentano la stessa durata in ogni luogo della Terra (Figura 2.5 sopra).



Figura 2.6 – Il Sole di Mezzanotte

Le massime elevazioni a nord e a sud rispetto al piano equatoriale terrestre il Sole le raggiunge in due posizioni che vengono dette solstizi; la prima si ha il 21 giugno (solstizio d'estate), l'altra il 22 dicembre (solstizio d'inverno): in questi due momenti dell'anno i raggi solari risultano perpendicolari alternativamente a due paralleli che si trovano, rispettivamente, ad una latitudine di $23^{\circ}27'$ nord (Tropico del Cancro) e $23^{\circ}27'$ sud (Tropico del Capricorno). In tutti e due i casi il circolo d'illuminazione è tangente a due paralleli che distano dall'Equatore $66^{\circ}33'$ (quello dell'emisfero boreale è il circolo polare artico, quello dell'emisfero australe è il circolo polare antartico) e taglia obliquamente tutti gli altri paralleli compresi tra questi e l'equatore; ma le condizioni di illuminazione sono completamente diverse per i due emisferi (Figura 2.5 sotto). Nel solstizio d'estate tutti i punti a nord dell'equatore restano per un tratto più lungo nella parte illuminata e quelli a sud dell'equatore rimangono per un tratto più lungo nella parte oscura, mentre solo all'equatore si hanno 12 ore di luce e 12 di buio; i luoghi compresi fra il circolo polare artico ed il polo nord, cioè nella calotta artica, restano illuminati durante tutta la rotazione terrestre (Figura 2.5 sotto), mentre quelli della calotta antartica (tra il circolo polare antartico ed il polo sud) restano nel frattempo al buio. Nel solstizio d'inverno, quando i raggi solari sono perpendicolari al Tropico del Capricorno, si hanno condizioni opposte e il dì viene ad essere più lungo della notte nell'emisfero meridionale, più corto in quello settentrionale; completamente illuminata è la calotta antartica, completamente nell'oscurità quella artica.

2.3.3 – Il ritmo delle stagioni

I quattro momenti fondamentali sopra descritti possono essere indicati sull'orbita terrestre con le relative posizioni in cui viene a trovarsi la Terra: la linea che, passando per il centro del Sole, unisce i due punti dell'orbita in cui i raggi solari sono allo Zenit sull'Equatore è la **linea degli equinozi**; perpendicolare ad essa è la **linea dei solstizi**, che unisce i due punti in cui il Sole è alla massima elevazione rispetto al piano equatoriale. Bisogna notare che la linea dei solstizi non coincide con la linea degli apsidi, la quale congiunge l'afelio col perielio: attualmente esse formano al centro del Sole un angolo di circa 12° (Figura 2.7). Nei periodi di tempo che intercorrono fra queste quattro posizioni le condizioni di illuminazione sono intermedie a quelle descritte e variano progressivamente dall'una all'altra. Poiché la quantità di calore ricevuta da ciascun punto della superficie terrestre dipende appunto da tali condizioni (durata del dì e inclinazione dei raggi solari), ne deriva che nel volgere di un anno, nei vari luoghi della Terra si susseguono periodi più caldi e più freddi: si ha cioè l'alternarsi delle stagioni. Le stagioni astronomiche, ossia i periodi di tempo compresi tra un equinozio ed il solstizio che lo segue, o tra un solstizio e l'equinozio successivo, sono così



Figura 2.7 – La rivoluzione della Terra intorno al Sole e le attuali posizioni degli equinozi e dei solstizi. Le stagioni sono riferite all'emisfero Boreale, nell'emisfero Australe sono invertite.

dall'una all'altra. Poiché la quantità di calore ricevuta da ciascun punto della superficie terrestre dipende appunto da tali condizioni (durata del dì e inclinazione dei raggi solari), ne deriva che nel volgere di un anno, nei vari luoghi della Terra si susseguono periodi più caldi e più freddi: si ha cioè l'alternarsi delle stagioni. Le stagioni astronomiche, ossia i periodi di tempo compresi tra un equinozio ed il solstizio che lo segue, o tra un solstizio e l'equinozio successivo, sono così

delimitate:

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

Tabella 3 – Durata approssimativa delle stagioni 2020 – 2021

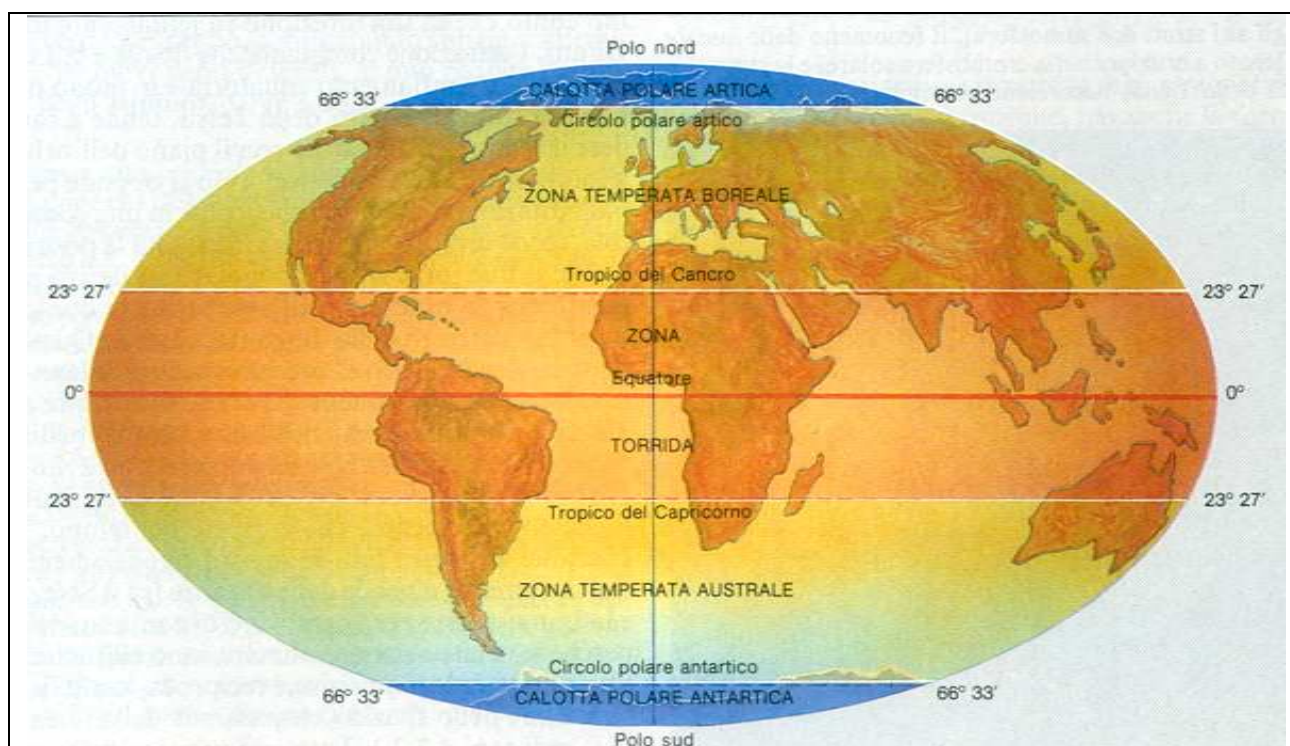


Figura 2.8 – Le zone astronomiche della superficie terrestre

A causa della diversa velocità della Terra sull'orbita, le stagioni astronomiche non hanno tutte la stessa durata: noi abbiamo complessivamente un semestre caldo (primavera–estate) più lungo di circa 7 giorni e 6 ore del semestre freddo (autunno–inverno) ed il contrario si ha nell'emisfero australe; come si vedrà in seguito, questo vale però ai giorni nostri, perché le cose cambiano nel corso dei millenni. Occorre notare che le stagioni astronomiche, pur costituendone la causa primaria, non coincidono del tutto con le stagioni meteorologiche, cioè con il reale andamento del tempo meteorologico e del clima. Per capirne i motivi si può innanzitutto notare che le situazioni di insolazione che si registrano agli equinozi e ai solstizi dovrebbero rappresentare, anche da un punto di vista esclusivamente astronomico, il culmine delle condizioni caratteristiche delle rispettive stagioni e non il loro momento di inizio; d'altra parte si deve anche considerare che l'atmosfera, le acque e le terre emerse immagazzinano e cedono il calore sempre con un certo ritardo, impedendo così di percepire subito gli effetti delle varie inclinazioni dei raggi solari. Pertanto, sulla base delle reali condizioni di riscaldamento nei vari periodi dell'anno, si è stabilito convenzionalmente che le stagioni meteorologiche incominciano col primo giorno del mese in cui cade l'equinozio o il solstizio di quelle astronomiche corrispondenti. Quindi la primavera meteorologica comprende interamente i mesi di marzo, aprile e maggio, l'estate i mesi di giugno, luglio e agosto; l'autunno va dal 1° settembre a tutto novembre, l'inverno dal 1° dicembre a tutto febbraio.

Come abbiamo visto, i due tropici e i due circoli polari rivestono un'importanza particolare per le condizioni di illuminazione e di inclinazione dei raggi solari nel corso dell'anno. Essi dividono la superficie terrestre in cinque parti caratterizzate da condizioni diverse di riscaldamento, chiamate zone astronomiche (Figura 2.8). Queste sono: la zona torrida (o zona intertropicale), limitata dai due tropici e divisa in due dall'Equatore; la zona temperata boreale, compresa fra il Tropico del Cancro ed il Circolo polare artico, e la zona temperata australe tra il Tropico del Capricorno ed il Circolo polare antartico; la calotta polare artica che si estende dal Circolo polare artico al Polo nord e la calotta polare antartica dal Circolo polare antartico al Polo sud^[7].

Un'altra conseguenza del moto di rivoluzione della Terra è la diversa durata del giorno solare e del giorno siderale.

Comunemente per giorno si intende il tempo che la terra impiega a fare un giro su se stessa; però questo periodo è diverso se viene conteggiato rispetto al Sole o rispetto alle stelle. Bisogna quindi distinguere tra giorno solare, cioè il tempo che intercorre tra due passaggi successivi del Sole alla massima altezza sul piano dell'orizzonte di un certo luogo, la cui durata è di 24 ore e giorno siderale, cioè il tempo che intercorre tra due passaggi consecutivi di una stella su un determinato meridiano della

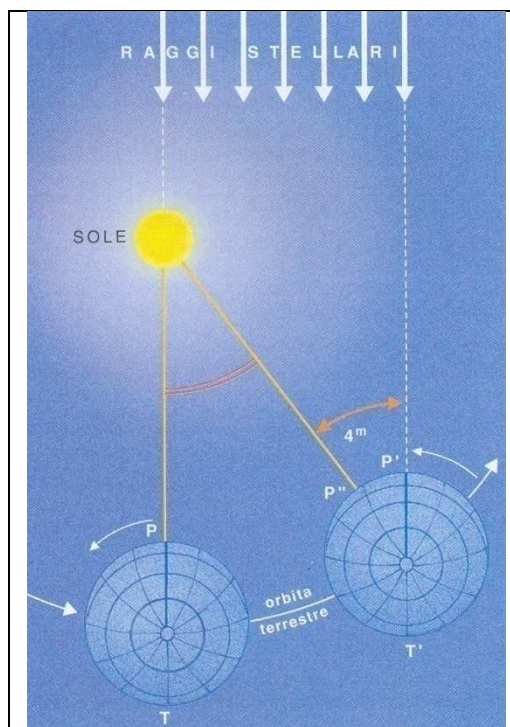


Figura 2.9 – Giorno solare e giorno siderale

superficie terrestre, la cui durata è di 0,9972697 giorni solari ovvero 23,9344726h.

Il motivo di questa differenza di circa 4 minuti sta nel fatto che mentre la Terra compie una rotazione si muove anche di circa 7030 km lungo la sua orbita perciò, per rivedere il Sole nella stessa direzione, dopo che la Terra ha fatto un giro completo intorno al proprio asse, occorre che essa compia un supplemento di rotazione (vedi Figura 2.9).

2.4 – I moti secondari

La Terra è interessata anche da altri movimenti che sono simultanei con quelli di rotazione e di rivoluzione, ma sono ad essi subordinati. Alcuni sono moti millenari (precessione luni-solare, spostamento della linea degli apsidi, variazione dell'eccentricità dell'orbita, mutamento dell'inclinazione dell'asse terrestre) e possono essere considerati come perturbazioni più o meno

[7] Nella zona torrida il Sole passa allo Zenit di tutti i punti due volte all'anno; ai tropici il Sole è allo Zenit una sola volta all'anno: nel giorno del solstizio di giugno al Tropico del Cancro, in quello del solstizio di dicembre al Tropico del Capricorno. Mentre all'Equatore il dì e la notte hanno sempre la stessa durata, negli altri punti della zona torrida si ha una differenza che però non è mai molto forte: ai tropici il dì più lungo è di 13 ore e tre quarti e quindi la notte più breve di 10 ore e un quarto. Ne deriva che in questa zona il riscaldamento è sempre molto forte e non si può parlare di vere e proprie stagioni. Nelle zone temperate il Sole non passa mai allo Zenit e i suoi raggi arrivano più o meno obliqui, secondo il periodo dell'anno e la latitudine. Le durate del dì e della notte presentano differenze che vanno aumentando con la latitudine e con l'avvicinarsi dei giorni solstiziali tanto che sui circoli polari il dì e la notte più lunghi raggiungono, alternativamente, la durata di 48 ore perché al periodo di illuminazione (o di oscurità) del giorno dei solstizi si collega quello di illuminazione (o di oscurità) del giorno seguente. Nelle zone temperate, quindi, il riscaldamento varia durante l'anno e si ha una distinzione netta tra le varie stagioni.

Nelle zone polari i raggi del Sole arrivano sempre molto obliqui o addirittura non colpiscono affatto la superficie per un periodo tanto più lungo quanto più ci si avvicina ai poli. Dopo l'equinozio di primavera nella calotta artica inizia un periodo di illuminazione che è detto gran dì, mentre nella calotta antartica inizia la grande notte; il contrario si ha invece dopo l'equinozio d'autunno. Il gran dì e la grande notte, che vicino ai circoli polari durano pochi giorni, ai poli dovrebbero durare 6 mesi ciascuno, ma la presenza di lunghi crepuscoli (dovuti ai fenomeni di diffusione e rifrazione della luce negli alti strati dell'atmosfera), il fenomeno delle aurore polari (legato a eruzioni nella cromosfera solare) e la stessa luminosità della Luna, accorciano sensibilmente il periodo di oscurità completa, cosicché la durata della grande notte si aggira intorno ai 100 giorni.

sensibili dei due movimenti principali. A causa della lentezza di questi movimenti, non è possibile osservarne direttamente le conseguenze; tuttavia la loro esistenza è comprovata da accuratissimi studi astronomici, come quelli impostati intorno al 1930 da Milankovitch e poi sviluppati anche da altri ricercatori, ed è testimoniata anche dalle tracce glaciali che si rinvennero in luoghi della Terra dove oggi i ghiacciai non esistono più.

Altri movimenti coinvolgono la Terra in quanto facente parte del Sistema Solare, della Galassia e dell'Universo.

2.4.1 – Il moto biconico

Si è detto che l'asse terrestre si mantiene parallelo a se stesso nel corso della rivoluzione: in realtà ciò è approssimativamente vero solo se si considerano tempi non troppo lunghi; se potessimo eseguire osservazioni prolungate per alcune migliaia di anni, ci renderemmo conto che la sua direzione va lentamente mutando. Difatti, l'attrazione combinata che il Sole e la Luna esercitano sul rigonfiamento equatoriale, tende a far coincidere il piano dell'Equatore con il piano dell'orbita, cioè a raddrizzare l'asse terrestre; a ciò si oppone però la rapida rotazione della Terra che, come in una trottola, tende invece a mantenere immutata la posizione dell'asse: le due forze si compongono e ne deriva un movimento che fa descrivere all'asse terrestre due coni con il vertice al centro della Terra (Figura 12). Questo moto biconico, detto anche di precessione luni-solare, avviene in senso contrario a quello di rotazione terrestre e si compie in 25 700 anni circa; lo spostamento è di circa 50" l'anno.

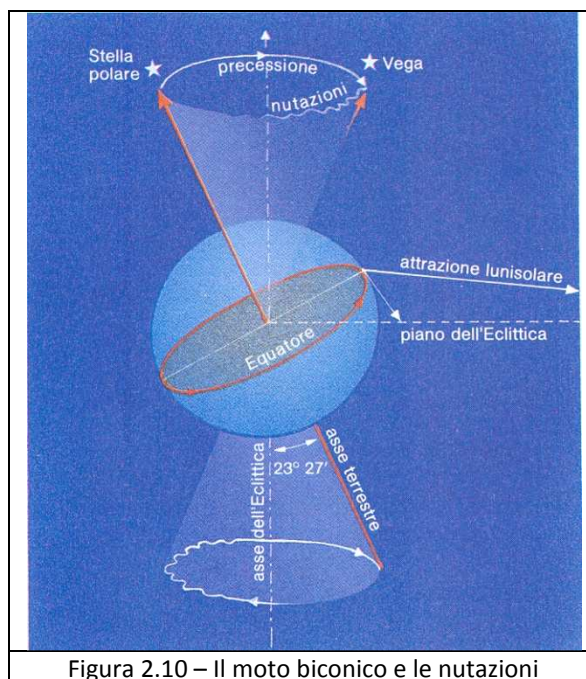


Figura 2.10 – Il moto biconico e le nutazioni

2.4.2 – Nutazione

L'azione attrattiva luni-solare sul rigonfiamento equatoriale terrestre dipende dalle distanze Sole-Terra e Luna-Terra; queste però cambiano nel tempo perché le orbite terrestri e lunari sono ellittiche ed inoltre mutano la loro posizione reciproca, ossia la loro intersezione nello spazio dando luogo alla *regressione della linea dei nodi* ^[8]. Tutto ciò provoca delle perturbazioni periodiche nel moto di biconico che si manifestano come oscillazioni con ampiezza massima di 18,4" in un periodo di circa 18,6 anni. Tali oscillazioni vengono dette nutazioni e per effetto di questi movimenti l'asse terrestre, invece di descrivere due coni circolari, si muove secondo coni leggermente ondulati (Figura 2.10).

2.4.3 – Variazione dell'inclinazione

L'asse terrestre, nell'arco di circa 40.000 anni, varia la sua inclinazione rispetto alla perpendicolare dell'orbita della Terra, da un minimo di circa 21°55' ad un massimo di circa 24°20' e ritorno al minimo di 21°55'. Questa oscillazione non ha andamenti regolari; l'inversione del senso di inclinazione, può avvenire prima di avere raggiunto un limite estremo. La variazione dell'inclinazione della Terra ha come primo effetto una variazione della declinazione massima o minima dell'Eclittica e, conseguentemente, una variazione dell'ampiezza delle fasce tropicali e di quelle entro i Circoli polari e quindi essa comporta anche lo spostamento delle latitudini dei Circoli Polari e dei Tropici. Attualmente l'inclinazione è di circa 23°27' ed è in fase di diminuzione ovvero la Terra si sta "raddrizzando" e si stanno restringendo sia le fasce tropicali, sia quelle polari.

^[8] La linea di intersezione fra il piano dell'orbita lunare e il piano dell'orbita terrestre non rimane fissa nello spazio, ma si sposta continuamente, ossia ruota con un periodo di circa 18,6 anni.

2.4.4 – Polodia

L'asse di rotazione terrestre, per svariate cause, soprattutto per lo spostamento interno delle masse terrestri, non mantiene una direzione costante, ma si sposta lungo una linea irregolare (polodia), approssimativamente entro un quadrato con lato di 20 metri. Attenzione questo non significa che la direzione dell'asse può cambiare per questi fenomeni, cambiano solo i punti in cui l'asse "esce" dalla Terra, ovvero i punti sulla superficie del globo terrestre dove si trovano il Polo Nord e il Polo Sud geografici. È quanto è avvenuto con il terremoto del dicembre 2004 nell'Oceano Indiano.

2.4.5 – Rotazione della linea degli apsi

Sempre a causa dell'attrazione sulla Terra degli altri pianeti del Sistema Solare, la linea che congiunge l'afelio ed il perielio, detta linea degli Apsidi (o Absidi), osservata da sopra il Polo Nord presenta un movimento in senso antiorario con una velocità angolare di $11''$ ogni anno, in modo da compiere un giro completo in 117 000 anni. Questo fa sì che l'istante del passaggio del Sole al perielio non sia sempre lo stesso, ma vari nel tempo (rispetto all'anno sidereo). L'intervallo di tempo che intercorre tra due successivi passaggi del Sole al perielio viene detto anno anomalistico; la sua durata è di $365,25964 \text{ d} = 365 \text{ d } 6 \text{ h } 13 \text{ min } 52,9 \text{ s}$.

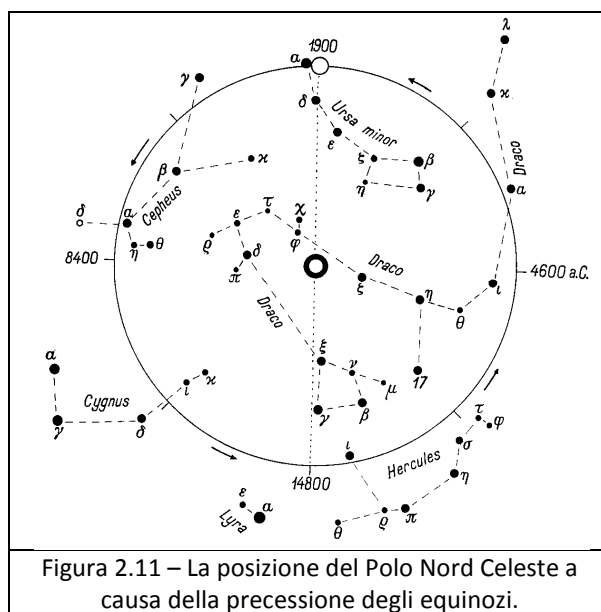
2.4.6 – Precessione degli equinozi

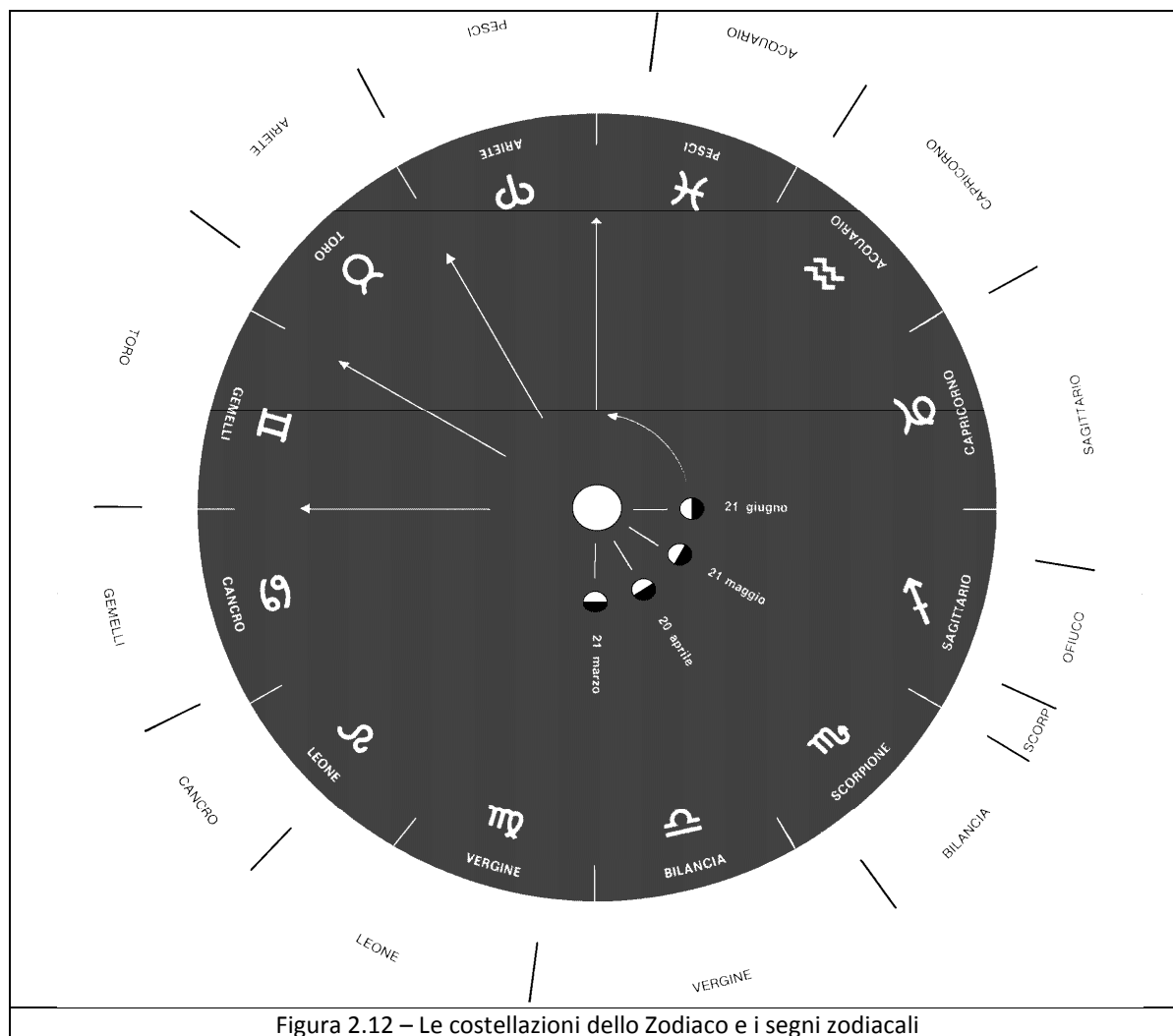
Lo spostamento della linea degli Apsidi va "incontro" allo spostamento della linea degli equinozi e ne abbrevia il periodo da circa 25 700 a 21 000 anni, conseguentemente gli equinozi ed i solstizi cadono ogni anno circa $01'01''$ in anticipo. Da ciò segue che l'intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi successivi del Sole allo Zenit dello stesso tropico, cioè tra due solstizi dello stesso nome (o anche tra due equinozi dello stesso nome), che viene detto anno tropico è diverso dal tempo che la Terra impiega a ruotare intorno al Sole (anno sidereo); la durata dell'anno tropico è di $365,2421897 \text{ d} = 365 \text{ d } 5 \text{ h } 48 \text{ min } 45,2 \text{ s}$, cioè circa 20min 24,3s in meno dell'anno sidereo.

La Precessione degli Equinozi è il risultato di due movimenti: il mutamento di direzione nello spazio dell'asse di rotazione terrestre (moto biconico) e lo spostamento della linea degli Apsidi.

Conseguenza notevole del moto di precessione è che il prolungamento ideale dell'asse terrestre non va a cadere sempre in corrispondenza della Stella polare. Quest'ultima, che è attualmente assai vicina al Polo nord celeste (ne dista poco più di mezzo grado), ne sarà distante circa 47° quando l'asse terrestre avrà percorso metà del suo giro conico, cioè fra circa 13.000 anni; allora la posizione del Nord sarà indicata dalla stella Vega della costellazione della Lira (vedi Figura 2.11).

Un'altra conseguenza della precessione degli equinozi è che col tempo cambia la posizione che il Sole assume nei vari momenti dell'anno rispetto alle costellazioni dello Zodiaco. Ad esempio, mentre nel IV secolo a.C. all'inizio della primavera boreale il Sole si vedeva proiettato nella costellazione dell'Ariete, attualmente nello stesso periodo dell'anno lo si vede nella costellazione dei Pesci; come se da allora ad oggi lo Zodiaco si fosse spostato di una costellazione, ruotando di circa 30° verso oriente. Tuttavia il quadro zodiacale riportato ancora oggi nei calendari è quello dell'antichità, e così quando si dice che il Sole è, ad esempio, nel *segno* dell'Ariete si deve intendere che esso si trova nella posizione in cui un tempo c'era questa costellazione, e che attualmente è quella dei Pesci (vedi Figura 2.12). L'anticipo dei punti sull'orbita terrestre in cui si verificano gli equinozi e i solstizi non deve far credere che cambino anche le date degli equinozi e dei solstizi: essi cadono sempre alle stesse date del nostro calendario.





2.4.7 – Variazione della distanza tra i fuochi

Oltre a quelle descritte l'azione gravitazionale esercitata dai vari corpi del Sistema Solare produce perturbazioni che col tempo fanno variare non solo la posizione, ma anche la forma dell'orbita terrestre.

Uno di questi movimenti consiste appunto nella variazione dell'eccentricità dell'orbita, ossia nella variazione del rapporto tra la distanza del Sole dal centro dell'orbita e la lunghezza del semiasse maggiore di quest'ultima, o, che è la stessa cosa nella variazione della distanza dei fuochi dell'ellisse descritta dalla Terra nella sua orbita intorno al Sole^[9].

Come si è già detto, attualmente il valore dell'eccentricità dell'ellisse descritta dalla Terra nel suo moto di rivoluzione è di circa 0,0167, ma tale valore non si mantiene costante nel corso degli anni; infatti, pur non variando la lunghezza della linea degli apsidi, la distanza dei fuochi dell'ellisse dell'orbita terrestre, che attualmente di circa 5 000 000 km, in un periodo di 92 000 anni passa da un massimo di circa 14 000 000 km (che corrisponde ad un valore dell'eccentricità di circa 0,0655) ad un minimo di poco più di 1 000 000 km (pari ad un valore dell'eccentricità di circa 0,0018) e ritorna di nuovo al valore massimo.

^[9] Si ricordi che per la I Legge di Keplero il Sole occupa uno dei fuochi dell'ellisse descritta da un pianeta nella sua orbita intorno ad esso.

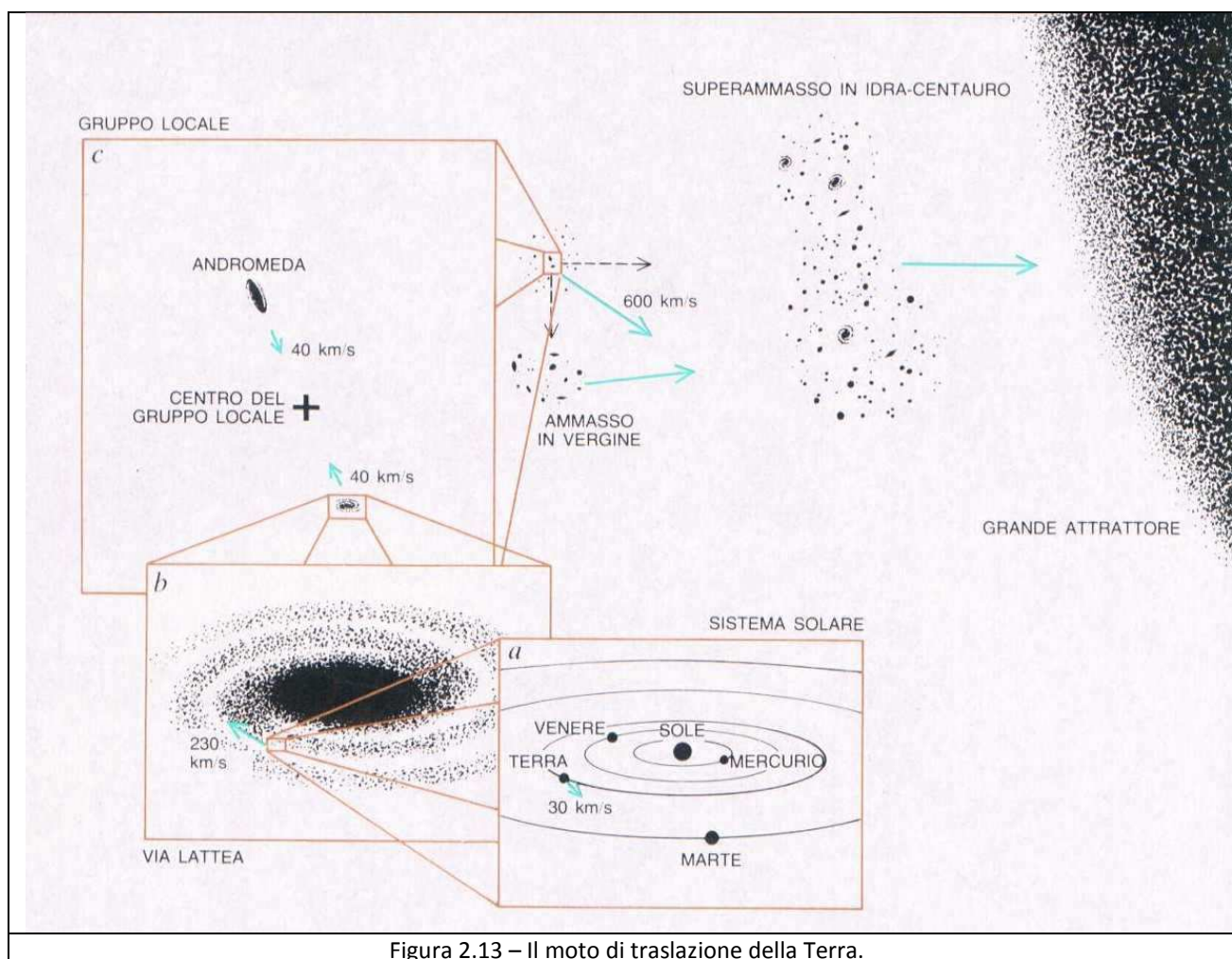


Figura 2.13 – Il moto di traslazione della Terra.

2.4.8 – Moto di traslazione

Il moto di traslazione comprende l'insieme dei moti che la Terra compie a seguito del Sole e della Galassia (vedi Figura 2.13). Possiamo individuare i seguenti moti.

- Il moto del Sole rispetto al centro della Galassia che, secondo le attuali conoscenze, si compie in 225 000 000 di anni, alla velocità di 230 km/s;
- Il moto di avvicinamento della Via Lattea alla galassia di Andromeda alla velocità di circa 40 km/s
- Il moto dell'intero Gruppo Locale che si sta spostando alla velocità di 600 km/s e che è dovuto sia all'attrazione delle galassie dell'ammasso della Vergine (che può spiegare una delle componenti del moto), sia all'attrazione dovuta al superammasso di galassie in Idra-Centauro, che a sua volta è in movimento. Alcuni risultati inducono a credere che il Gruppo Locale, l'ammasso della Vergine e il superammasso in Idra-Centauro (e molte altre galassie) siano sottoposti all'attrazione gravitazionale di una vasta concentrazione di galassie, il Grande Attrattore, posta a distanza ancora maggiore.
- Infine il moto di espansione dell'Universo.

2.4.9 – Conseguenze dei moti millenari della Terra

Per quanto possano sembrare trascurabili i moti millenari della Terra hanno importantissimi riflessi sul clima del nostro pianeta, poiché alterano nel tempo la distribuzione dell'insolazione secondo la latitudine e la stagione. Data la lentezza con cui si svolgono questi movimenti, le variazioni climatiche che essi inducono sono estremamente gradualmente e pertanto sfuggono all'osservazione

diretta; protratte nei millenni, comunque, esse si rendono manifeste attraverso le glaciazioni.

È ormai accettata l'ipotesi proposta da M. Milankovitch nella prima metà del novecento, secondo la quale l'alternarsi di epoche glaciali e interglaciali, che ha caratterizzato la storia della Terra, è da mettere in relazione con i principali moti millenari del nostro pianeta. Come si è detto, questi movimenti sono: la *precessione luni-solare* e lo *spostamento della linea degli apsidi*, che insieme determinano la *precessione degli equinozi*; la *variazione dell'eccentricità dell'orbita*; il *mutamento dell'inclinazione dell'asse terrestre*.

Alla luce di quanto già detto, prendiamo nuovamente in esame questi movimenti, soffermandoci ad analizzare gli effetti che essi producono sulle condizioni climatiche del globo terrestre.

Abbiamo visto che la durata di ogni stagione astronomica dipende dalla velocità con cui la Terra percorre il tratto di orbita corrispondente; poiché la precessione degli equinozi fa variare la posizione delle stagioni sull'orbita (Figura 2.14), ne deriva nel corso dei millenni anche una variabilità della loro durata.

Attualmente il semestre autunno-inverno cade per il nostro emisfero boreale nel settore dell'orbita terrestre più vicino al perielio, dove la Terra ha una velocità di rivoluzione maggiore, e perciò esso dura circa 7 giorni

e 6 ore in meno del semestre primavera-estate, che corrisponde al tratto di orbita più vicino all'afelio (dove la velocità della Terra è minore); ma fra 10 500 anni circa, quando la linea equinoziale avrà percorso mezzo giro, invertendo la sua posizione, la situazione sarà opposta e l'emisfero boreale avrà il semestre freddo più lungo di quello caldo, mentre il contrario si avrà per l'emisfero australe. A questo bisogna aggiungere che la distanza Terra-Sole, variabile nel corso dell'anno, influisce anche sul riscaldamento, sebbene in misura non molto considerevole: se un emisfero ha il suo inverno mentre la Terra è alle minori distanze dal Sole, come avviene attualmente per l'emisfero boreale, questo sarà meno freddo che nel caso contrario e, in corrispondenza, la stagione estiva sarà meno calda perché più lontana dal Sole. In sostanza, quando l'inverno cade in prossimità del perielio esso è più mite per la minore distanza dal Sole ed ha durata minore, mentre l'estate è più fresca ed ha maggior durata: la differenza di riscaldamento fra le due stagioni estreme, ossia l'*escursione calorica annua*, è piccola; e quando ciò si verifica in un emisfero, nell'altro si ha la situazione opposta: gli inverni sono più rigidi e più lunghi e le estati più calde e più brevi, quindi l'*escursione calorica* è più sensibile. A causa della precessione degli equinozi si ha, dunque, un continuo cambiamento di questo stato di cose; per cui i due emisferi passano alternativamente dall'una all'altra situazione, impiegando circa 21 000 anni per ritornare nella condizione climatica di partenza.

L'oscillazione dell'*escursione calorica* prodotta dalla precessione degli equinozi varia di intensità con il tempo, in conseguenza di un altro moto millenario della Terra e cioè della variazione dell'eccentricità dell'orbita. Difatti, quando l'eccentricità dell'orbita è massima, diventa massima anche la differenza tra le distanze Sole-afelio e Sole-perielio; in altre parole, il perielio e l'afelio risultano rispettivamente alla minima e alla massima distanza possibile dal Sole. In questa situazione di massima eccentricità, l'oscillazione della *escursione calorica* dovuta alla precessione degli equinozi viene amplificata (vedi Figura 2.15).

Quando per effetto della precessione l'inverno si verifica al perielio e l'estate in afelio, l'*escursione*

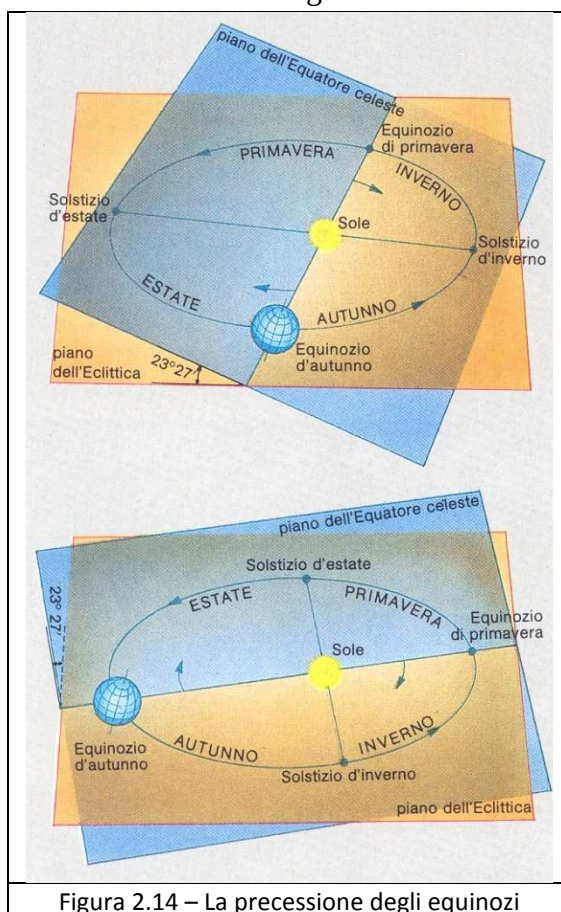


Figura 2.14 – La precessione degli equinozi

calorica risulta minore, essendo l'inverno un po' meno freddo e l'estate un po' meno calda; se contemporaneamente si ha la massima eccentricità dell'orbita terrestre, il perielio viene ad essere ancora più vicino al Sole e quindi l'inverno diventa ancora più mite, mentre l'afelio si allontana ulteriormente dal Sole e quindi l'estate diventa ancora più fresca: l'escursione calorica annua risulta, così, ancora minore. Nel caso opposto, cioè quando per effetto della precessione l'inverno si verifica all'afelio e l'estate al perielio, l'escursione calorica risulta maggiore che nel caso precedente; se a questa situazione si somma quella di massima eccentricità dell'orbita terrestre si ha un inverno ancora più rigido ed una estate ancora più calda: l'escursione calorica annua viene ulteriormente accentuata.

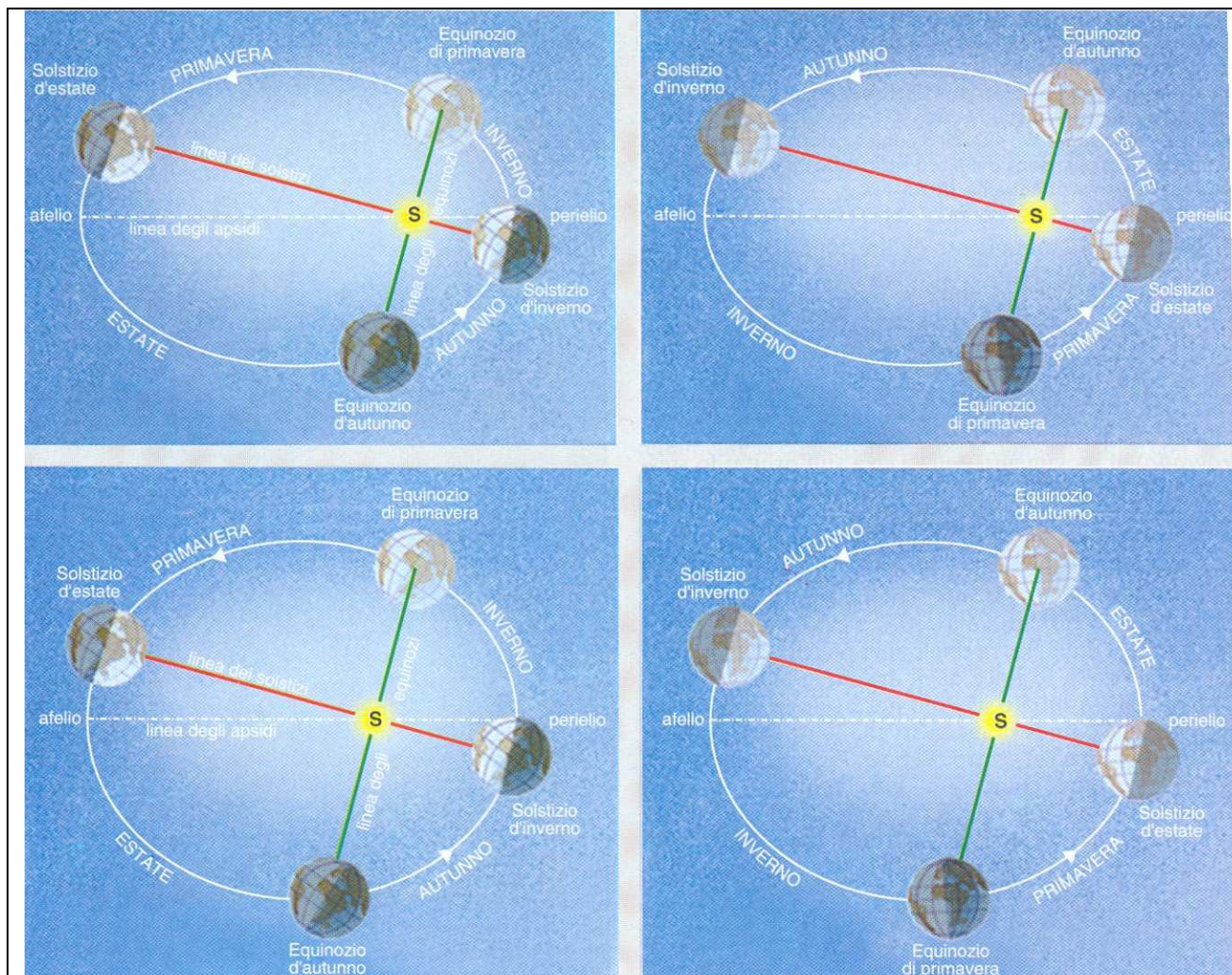


Figura 2.15 – La *variazione dell'eccentricità dell'orbita* modifica l'intensità delle oscillazioni climatiche dovute alla precessione degli equinozi: maggiore è l'eccentricità, maggiore è la differenza tra la massima e la minima distanza della Terra dal Sole e quindi maggiore è l'effetto della precessione degli equinozi. Le due figure in alto rappresentano il caso di massima eccentricità. A sinistra è raffigurata la posizione attuale delle linee equinoziale e solstiziale; a destra la posizione che si avrà tra circa 10.500 anni. Le due figure in basso rappresentano le stesse posizioni delle linee equinoziali e solstiziali delle figure precedenti associate al caso di minima eccentricità dell'orbita terrestre. Delle quattro situazioni illustrate, quella in alto a sinistra è la più favorevole allo sviluppo delle coltri glaciali nell'emisfero boreale.

Quando, invece, l'eccentricità dell'orbita è minima si riduce la differenza tra le distanze Sole–afelio e Sole–perielio, ossia l'afelio risulta meno distante ed il perielio meno vicino al Sole. Con un ragionamento analogo a quello precedente si dimostra che in questo caso l'oscillazione dell'escursione calorica dovuta alla precessione viene smorzata (vedi Figura 2.15). Anche il mutamento dell'inclinazione dell'asse terrestre produce importanti effetti sulle condizioni climatiche del nostro pianeta. Quando l'inclinazione assume i valori maggiori il contrasto stagionale diventa più marcato, mentre nel caso opposto tale contrasto si riduce sensibilmente. Per rendersi conto di

questo fatto, basta pensare che se l'inclinazione diventasse addirittura nulla, cioè se l'asse fosse perpendicolare al piano dell'orbita, le stagioni praticamente non esisterebbero affatto (a parte la piccola differenza dovuta alla variabilità della distanza Terra-Sole) e l'insolazione sarebbe regolarmente decrescente dall'Equatore verso i poli (vedi Figura 2.16.A).

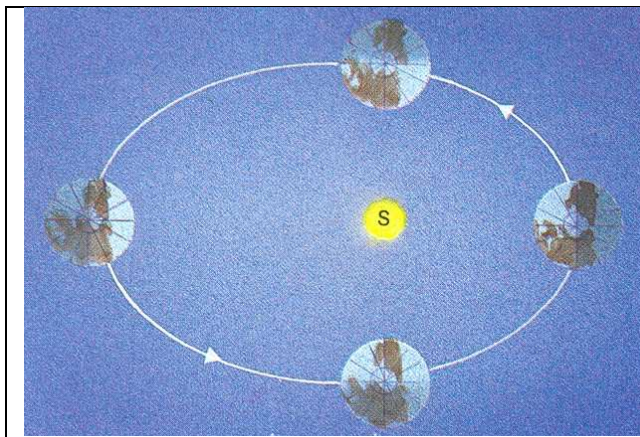


Figura 2.16.A – Il mutamento dell'inclinazione dell'asse terrestre fa variare sulla Terra l'intensità dei contrasti stagionali. Il caso limite ipotetico di una inclinazione nulla (visto dal Polo nord celeste); in questa situazione l'asse terrestre sarebbe perfettamente perpendicolare al piano dell'orbita. Le condizioni di illuminazione sarebbero sempre quelle che attualmente si verificano agli equinozi e le stagioni praticamente non esisterebbero.

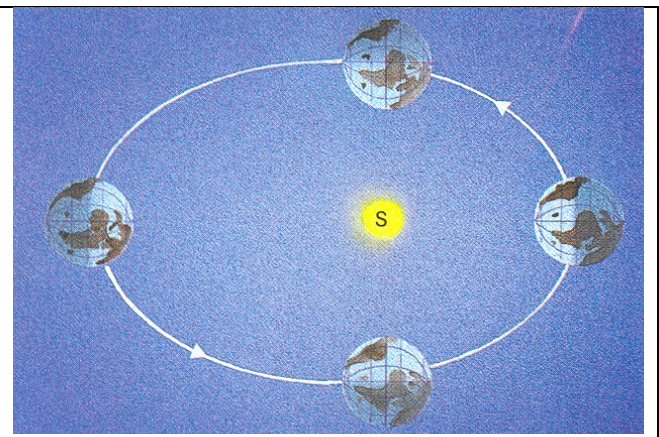


Figura 2.16.B – Il caso-limite di massima inclinazione, quello cioè in cui l'asse terrestre si troverebbe sullo stesso piano dell'orbita; in questa situazione in corrispondenza dei solstizi si avrebbe una insolazione nulla all'Equatore, mentre ai poli il Sole risulterebbe allo Zenit per 24 ore consecutive: da ciò deriverebbero contrasti stagionali estremamente marcati.

Nel caso limite opposto, cioè quello in cui l'asse terrestre giacesse sul piano dell'orbita, i contrasti stagionali sarebbero invece i più marcati teoricamente registrabili (vedi Figura 2.16.B). A differenza delle oscillazioni climatiche prodotte dalla precessione degli equinozi e dalla variazione dell'eccentricità dell'orbita, le conseguenze di quest'ultimo movimento si risentono contemporaneamente su entrambi gli emisferi.

Nel complesso si può dire che i movimenti descritti agiscono come cause di cambiamenti climatici, in tempi relativamente lunghi se confrontati con quelli della nostra esistenza, ma piuttosto brevi in rapporto all'età del nostro pianeta.

La variazione dell'eccentricità dell'orbita ha un duplice effetto sull'insolazione della Terra; questo movimento infatti agisce sull'ampiezza dell'oscillazione calorica dovuta alla precessione degli equinozi ed inoltre fa variare l'insolazione totale annua. Quest'ultimo effetto è molto modesto: l'insolazione totale della Terra è variata al massimo dello 0,3% durante l'ultimo milione di anni per effetto dell'eccentricità dell'orbita.

La precessione degli equinozi ed il mutamento dell'inclinazione dell'asse terrestre, invece, non alterano l'insolazione totale, ma fanno variare l'escursione calorica annua, di modo che sulla superficie terrestre si alternano condizioni climatiche con contrasti stagionali ora più, ora meno marcati.

Il fatto che questi movimenti non alterino sostanzialmente l'insolazione totale della Terra, ma soltanto la sua distribuzione secondo la latitudine, potrebbe far pensare che i loro effetti sul clima siano di modesta entità. Sappiamo invece che, secondo la teoria di Milankovitch, i moti millenari sono da considerare come una delle cause principali delle glaciazioni, che si sono verificate verosimilmente cinque volte nel corso dell'ultima Era (il Quaternario o Neozoico, iniziato circa 2 milioni di anni fa) della storia del nostro pianeta (vedi Figura 2.17).

L'effettivo ruolo che questi movimenti rivestono nel favorire l'espansione dei ghiacciai si comprende facilmente ove si consideri che una delle cause determinanti dell'alternarsi di epoche glaciali e interglaciali non è tanto la variazione dell'insolazione globale della Terra, ma piuttosto l'insolazione estiva, che alle alte latitudini varia anche del 20%, cioè molto più della insolazione

totale, in conseguenza dei moti millenari della Terra.

Nelle zone poste alle alte latitudini (ed anche sui rilievi montuosi delle quote più elevate) la neve si accumula facilmente anche durante un inverno relativamente mite, come è quello che si verifica in prossimità del perielio. Ma è importante considerare quanta della neve caduta in inverno riesce a conservarsi durante l'estate: ciò dipende essenzialmente dall'entità dell'insolazione estiva. Se la radiazione solare che raggiunge le alte latitudini durante la stagione estiva è inferiore alla norma, come accade quando l'estate si verifica in afelio, le nevi cadute durante la stagione fredda non riescono a sciogliersi completamente, ma si vanno accumulando di anno in anno e lentamente si trasformano in ghiaccio. In questo modo cominciano ad espandersi le calotte di ghiaccio e il nostro pianeta entra in un'epoca glaciale. Se invece durante l'estate l'insolazione aumenta, come accade quando questa stagione si verifica al perielio, si scioglie una quantità di ghiaccio maggiore di quella che può essere sostituita dalle nevi invernali; quindi i ghiacciai tendono a ritirarsi e sulla Terra si instaura un clima più caldo.

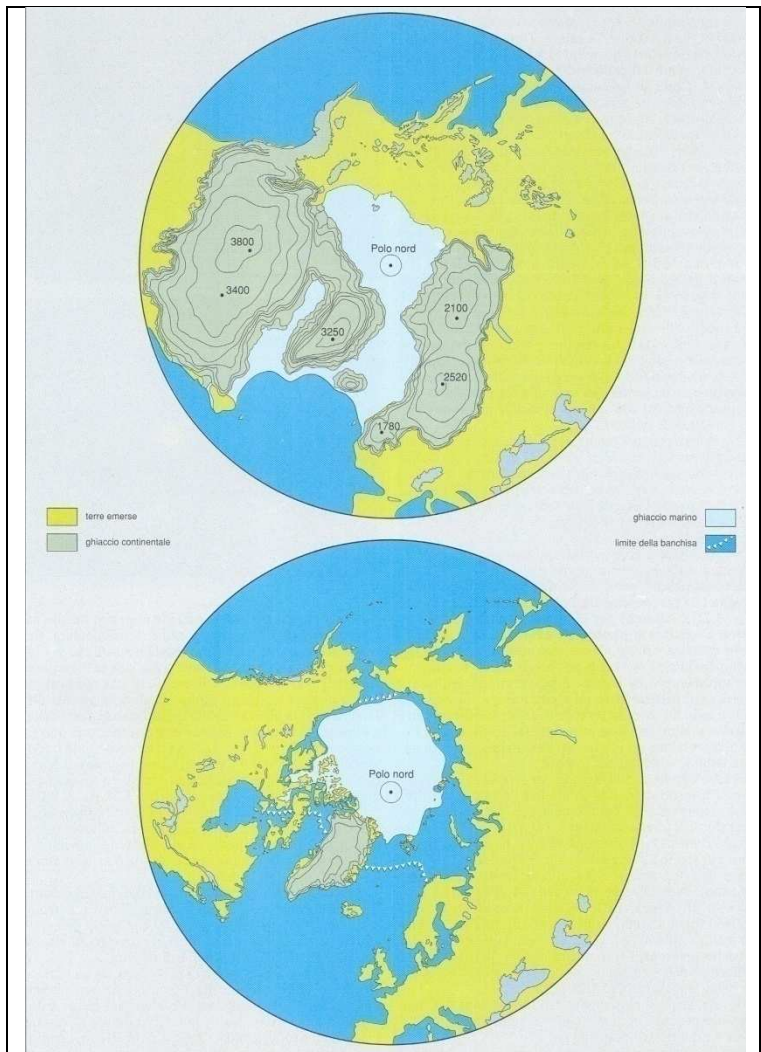


Figura 2.17 – In alto: circa 20.000 anni fa, al culmine della *glaciazione würmiana*, la più recente delle epoche glaciali quaternarie, l'emisfero boreale della Terra era ricoperto da calotte glaciali con spessori di diversi chilometri; l'acqua sottratta agli oceani era tanta che la Siberia e l'America Settentrionale erano unite da un istmo. La distribuzione del ghiaccio è stata ricostruita sulla base delle forme di erosione e dei depositi lasciati dai ghiacciai e mediante dati paleontologici (resti fossili di organismi vissuti in condizioni di clima molto freddo). In basso: *oggi*, come nelle quattro epoche interglaciali quaternarie, nell'emisfero boreale soltanto la Groenlandia è quasi interamente coperta da una calotta glaciale ed esistono ghiacciai di montagna con dimensioni e spessori ridotti. Nell'emisfero australe è interamente coperta da ghiaccio solo l'Antartide.

