CAPITOLO

10

La Terra: forma e moti

Stai seduto, eppure in questo istante percorri centinaia di metri al secondo intorno all'asse terrestre e quasi trenta chilometri al secondo intorno al Sole.

OBIETTIVI

1. Illustrare le prove della sfericità della Terra e ricostruire la misura di Eratostene.
2. Distinguere sfera, ellissoide e geoide come modelli della forma terrestre.
3. Descrivere il moto di rotazione, le sue prove e le sue conseguenze, e spiegare perché la velocità di rotazione diminuisce dall'equatore ai poli.
4. Descrivere il moto di rivoluzione e distinguere giorno sidereo e solare, anno sidereo e tropico.
5. Spiegare correttamente le stagioni e calcolare l'altezza del Sole a mezzogiorno nei solstizi e negli equinozi.
6. Riconoscere i moti millenari e il loro legame con il clima e con il calendario.

INDICE DEL CAPITOLO

10.1 La forma e le dimensioni della Terra 2
10.2 Il moto di rotazione 5
10.3 Le conseguenze della rotazione 10
10.4 Il moto di rivoluzione 12
10.5 L'inclinazione dell'asse e le stagioni 14
10.6 I moti millenari e il calendario 19

Scienze naturali 1 · Parte II · La Terra nello spazio · versione 1.0
Capitolo 10: La Terra: forma e moti · pagine 241–268 del volume completo · estratto per lo studio

Ogni mattina il Sole sorge, attraversa il cielo e tramonta; d'estate resta alto e il dì sembra non finire mai, d'inverno si affaccia appena sopra i tetti e alle cinque del pomeriggio è già buio. Per migliaia di anni gli esseri umani hanno descritto questi fenomeni come se fosse il cielo a muoversi intorno a una Terra immobile. È una descrizione naturale: nessuno di noi «sente» di muoversi. Eppure, come hai visto nel Capitolo 9, la rivoluzione copernicana ha rovesciato il punto di vista. È la Terra a girare su se stessa e intorno al Sole, e quasi tutto ciò che osserviamo nel cielo (il dì e la notte, il cammino del Sole, le stagioni, perfino la data della Pasqua) è una conseguenza di questi moti.

In questo capitolo partiremo dalla forma del nostro pianeta: come si è capito che è sferico, come lo si è misurato più di duemila anni fa con un bastone e un po' di geometria, e perché oggi i geografi parlano di ellissoide e di geoide. Studieremo poi i due moti principali, la rotazione e la rivoluzione, le prove che li dimostrano e le loro conseguenze. Vedremo perché esistono le stagioni (la spiegazione corretta non è quella che molti danno di istinto) e infine i lenti moti millenari che cambiano l'orientamento dell'asse e la forma dell'orbita, con effetti sul clima e sul calendario.

10.1 La forma e le dimensioni della Terra

10.1.1 Le prove della sfericità

L'idea che la Terra sia una sfera è molto antica. Nel IV secolo a.C. il filosofo greco Aristotele, nel trattato *Sul cielo*, raccolse diverse osservazioni a favore della sfericità; altre si aggiunsero con i viaggi e la navigazione.

- **L'ombra della Terra sulla Luna.** Durante un'eclissi di Luna la Terra si interpone fra il Sole e la Luna, e la sua ombra avanza sul disco lunare. Il bordo dell'ombra è sempre un arco di cerchio, qualunque sia l'orientamento della Terra in quel momento. L'unico solido che proietta sempre un'ombra circolare, da qualunque parte lo si illumini, è la sfera.
- **Le navi all'orizzonte.** Una nave che si allontana in mare aperto non diventa soltanto più piccola: scompare dal basso verso l'alto, prima lo scafo e per ultima la cima dell'albero. Su una superficie piana la vedremmo rimpicciolire intera fino a diventare un punto.
- **Il cielo cambia con la latitudine.** Spostandosi verso sud, alcune stelle australi sorgono sopra l'orizzonte, mentre la Stella Polare si abbassa (Capitolo 8). Aristotele notò che dall'Egitto si vedevano stelle invisibili dalla Grecia: segno che la superficie terrestre è curva in direzione nord-sud.
- **L'orizzonte si allarga salendo.** Da una torre o da una montagna si vede più lontano che dalla riva; un aereo in quota osserva un orizzonte nettamente curvo.

Oggi la prova più diretta sono le fotografie scattate dallo spazio, e la circumnavigazione del globo (la prima fu completata nel 1522 dalla spedizione di Magellano, raccontata dal vicentino Antonio Pigafetta) è diventata un'esperienza comune. Ma è importante capire che la sfericità era stata dimostrata con ragionamenti e osservazioni molti secoli prima.

10.1.2 Eratostene misura la Terra

Intorno al 240 a.C. Eratostene di Cirene, direttore della grande Biblioteca di Alessandria d'Egitto, riuscì a misurare la circonferenza terrestre senza allontanarsi da casa. Il suo ragionamento si basa su due ipotesi: la Terra è sferica e il Sole è così lontano che i suoi raggi arrivano sulla Terra praticamente *paralleli*.

Eratostene sapeva che a Siene (oggi Assuan), molto più a sud, a mezzogiorno del solstizio d'estate il Sole illuminava il fondo dei pozzi: era cioè esattamente sulla verticale, allo **zenit**, il punto del cielo sopra la testa dell'osservatore. Nello stesso giorno e alla stessa ora, ad Alessandria, un'asta verticale (uno *gnomone*) proiettava invece una piccola ombra: i raggi solari formavano con la verticale un angolo pari a 1/50 dell'angolo giro, cioè 7,2°. Se i raggi sono paralleli, quell'angolo è uguale all'angolo al centro della Terra compreso fra i raggi terrestri che passano per le due città (sono angoli alterni interni, Figura 10.1). Dunque la distanza fra Siene e Alessandria, valutata in 5000 stadi, è 1/50 dell'intera circonferenza.

ESEMPIO SVOLTO

Il calcolo di Eratostene

Dati. Angolo fra i raggi solari e la verticale ad Alessandria: 7,2°. Distanza Alessandria–Siene: 5000 stadi.

Proporzione. L'arco sta alla circonferenza come l'angolo al centro sta all'angolo giro:

$$5000 \text{ stadi} : C = 7{,}2° : 360° \;\rightarrow\; C = 5000 \text{ stadi} \times \frac{360°}{7{,}2°} = 5000 \times 50 = 250\,000 \text{ stadi}$$

In chilometri. Qui nasce il problema: non sappiamo con certezza quale stadio usasse Eratostene. Gli stadi antichi variavano da città a città. Con lo stadio «egizio» spesso proposto, di circa 157,5 m, si ottiene $C \approx 250\,000 \times 0{,}1575$ km $\approx 39\,400$ km; con lo stadio attico di circa 185 m si ottiene $C \approx 46\,300$ km. Il valore moderno della circonferenza lungo un meridiano è circa 40 008 km.

Conclusione. A seconda dello stadio, l'errore va da pochi punti percentuali a circa il 15 %. In ogni caso il metodo è corretto, e l'ordine di grandezza (decine di migliaia di chilometri) è giusto: un risultato straordinario per il III secolo a.C.

Il metodo di Eratostene contiene anche altre approssimazioni: Siene non si trova esattamente sul Tropico, le due città non sono esattamente sullo stesso meridiano e la distanza fra loro era stimata, probabilmente, dai tempi di viaggio delle carovane. Alcune fonti antiche riportano un

risultato di 252 000 stadi invece di 250 000. Nessuna di queste incertezze toglie valore all'idea: misurare un angolo e una distanza su un piccolo arco per ricavare le dimensioni dell'intero pianeta.

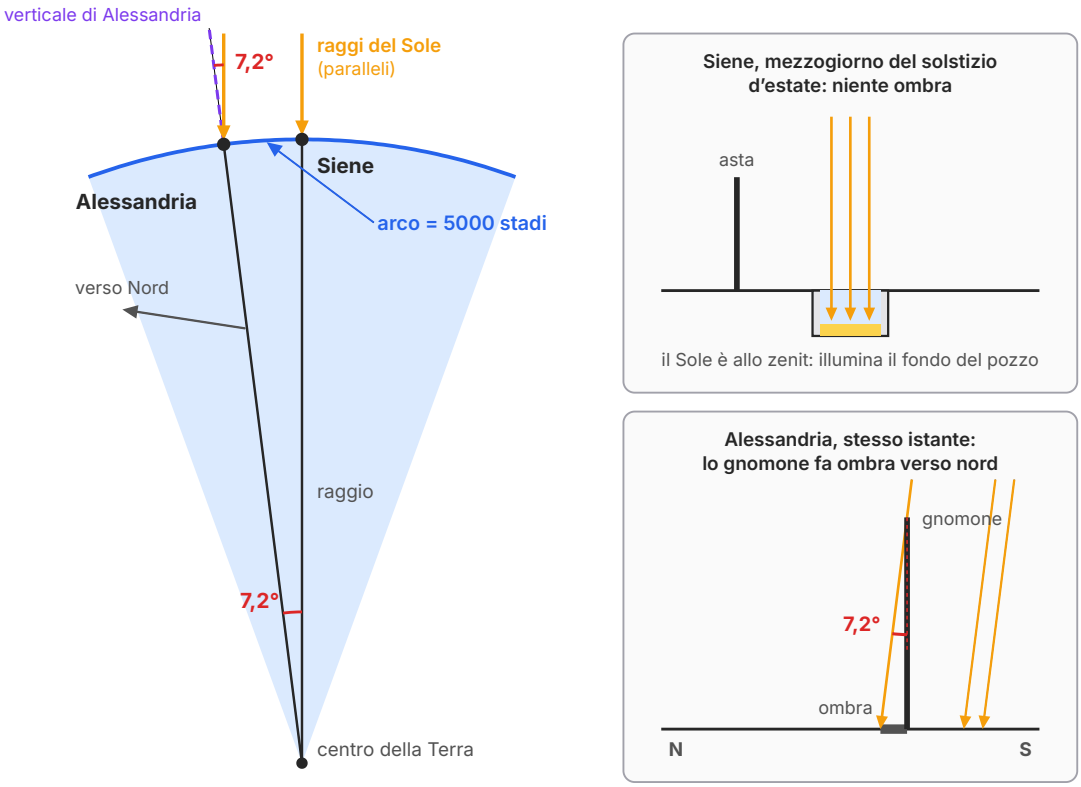


Figura 10.1 La misura di Eratostene. A mezzogiorno del solstizio d'estate i raggi del Sole, praticamente paralleli, sono verticali a Siene e formano un angolo di 7,2° con la verticale ad Alessandria. Per la geometria delle rette parallele (angoli alterni interni), lo stesso angolo separa al centro della Terra i due raggi terrestri: l'arco Siene–Alessandria, 5000 stadi, è quindi 1/50 della circonferenza. L'angolo è disegnato con il suo valore reale; le distanze non sono in scala con le figure di destra.

10.1.3 Dalla sfera all'ellissoide e al geoide

Per molti scopi la Terra si può descrivere come una sfera con raggio medio di 6371 km. Misure più precise mostrano però che il pianeta è leggermente *schiacciato ai poli* e rigonfio all'equatore: il raggio equatoriale è di circa 6378 km, quello polare di circa 6357 km, con una differenza di appena 21 km, cioè circa lo 0,3 %. Se disegnassi la Terra come un cerchio di 10 cm di raggio, la differenza sarebbe di un terzo di millimetro: a occhio la Terra sembra una sfera perfetta.

La figura geometrica che descrive bene questa forma è l'**ellissoide di rotazione**, il solido che si ottiene facendo ruotare un'ellisse intorno al suo asse minore. Un ellissoide è definito da pochi

numeri (i due semiassi) ed è quindi comodo per i calcoli: i navigatori satellitari e le carte geografiche si riferiscono a un ellissoide internazionale.

Neppure l'ellissoide, però, coincide con la forma «vera». La superficie terrestre ha montagne e fosse oceaniche, e soprattutto la materia all'interno del pianeta non è distribuita in modo uniforme, perciò la gravità varia leggermente da un luogo all'altro. I geodeti definiscono allora il **geoide**: la superficie che coincide con il livello medio del mare in quiete, idealmente prolungato anche sotto i continenti, e che in ogni punto è perpendicolare alla direzione del filo a piombo. Il geoide è una superficie irregolare, con ondulazioni che si discostano dall'ellissoide al massimo di un centinaio di metri. È proprio dal geoide che si misurano le quote: quando una carta indica che il Monte Bianco è alto circa 4800 m, intende «sul livello del mare», cioè sul geoide.

DA RICORDARE

Tre modelli per tre usi. La **sfera** ($R \approx 6371$ km) basta per quasi tutti i calcoli di questo libro. L'**ellissoide** è la figura geometrica di riferimento per carte e GPS. Il **geoide** è la superficie fisica del livello medio del mare, da cui si misurano le altitudini.

10.2 Il moto di rotazione

10.2.1 Verso e durata: giorno sidereo e giorno solare

Il **moto di rotazione** è il movimento con cui la Terra gira su se stessa intorno a un asse ideale, l'*asse terrestre*, che passa per il centro e incontra la superficie nei due poli geografici. La Terra ruota da **ovest verso est**: visto dallo spazio sopra il polo Nord, il moto appare in senso **antiorario**. Per questo il Sole e le stelle sembrano sorgere a est e tramontare a ovest: siamo noi a «correre incontro» al Sole verso est.

Quanto dura un giro completo? Dipende dal riferimento che scegliamo. Se prendiamo come riferimento una stella lontanissima, il tempo che intercorre fra due passaggi successivi della stella sul meridiano del luogo è il **giorno sidereo**, che dura 23 h 56 min 4 s: è il vero periodo di rotazione della Terra. Se invece prendiamo come riferimento il Sole, l'intervallo fra due mezzogiorni successivi (due passaggi del Sole sul meridiano locale) è il **giorno solare**, che in media dura 24 h. Gli orologi segnano il tempo solare medio, perché la nostra vita è regolata dal Sole.

Perché i due giorni sono diversi? Mentre ruota, la Terra si sposta anche lungo l'orbita intorno al Sole, di circa $360°/365{,}26 \approx 1°$ al giorno nello stesso verso antiorario. Dopo un giorno sidereo un punto P della superficie è di nuovo rivolto verso la stessa stella, ma il Sole, a causa dello spostamento della Terra, si trova in una direzione un po' diversa: per riaverlo esattamente sul meridiano la Terra deve ruotare ancora di circa 1° (Figura 10.2). Poiché la Terra ruota di 360° in circa 24 h, cioè di 1° ogni 4 minuti, questo supplemento dura circa 4 minuti; il calcolo esatto dà 3 min 56 s.

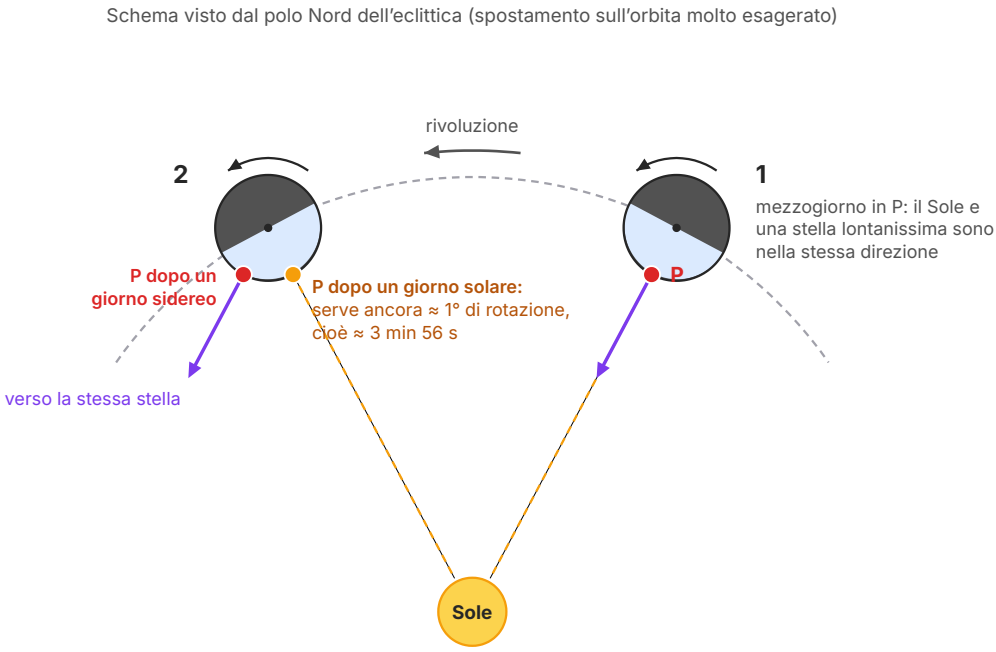


Figura 10.2 Giorno sidereo e giorno solare (schema non in scala; lo spostamento della Terra sull'orbita, in realtà di circa 1° al giorno, è molto esagerato). In 1 il punto P ha il Sole sul meridiano. Dopo una rotazione completa rispetto alle stelle (giorno sidereo) P è di nuovo rivolto verso la stessa stella lontanissima, ma la Terra si è spostata sull'orbita (2): per avere ancora il Sole sul meridiano deve ruotare di circa 1° in più, cioè per circa 3 min 56 s.

ERRORE FREQUENTE

«Il giorno dura 24 ore perché la Terra impiega 24 ore a fare un giro.» Non esattamente: un giro completo rispetto alle stelle dura 23 h 56 min 4 s. Le 24 ore sono la durata media del giorno *solare*, che include il piccolo supplemento di rotazione dovuto al moto di rivoluzione. Una conseguenza osservabile: ogni sera una stella sorge circa 4 minuti prima della sera precedente, e in un anno l'anticipo accumulato è di un giorno intero. È per questo che il cielo notturno cambia con le stagioni.

Attenzione anche a un'altra distinzione di vocabolario. In italiano la parola *giorno* indica l'intervallo di 24 ore; il periodo in cui il Sole è sopra l'orizzonte si chiama **dì** (da cui «mezzodì»), e il suo opposto è la notte. Diremo quindi «la durata del dì varia con le stagioni», non «la durata del giorno».

10.2.2 La velocità di rotazione

Tutti i punti della Terra compiono un giro completo nello stesso tempo: la *velocità angolare* è la stessa ovunque, 360° in un giorno sidereo, cioè circa 15° all'ora. La velocità *lineare*, invece, cioè la distanza percorsa nell'unità di tempo, dipende dalla latitudine: un punto sull'equatore descrive in un giorno una circonferenza di circa 40 000 km, un punto vicino al polo un cerchio piccolissimo, e i poli stessi restano fermi.

Un punto dell'equatore percorre in un giorno circa 40 000 km: la sua velocità è di circa 1670 km/h, più del doppio di quella di crociera di un aereo di linea. Alle nostre latitudini il parallelo è più corto e la velocità minore, circa 1245 km/h a Roma; ai poli la velocità è nulla. La Tabella 10.1 e la Figura 10.3 mostrano come la velocità diminuisca verso i poli; il riquadro di approfondimento che le segue spiega come si calcolano.

Tabella 10.1 Lunghezza del parallelo e velocità lineare di rotazione a diverse latitudini (Terra sferica, R = 6371 km; T = 23 h 56 min 4 s).

Luogo	Latitudine	Lunghezza del parallelo (km)	Velocità (km/h)	Velocità (m/s)
Equatore	0°	40 030	1672	465
Palermo	38,1° N	31 500	1316	366
Roma	41,9° N	29 800	1245	346
Milano	45,5° N	28 060	1172	326
Oslo	59,9° N	20 080	839	233
Polo Nord	90° N	0	0	0

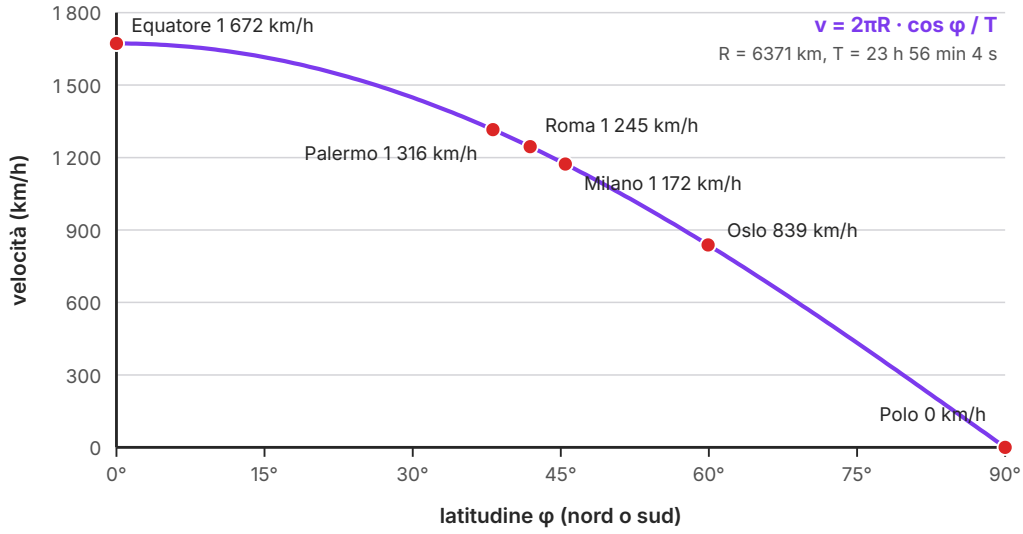


Figura 10.3 Velocità lineare di rotazione in funzione della latitudine, calcolata con $v = 2\pi R \cdot \cos\varphi / T$ per una Terra sferica (R = 6371 km, T = giorno sidereo). La curva vale per entrambi gli emisferi.

APPROFONDIMENTO · CALCOLARE LA VELOCITÀ DI ROTAZIONE

Un punto alla latitudine φ descrive un cerchio, il *parallelo*, il cui raggio è $R \cdot \cos\varphi$. Non serve la trigonometria per usarlo: cos φ è un numero che si legge con la calcolatrice e vale 1 all'equatore (φ = 0°), 0,5 a 60° e 0 ai poli. La velocità lineare di rotazione è allora:

$$v = \frac{2\pi R \cdot \cos\varphi}{T}$$

dove T è il periodo di rotazione (il giorno sidereo, 86 164 s) e R il raggio terrestre. All'equatore, con R = 6371 km, si ottiene $v \approx 0{,}465$ km/s, cioè circa 1670 km/h, il valore citato nel testo. Se nel calcolo si usano 24 h invece del giorno sidereo, il risultato cambia di appena lo 0,3 %.

A che velocità si muove Roma?

Roma si trova a una latitudine di circa 41,9° N. Calcola la velocità lineare di rotazione, in km/h e in m/s.

Lunghezza del parallelo. cos 41,9° ≈ 0,7443; $2\pi R \cdot \cos\varphi = 2\pi \times 6371$ km × 0,7443 ≈ 29 800 km.

Velocità. Il giorno sidereo dura 23 h 56 min 4 s = 23,93 h. v = 29 800 km / 23,93 h ≈ 1245 km/h.

In m/s. 1245 km/h : 3,6 ≈ 346 m/s, più della velocità del suono nell'aria (circa 340 m/s).

COLLEGAMENTI

Storia della scienza: perché non sentiamo di muoverci? Già Galileo, nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi* (1632), rispose con l'esempio della nave: chiuso in una cabina sottocoperta, un viaggiatore non riesce a capire se la nave sia ferma o navighi a velocità costante, perché tutti gli oggetti intorno a lui (l'aria, le gocce che cadono, le farfalle che volano) condividono il moto della nave. Allo stesso modo l'atmosfera e tutto ciò che sta sulla Terra si muove insieme al pianeta. Percepiamo solo le *variazioni* di velocità, e la rotazione terrestre è uniforme. Questo fatto si chiama oggi *principio di relatività galileiana*. Galileo lo espose non in un trattato in latino, ma in un dialogo in italiano fra tre personaggi: la forma letteraria che risale ai dialoghi di Platone.

10.2.3 Le prove della rotazione

Il moto apparente del cielo, da solo, non dimostra che è la Terra a ruotare: potrebbe essere il cielo intero a girare intorno a una Terra ferma, come si credeva fino al Seicento. Servono esperimenti in cui la rotazione produca effetti misurabili sulla Terra stessa.

Il pendolo di Foucault. Nel 1851 il fisico francese Léon Foucault appese sotto la cupola del Panthéon di Parigi una sfera di 28 kg a un filo lungo 67 m e la fece oscillare. Un pendolo, una volta messo in moto, conserva il proprio piano di oscillazione, perché nessuna forza tende a ruotarlo. Eppure, dopo qualche minuto, il pubblico vide che il piano di oscillazione ruotava lentamente in senso orario rispetto al pavimento. In realtà era il pavimento, cioè la Terra, a ruotare sotto il pendolo. Al polo Nord il piano di oscillazione compirebbe un giro completo in un giorno sidereo; all'equatore non ruoterebbe affatto; alle latitudini intermedie il giro richiede più tempo: a Parigi circa 32 ore, a Roma circa 36 ore.

La deviazione verso est dei gravi. Un sasso lasciato cadere dalla cima di una torre molto alta non tocca terra esattamente sulla verticale del punto di partenza, ma un po' più a est: da qualche millimetro a un paio di centimetri, a seconda dell'altezza. La cima della torre, infatti, è più lontana dall'asse terrestre della base: descrive un cerchio più grande e si muove verso est un po' più velocemente. Il sasso conserva questa velocità durante la caduta e quindi «anticipa» la base. Alla fine del Settecento l'abate Giovanni Battista Guglielmini cercò di misurare questo effetto lasciando cadere sfere dalla Torre degli Asinelli di Bologna; nell'Ottocento esperimenti più accurati, in pozzi di miniera profondi oltre cento metri, misurarono deviazioni di un paio di centimetri, in accordo con la teoria.

APPROFONDIMENTO

Uno spettacolo scientifico. L'esperimento di Foucault fu uno dei primi grandi eventi di divulgazione scientifica. Per rendere visibile la rotazione del piano di oscillazione, sotto il pendolo fu disposto un anello di sabbia: a ogni passaggio una punta fissata alla sfera tracciava un nuovo solco, leggermente spostato rispetto al precedente. Il pubblico poteva così «vedere girare la Terra» in pochi minuti. Pendoli di Foucault sono oggi esposti in molti musei della scienza del mondo, e funzionano sempre allo stesso modo.

10.3 Le conseguenze della rotazione

10.3.1 Il dì, la notte e il circolo d'illuminazione

In ogni istante il Sole illumina metà della Terra. La linea che separa l'emisfero illuminato da quello in ombra è un cerchio massimo, perpendicolare ai raggi solari, chiamato **circolo d'illuminazione**. Ruotando, ogni luogo passa dall'emisfero in ombra a quello illuminato (è l'alba) e poi di nuovo nell'ombra (è il tramonto): l'alternarsi del dì e della notte è la conseguenza più evidente della rotazione. Questa alternanza mantiene la temperatura della superficie entro limiti moderati: senza rotazione, una faccia del pianeta resterebbe esposta al Sole per mesi e l'altra si raffredderebbe enormemente.

Il circolo d'illuminazione non divide in due parti uguali tutti i paralleli. Lo fa soltanto agli equinozi, quando passa per i poli; nel resto dell'anno, a causa dell'inclinazione dell'asse, divide in parti uguali solo l'equatore. Per questo all'equatore il dì dura circa 12 ore tutto l'anno, mentre alle altre latitudini dura più o meno di 12 ore a seconda della stagione (paragrafo 10.5).

10.3.2 Il moto apparente del Sole e delle stelle

Poiché la Terra ruota da ovest verso est, tutto il cielo sembra ruotare in verso opposto, da est verso ovest, intorno all'asse del mondo, il prolungamento dell'asse terrestre (Capitolo 8). Il Sole sorge dalla parte di est, sale nel cielo, raggiunge l'altezza massima quando passa sul meridiano del luogo e poi scende verso ovest. L'istante in cui il Sole attraversa il meridiano è il *mezzogiorno vero* (o mezzogiorno locale): in quel momento, nell'emisfero boreale fuori dai tropici, il Sole si trova esattamente a sud e le ombre degli oggetti verticali sono le più corte della giornata e puntano verso nord. Il Sole sorge esattamente a est e tramonta esattamente a ovest solo agli equinozi; d'estate sorge a nord-est e tramonta a nord-ovest, d'inverno sorge a sud-est e tramonta a sud-ovest.

Le stelle compiono lo stesso moto apparente, ruotando di circa 15° all'ora intorno al polo nord celeste, vicinissimo alla Stella Polare; le stelle abbastanza vicine al polo descrivono cerchi completi senza mai tramontare.

10.3.3 L'effetto di Coriolis

Immagina di lanciare un pallone verso nord da un punto dell'equatore. Il pallone possiede la velocità di rotazione verso est dell'equatore, circa 1670 km/h. Mentre vola verso latitudini più alte, il terreno sottostante si muove verso est sempre più lentamente (Tabella 10.1): il pallone «avanza» verso est rispetto al suolo e, per chi lo osserva da terra, la sua traiettoria piega verso destra. Un ragionamento simile vale per qualunque direzione di moto. Questa deviazione apparente, dovuta al fatto che osserviamo il moto da una piattaforma che ruota, si chiama **effetto di Coriolis** (dal nome del fisico francese Gaspard-Gustave de Coriolis, che lo descrisse nel 1835); spesso si parla di *forza di Coriolis*, una forza apparente che non è esercitata da alcun corpo.

La regola da ricordare è semplice: nell'**emisfero boreale** i corpi in movimento orizzontale vengono deviati **verso destra** rispetto alla direzione del moto, nell'**emisfero australe verso sinistra**. L'effetto è nullo all'equatore e massimo ai poli, e diventa importante solo per moti che durano a lungo e coprono grandi distanze: i venti e le correnti oceaniche. È l'effetto di Coriolis a far ruotare in verso antiorario i venti intorno alle aree di bassa pressione dell'emisfero boreale, e in verso orario in quelle dell'emisfero australe (Capitolo 13).

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«Nell'emisfero australe l'acqua del lavandino scende girando al contrario.»** È un mito. In un lavandino o in un water l'effetto di Coriolis è milioni di volte più debole degli effetti dovuti alla forma del recipiente, al modo in cui è stato riempito e ai piccoli movimenti residui dell'acqua. Il verso del vortice dipende da questi fattori e cambia da un lavandino all'altro, nello stesso emisfero. L'effetto di Coriolis conta per i cicloni, larghi centinaia di chilometri, non per l'acqua di casa.

10.3.4 Lo schiacciamento polare

Un corpo che ruota tende a «allargarsi» nella zona più lontana dall'asse: è lo stesso fenomeno che fa allargare la gonna di una ballerina che gira su se stessa o l'impasto della pizza fatto ruotare in aria. La Terra, che non è perfettamente rigida, ha assunto nel tempo la forma di un ellissoide rigonfio all'equatore e appiattito ai poli: lo **schiacciamento polare** è dunque una conseguenza della rotazione. Isaac Newton lo aveva previsto teoricamente alla fine del Seicento; a metà del Settecento due spedizioni dell'Accademia delle Scienze di Parigi, una in Lapponia e una nelle Ande del Perù, misurarono la lunghezza di un grado di meridiano vicino al polo e vicino all'equatore, e confermarono che la Terra è schiacciata ai poli.

10.4 Il moto di rivoluzione

10.4.1 L'orbita terrestre

Il **moto di rivoluzione** è il movimento con cui la Terra percorre la sua orbita intorno al Sole. Come tutti i pianeti, la Terra si muove su un'orbita ellittica, con il Sole in uno dei fuochi (prima legge di Keplero, Capitolo 9), e nello stesso verso della rotazione: antiorario per chi guarda da sopra il polo Nord. Il piano dell'orbita terrestre si chiama **piano dell'eclittica**, perché è lungo il suo prolungamento sulla sfera celeste che il Sole sembra muoversi durante l'anno e che avvengono le eclissi.

L'ellisse terrestre è quasi una circonferenza: la sua eccentricità è circa 0,017. La distanza dal Sole varia quindi poco, fra due valori estremi:

- il **perielio**, il punto dell'orbita più vicino al Sole, a circa 147,1 milioni di km, che la Terra raggiunge all'inizio di **gennaio**;
- l'**afelio**, il punto più lontano, a circa 152,1 milioni di km, che la Terra raggiunge all'inizio di **luglio**.

La media dei due valori è 149,6 milioni di km, cioè 1 unità astronomica (UA). Per percorrere un'orbita di circa 940 milioni di km in un anno la Terra viaggia alla velocità media di circa **29,8 km/s**, più di 100 000 km all'ora. Per la seconda legge di Keplero la velocità non è costante: è un po' maggiore al perielio (circa 30,3 km/s) e un po' minore all'afelio (circa 29,3 km/s). Per questo il semestre invernale dell'emisfero boreale, che comprende il perielio, è qualche giorno più breve di quello estivo.

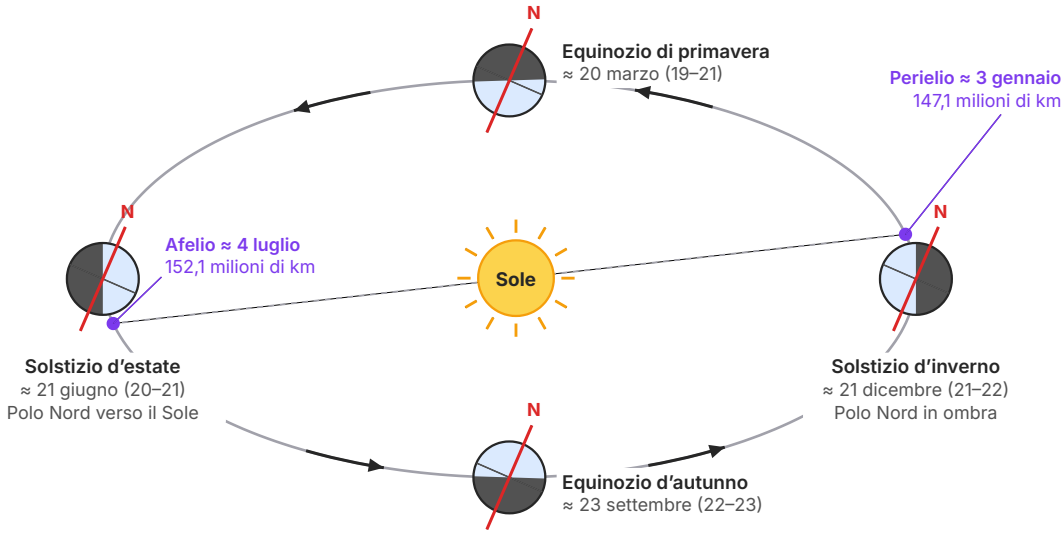


Figura 10.4 L'orbita della Terra e le stagioni dell'emisfero boreale, in prospettiva. L'asse (in rosso) resta inclinato di 23,44° e parallelo a se stesso: al solstizio di giugno il polo Nord è rivolto verso il Sole, a quello di dicembre è in ombra. Il perielio cade a inizio gennaio, l'afelio a inizio luglio. L'orbita è disegnata con la sua eccentricità reale (0,017), perciò appare quasi circolare; dimensioni del Sole e della Terra non in scala.

ESEMPIO SVOLTO

La velocità media di rivoluzione

Calcola la velocità media della Terra lungo l'orbita, considerandola circolare con raggio 1 UA = $1{,}496 \times 10^8$ km e periodo 365,26 giorni.

Lunghezza dell'orbita. $2\pi \times 1{,}496 \times 10^8$ km = $9{,}40 \times 10^8$ km.

Durata in secondi. $365{,}26 \times 86\,400$ s = $3{,}156 \times 10^7$ s.

Velocità. $v = 9{,}40 \times 10^8$ km / $3{,}156 \times 10^7$ s ≈ 29,8 km/s, cioè circa $1{,}07 \times 10^5$ km/h.

10.4.2 Anno sidereo e anno tropico

Anche la durata dell'anno dipende dal riferimento. L'**anno sidereo** è il tempo impiegato dalla Terra per compiere un giro completo dell'orbita rispetto alle stelle lontane: 365,256 giorni, cioè 365 d 6 h 9 min. L'**anno tropico** (o anno solare) è invece l'intervallo fra due passaggi successivi della Terra per l'equinozio di primavera: dura 365,242 giorni, cioè 365 d 5 h 49 min, circa 20 minuti in meno. La differenza è dovuta alla precessione degli equinozi (paragrafo 10.6), che sposta

lentamente la posizione degli equinozi lungo l'orbita «incontro» alla Terra. Poiché le stagioni si ripetono con il ritmo dell'anno tropico, è su questo che si basa il calendario.

10.4.3 Le prove della rivoluzione

La rivoluzione della Terra fu accettata da quasi tutti gli astronomi già nel Seicento, grazie alle leggi di Keplero, alle osservazioni di Galileo e alla gravitazione di Newton (Capitolo 9). Le prove dirette, però, arrivarono più tardi, perché gli effetti da misurare sono minuscoli.

- **La parallasse annua delle stelle.** Se la Terra gira intorno al Sole, nel corso dell'anno le stelle più vicine devono spostarsi leggermente rispetto a quelle più lontane (Capitolo 8). Lo spostamento è inferiore a un secondo d'arco anche per la stella più vicina, ed è stato misurato per la prima volta solo nel 1838, da Friedrich Bessel.
- **L'aberrazione della luce.** Nel 1728 l'astronomo inglese James Bradley scoprì che tutte le stelle descrivono nel corso dell'anno piccole ellissi apparenti, con un semiasse maggiore di circa 20″. La causa è la combinazione fra la velocità finita della luce e la velocità della Terra sull'orbita, un po' come la pioggia che cade verticale sembra arrivare obliqua a chi corre. È stata la prima prova osservativa diretta della rivoluzione terrestre.

10.5 L'inclinazione dell'asse e le stagioni

10.5.1 Un asse inclinato e sempre parallelo a se stesso

L'asse di rotazione della Terra non è perpendicolare al piano dell'orbita: è inclinato di circa **23,44**° rispetto alla perpendicolare, cioè forma un angolo di 66,56° con il piano dell'eclittica. Questo angolo si chiama **obliquità** dell'asse terrestre. C'è un secondo fatto, altrettanto importante: durante la rivoluzione l'asse resta **parallelo a se stesso**, puntando sempre nella stessa direzione dello spazio, vicino alla Stella Polare (Figura 10.4). Di conseguenza, in un punto dell'orbita è il polo Nord a essere inclinato verso il Sole, sei mesi dopo è il polo Sud.

10.5.2 Perché esistono le stagioni

Le **stagioni** sono variazioni periodiche della temperatura e della durata del dì che si ripetono ogni anno. Sono causate dall'inclinazione dell'asse e dal suo parallelismo, attraverso due effetti che agiscono insieme.

1. L'inclinazione dei raggi solari. Quando il Sole è alto nel cielo, un fascio di raggi colpisce il suolo quasi perpendicolarmente e la sua energia si concentra su una superficie piccola. Quando il Sole è basso, lo stesso fascio si «allunga» su una superficie molto più grande, e ogni metro quadrato riceve meno energia. In più, i raggi obliqui attraversano uno spessore maggiore di atmosfera, che ne assorbe e diffonde una parte. Nell'emisfero inclinato verso il Sole i raggi arrivano più vicini alla perpendicolare: è estate.

2. La durata del dì. Nell'emisfero inclinato verso il Sole il circolo d'illuminazione taglia i paralleli in modo che la parte illuminata sia più lunga di quella in ombra: i dì durano più delle notti, e il suolo ha più ore per scaldarsi e meno per raffreddarsi. A 45° N il dì dura circa 15 ore e mezza a fine giugno e meno di 9 ore a fine dicembre.

COLLEGAMENTI

Geometria: la torcia sul tavolo. Punta una torcia perpendicolarmente su un tavolo: ottieni un cerchio luminoso piccolo e brillante. Inclinala: la macchia diventa un'ellisse più grande e più fioca, perché la stessa luce si distribuisce su un'area maggiore. Con il Sole alto 30° sull'orizzonte, un fascio di raggi illumina una superficie doppia rispetto a quella che illuminerebbe con il Sole allo zenit, e ogni metro quadrato riceve metà dell'energia. A 45° N, a mezzogiorno, la superficie illuminata dallo stesso fascio è circa 1,08 volte quella minima il 21 giugno e circa 2,7 volte il 21 dicembre.

ERRORE FREQUENTE

«D'estate fa caldo perché la Terra è più vicina al Sole.» È falso. La Terra è più vicina al Sole all'inizio di gennaio (perielio), in pieno inverno boreale, e più lontana all'inizio di luglio. La differenza di distanza è di appena il 3 % circa e cambia l'energia ricevuta da tutto il pianeta di circa il 7 %, troppo poco per spiegare le stagioni. La prova decisiva: quando in Italia è estate, in Argentina e in Australia è inverno, eppure i due emisferi sono alla stessa distanza dal Sole. Le stagioni dipendono dall'inclinazione dei raggi e dalla durata del dì, cioè dall'inclinazione dell'asse.

10.5.3 Solstizi ed equinozi

Quattro posizioni dell'orbita segnano l'inizio delle stagioni astronomiche. Le date esatte variano di circa un giorno da un anno all'altro, perché l'anno tropico non dura un numero intero di giorni e il calendario lo recupera con gli anni bisestili.

- **Solstizio d'estate** (20–21 giugno): il polo Nord è inclinato verso il Sole. A mezzogiorno il Sole è allo zenit sul **Tropico del Cancro**, il parallelo a 23,44° N. Nell'emisfero boreale è il dì più lungo dell'anno; tutta la regione oltre il circolo polare artico ha luce per 24 ore (Figura 10.5).
- **Equinozio d'autunno** (22–23 settembre) ed **equinozio di primavera** (19–21 marzo): l'asse non è inclinato né verso il Sole né in verso opposto; il circolo d'illuminazione passa per i poli e il Sole a mezzogiorno è allo zenit sull'equatore. Il dì dura circa 12 ore in tutta la Terra (ai poli il Sole scorre lungo l'orizzonte): è il significato della parola **equinozio**, «notte uguale».
- **Solstizio d'inverno** (21–22 dicembre): il polo Sud è inclinato verso il Sole, che a mezzogiorno è allo zenit sul **Tropico del Capricorno** (23,44° S). Nell'emisfero boreale è il dì più breve dell'anno e oltre il circolo polare artico il Sole non sorge.

Nell'emisfero australe le stagioni sono invertite: il solstizio di dicembre vi segna l'inizio dell'estate. Per evitare equivoci gli astronomi chiamano spesso i solstizi e gli equinozi con il nome del mese (solstizio di giugno, equinozio di marzo…).

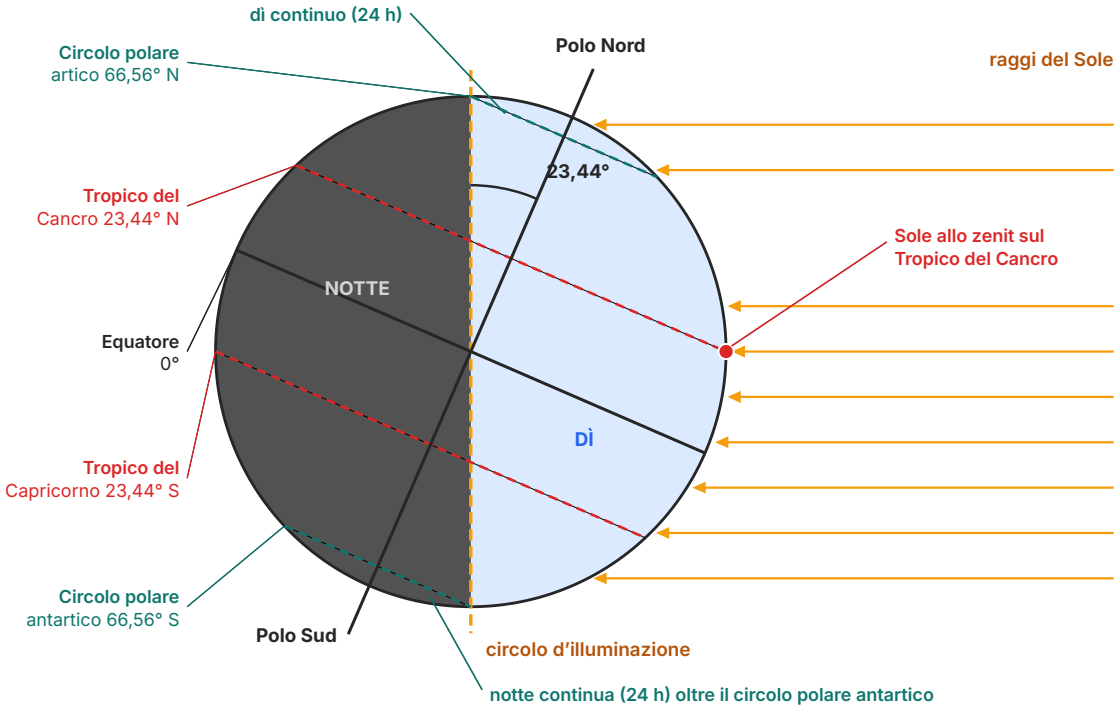


Figura 10.5 L'illuminazione della Terra al solstizio di giugno, in sezione lungo il meridiano rivolto verso il Sole. I raggi arrivano paralleli da destra; il circolo d'illuminazione è perpendicolare ai raggi e forma un angolo di 23,44° con l'asse. Il Sole è allo zenit sul Tropico del Cancro; il circolo d'illuminazione è tangente ai due circoli polari, perciò tutta la calotta artica resta illuminata durante l'intera rotazione e quella antartica resta al buio. L'equatore è diviso a metà: lì il dì dura 12 ore. Paralleli disegnati nelle posizioni reali.

La parola *solstizio* significa «Sole fermo»: nei giorni intorno al solstizio l'altezza del Sole a mezzogiorno cambia pochissimo da un giorno all'altro, e il Sole sembra arrestarsi prima di invertire il suo cammino verso nord o verso sud.

10.5.4 L'altezza del Sole a mezzogiorno

L'**altezza del Sole** è l'angolo fra la direzione del Sole e il piano dell'orizzonte: 0° quando il Sole è sull'orizzonte, 90° quando è allo zenit. A mezzogiorno vero l'altezza è massima e, per un luogo dell'emisfero boreale alla latitudine φ (fuori dalla zona tropicale), si calcola con regole semplici:

$$\text{equinozi: } h = 90° - \varphi$$

$$\text{solstizio di giugno: } h = 90° - \varphi + 23{,}44°$$

$$\text{solstizio di dicembre: } h = 90° - \varphi - 23{,}44°$$

La prima relazione si capisce bene pensando a due casi limite: all'equatore ($\varphi = 0°$), negli equinozi, il Sole a mezzogiorno è allo zenit ($h = 90°$); al polo Nord ($\varphi = 90°$) è sull'orizzonte ($h = 0°$). Ai solstizi il Sole è spostato di 23,44° verso nord (giugno) o verso sud (dicembre) rispetto alla sua posizione equinoziale. Se il calcolo per dicembre dà un valore negativo, significa che il Sole a mezzogiorno resta sotto l'orizzonte: è la notte polare.

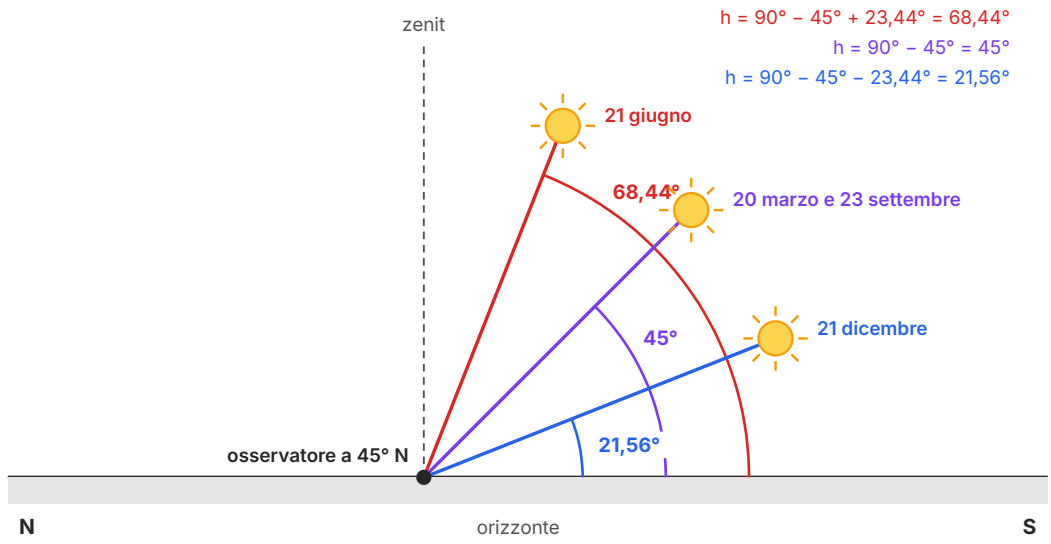


Figura 10.6 Altezza del Sole a mezzogiorno vero per un osservatore a 45° N, nelle quattro date principali (gli equinozi coincidono). Gli angoli sono disegnati con il loro valore reale: fra giugno e dicembre l'altezza varia di 2 × 23,44° = 46,88°.

ESEMPIO SVOLTO

Il Sole a Roma nelle quattro date

Calcola l'altezza del Sole a mezzogiorno a Roma ($\varphi \approx 41{,}9°$ N) agli equinozi e ai due solstizi.

Equinozi. $h = 90° - 41{,}9° = 48{,}1°$.

Solstizio di giugno. $h = 48{,}1° + 23{,}44° = 71{,}5°$.

Solstizio di dicembre. $h = 48{,}1° - 23{,}44° = 24{,}7°$.

Controllo. La differenza fra l'altezza estiva e quella invernale è $71{,}5° - 24{,}7° = 46{,}8°$, cioè due volte l'obliquità ($2 \times 23{,}44° = 46{,}88°$, uguale entro l'arrotondamento): vale in ogni luogo fuori dai tropici e dai circoli polari.

Tabella 10.2 Il Sole nelle quattro date principali, visto da un luogo a 45° N (per esempio vicino a Torino). Altezza del Sole a mezzogiorno; durata del dì calcolata geometricamente per il centro del Sole (la rifrazione atmosferica e il diametro del disco solare la allungano di circa dieci minuti); lunghezza dell'ombra di mezzogiorno di un'asta verticale alta 1 m.

Data	Sole allo zenit su	Altezza	Dì	Ombra
equinozio di marzo	equatore	45,0°	≈ 12 h	1,00 m
solstizio di giugno	Tropico del Cancro	68,4°	≈ 15 h 25 min	0,40 m
equinozio di settembre	equatore	45,0°	≈ 12 h	1,00 m
solstizio di dicembre	Tropico del Capricorno	21,6°	≈ 8 h 35 min	2,53 m

10.5.5 Le zone astronomiche

I tropici e i circoli polari dividono la superficie terrestre in cinque **zone astronomiche**, definite in base all'illuminazione solare (Figura 10.5).

- **Zona torrida** (o intertropicale), fra i due tropici: è l'unica regione in cui il Sole può trovarsi allo zenit, due volte l'anno (una sola volta esattamente sui tropici). La durata del dì varia poco nel corso dell'anno, intorno alle 12 ore. Occupa circa il 40 % della superficie terrestre.
- **Zone temperate**, una per emisfero, fra i tropici e i circoli polari (66,56° N e S): il Sole non è mai allo zenit, ma sorge e tramonta ogni giorno; la durata del dì varia molto nel corso dell'anno e le stagioni sono ben marcate. Insieme occupano circa il 52 % della superficie.
- **Zone glaciali** (o polari), oltre i circoli polari: per almeno un giorno all'anno il Sole non tramonta mai (**dì polare**) e per almeno un giorno non sorge mai (**notte polare**). Sui circoli polari il fenomeno dura un solo giorno, ai poli circa sei mesi. Insieme occupano circa l'8 % della superficie.

Il **circolo polare artico** e il circolo polare antartico si trovano a 66,56° di latitudine, cioè a 23,44° dai poli: è proprio l'obliquità dell'asse a stabilirne la posizione, come quella dei tropici. Le zone astronomiche sono un primo modello dei climi della Terra, che studierai nel Capitolo 14; i climi reali dipendono però anche da altri fattori, come l'altitudine e la distanza dal mare.

IN SINTESI

Le relazioni del capitolo. Circonferenza (Eratostene): C = arco × 360° / angolo. Velocità di rotazione (approfondimento): $v = 2\pi R \cdot \cos\varphi / T$, con T = 23 h 56 min 4 s. Altezza del Sole a mezzogiorno (emisfero boreale, φ fra 23,44° e 66,56°): $h = 90° - \varphi$ agli equinozi, ± 23,44° ai solstizi di giugno (+) e dicembre (−). Tropici a ± 23,44°, circoli polari a ± 66,56°.

10.6 I moti millenari e il calendario

10.6.1 La precessione degli equinozi

L'asse terrestre è «parallelo a se stesso» solo sulla scala di pochi anni. Su tempi lunghi cambia lentamente direzione, come l'asse di una trottola che, mentre gira velocissima, descrive un cono più lento. L'attrazione della Luna e del Sole sul rigonfiamento equatoriale tende a «raddrizzare» l'asse; poiché la Terra ruota, invece di raddrizzarsi l'asse descrive un doppio cono intorno alla perpendicolare al piano dell'orbita, mantenendo la stessa inclinazione, in circa **26 000 anni**. Questo moto, in verso opposto a quello di rotazione, si chiama **precessione degli equinozi** (Figura 10.7).

La precessione ha due conseguenze principali.

- **La «stella polare» cambia.** Oggi l'asse punta vicino alla Stella Polare, ma circa 4700 anni fa, all'epoca delle prime piramidi egizie, il polo nord celeste si trovava vicino a Thuban, nella costellazione del Dragone; fra circa 12 000 anni sarà vicino a Vega, la brillante stella della Lira.
- **Gli equinozi si spostano.** I punti dell'orbita in cui cadono solstizi ed equinozi arretrano lentamente, di circa 50″ all'anno: per questo l'anno tropico è circa 20 minuti più breve dell'anno sidereo. La precessione fu scoperta già nel II secolo a.C. dall'astronomo greco Ipparco, confrontando le sue misure con quelle di astronomi più antichi.

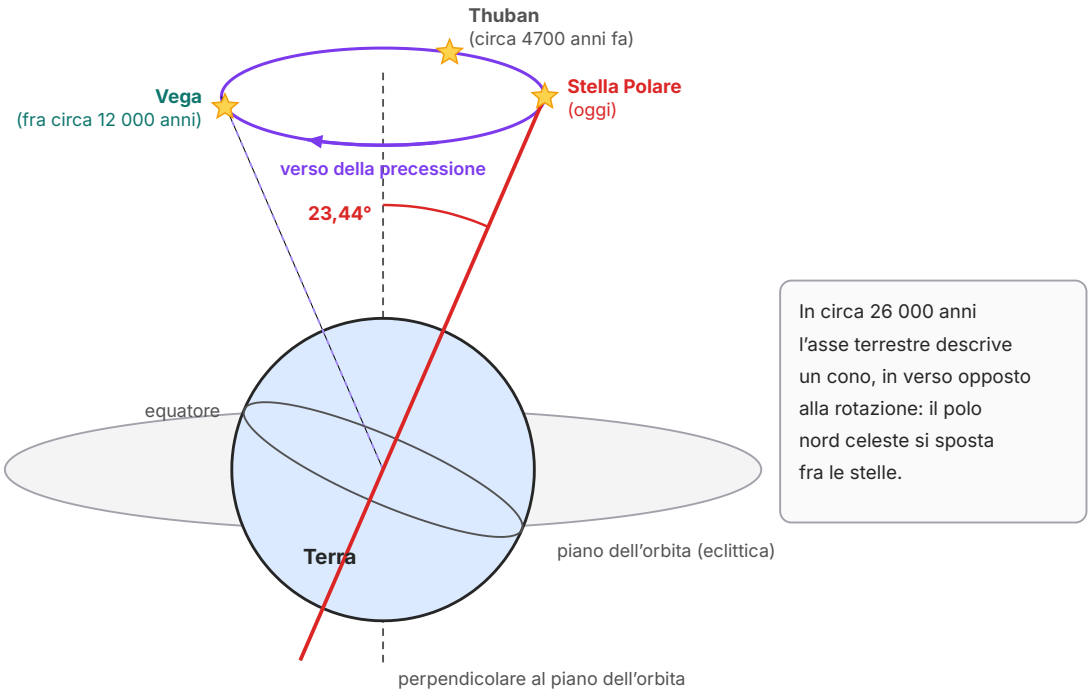


Figura 10.7 La precessione degli equinozi (schema non in scala). Mantenendo la sua inclinazione di 23,44°, l'asse terrestre descrive in circa 26 000 anni un cono intorno alla perpendicolare al piano dell'orbita, in verso opposto a quello della rotazione (orario visto da nord). Il polo nord celeste si sposta così fra le stelle: oggi è vicino alla Stella Polare, circa 4700 anni fa era vicino a Thuban (Dragone), fra circa 12 000 anni sarà vicino a Vega (Lira). Le posizioni delle stelle sul cerchio sono indicative.

Nel corso dei millenni la precessione cambia anche la stagione in cui la Terra si trova al perielio: oggi il perielio cade nell'inverno boreale, fra circa 11 000 anni cadrà nell'estate boreale.

10.6.2 Obliquità ed eccentricità: i cicli di Milanković

Anche gli altri parametri dei moti terrestri variano lentamente, a causa dell'attrazione degli altri pianeti e della Luna (Tabella 10.3):

- l'**obliquità** dell'asse oscilla fra circa 22,1° e 24,5° con un periodo di circa 41 000 anni (oggi vale 23,44° e sta lentamente diminuendo);
- l'**eccentricità** dell'orbita varia fra valori quasi nulli (orbita quasi circolare) e circa 0,06, con un ciclo principale di circa 100 000 anni.

Tabella 10.3 I moti millenari della Terra (valori approssimati).

Moto	Che cosa cambia	Periodo (anni)	Effetto principale
Precessione degli equinozi	direzione dell'asse nello spazio	≈ 26 000	cambia la stella polare e la stagione del perielio
Variazione dell'obliquità	inclinazione dell'asse (22,1°–24,5°)	≈ 41 000	stagioni più o meno marcate
Variazione dell'eccentricità	forma dell'orbita (da quasi circolare a ≈ 0,06)	≈ 100 000	differenza fra energia ricevuta al perielio e all'afelio

Questi moti cambiano poco l'energia totale che la Terra riceve in un anno, ma ne cambiano la distribuzione fra le stagioni e fra le latitudini. Nella prima metà del Novecento l'ingegnere e astronomo serbo Milutin Milanković calcolò come questi **cicli di Milanković** modificano l'insolazione estiva alle alte latitudini dell'emisfero boreale, e propose che da essi dipendesse l'alternarsi delle glaciazioni. Le analisi dei sedimenti oceanici e dei ghiacci antartici, a partire dagli anni Settanta, hanno trovato nel clima del passato proprio i ritmi di 100 000, 41 000 e circa 20 000 anni previsti dalla teoria. Ne riparleremo nel Capitolo 14, a proposito dei cambiamenti climatici naturali.

10.6.3 Il calendario giuliano e il calendario gregoriano

Un buon calendario deve mantenere le stagioni sempre nelle stesse date, e per farlo deve seguire l'anno tropico, che dura circa 365,2422 giorni. Il problema è che un anno civile deve contenere un numero intero di giorni.

Nel 46 a.C. Giulio Cesare, con l'aiuto dell'astronomo alessandrino Sosigene, introdusse a Roma il *calendario giuliano*: tre anni di 365 giorni seguiti da un anno di 366, detto **anno bisestile** perché il giorno in più si otteneva ripetendo («bis») il sesto giorno prima delle calende di marzo. La durata media dell'anno giuliano, 365,25 giorni, è però più lunga dell'anno tropico di circa 11 minuti. Sembra poco, ma è un giorno ogni 128 anni circa: nel Cinquecento l'equinozio di primavera cadeva ormai intorno all'11 marzo, circa dieci giorni prima della data fissata nel 325 dal Concilio di Nicea per il calcolo della Pasqua (21 marzo).

APPROFONDIMENTO

Dieci giorni che non esistettero. La riforma del calendario fu promulgata da papa Gregorio XIII nel 1582, sulla base di una proposta del medico e astronomo calabrese Luigi Lilio, perfezionata dal gesuita Cristoforo Clavio. Per riportare l'equinozio al 21 marzo furono soppressi dieci giorni: in Italia, Spagna e Portogallo il giovedì 4 ottobre 1582 fu seguito direttamente da venerdì 15 ottobre. Per evitare che l'errore si riformasse, la regola dei bisestili fu corretta: sono bisestili gli anni divisibili per 4, *tranne* gli anni secolari (quelli che terminano con 00) non divisibili per 400. Così il 1700, il 1800 e il 1900 non furono bisestili, mentre il 1600 e il 2000 sì. Molti Paesi adottarono la riforma solo più tardi: la Gran Bretagna nel 1752, la Russia nel 1918.

Con questa regola, in 400 anni ci sono 97 anni bisestili e 146 097 giorni, e la durata media dell'anno gregoriano è 365,2425 giorni. La differenza con l'anno tropico è di circa 0,0003 giorni all'anno: il calendario gregoriano, che usiamo ancora oggi, accumulerà un giorno di errore solo in poco più di 3000 anni.

SINTESI

- La Terra è sferica: lo dimostrano l'ombra circolare durante le eclissi di Luna, le navi che scompaiono all'orizzonte, il cielo che cambia con la latitudine.
- Eratostene (circa 240 a.C.) misurò la circonferenza terrestre: un angolo di 7,2° corrispondeva a 5000 stadi, quindi la circonferenza era di 250 000 stadi, tra circa 39 000 e 46 000 km secondo il valore dello stadio.
- La Terra è un ellissoide schiacciato ai poli (raggi 6378 e 6357 km); il geoide coincide con il livello medio del mare e serve per misurare le quote.
- La rotazione avviene da ovest verso est (antioraria vista dal polo Nord) in un giorno sidereo di 23 h 56 min 4 s; il giorno solare medio dura 24 h perché la Terra avanza di circa 1° al giorno lungo l'orbita.
- La velocità lineare di rotazione diminuisce dall'equatore ai poli: circa 1670 km/h all'equatore, circa 1245 km/h a Roma, zero ai poli.
- Prove della rotazione: il pendolo di Foucault (1851) e la deviazione verso est dei gravi. Conseguenze: alternanza dì/notte, moto apparente del Sole e delle stelle, effetto di Coriolis (deviazione a destra nell'emisfero boreale), schiacciamento polare.
- La rivoluzione avviene su un'orbita quasi circolare (eccentricità 0,017) alla velocità media di 29,8 km/s; perielio a inizio gennaio (147,1 milioni di km), afelio a inizio luglio (152,1 milioni di km).
- L'anno sidereo dura 365,256 giorni, l'anno tropico, su cui si basa il calendario, 365,242 giorni. La parallasse e l'aberrazione della luce provano la rivoluzione.
- Le stagioni dipendono dall'inclinazione dell'asse (23,44°) e dal suo parallelismo, che cambiano l'inclinazione dei raggi solari e la durata del dì; non dipendono dalla distanza dal Sole.
- A mezzogiorno $h = 90° - \varphi$ agli equinozi, $\pm 23{,}44°$ ai solstizi. Tropici e circoli polari delimitano zona torrida, zone temperate e zone glaciali.
- Precessione (≈ 26 000 anni), obliquità (≈ 41 000 anni) ed eccentricità (≈ 100 000 anni) formano i cicli di Milanković, legati alle glaciazioni.
- Il calendario gregoriano (1582) corregge l'errore di quello giuliano: gli anni secolari sono bisestili solo se divisibili per 400.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale osservazione, già citata da Aristotele, dimostra che la Terra è sferica?
   A. Il Sole sorge sempre esattamente a est.
   B. Durante le eclissi di Luna l'ombra della Terra ha sempre il bordo a forma di arco di cerchio.
   C. La Luna mostra sempre la stessa faccia.
   D. Le stelle ruotano intorno alla Stella Polare.

2. ● Il geoide è:
   A. una sfera perfetta con raggio di 6371 km
   B. il solido ottenuto ruotando un'ellisse intorno al suo asse minore
   C. la superficie che coincide con il livello medio del mare, prolungata sotto i continenti
   D. la superficie reale del suolo, con montagne e fosse oceaniche

3. ● Vista da sopra il polo Nord, la Terra ruota:
   A. in senso antiorario, da ovest verso est
   B. in senso orario, da ovest verso est
   C. in senso antiorario, da est verso ovest
   D. in senso orario, da est verso ovest

4. ●● Il giorno solare medio è più lungo del giorno sidereo di circa 4 minuti perché:
   A. la rotazione terrestre sta rallentando
   B. l'orbita della Terra è un'ellisse
   C. l'asse terrestre è inclinato di 23,44°
   D. mentre ruota, la Terra avanza sull'orbita di circa 1° al giorno

5. ● Nell'emisfero boreale l'effetto di Coriolis devia i corpi in movimento:
   A. verso sinistra
   B. verso destra
   C. sempre verso est
   D. sempre verso l'equatore

6. ● La Terra passa al perielio:
   A. intorno al 21 giugno
   B. intorno al 20 marzo
   C. all'inizio di gennaio
   D. all'inizio di luglio

7. ●● L'anno tropico è:
   A. il tempo di una rivoluzione completa rispetto alle stelle lontane
   B. lungo 365,256 giorni
   C. l'intervallo fra due passaggi successivi al perielio
   D. l'intervallo fra due equinozi di primavera successivi, su cui si basa il calendario

8. ●● Al solstizio di giugno, a mezzogiorno, il Sole è allo zenit:
   A. sul Tropico del Cancro
   B. sull'equatore
   C. sul Tropico del Capricorno
   D. sul circolo polare artico

9. ● La precessione degli equinozi ha un periodo di circa:
   A. un anno
   B. 11 anni
   C. 26 000 anni
   D. 100 000 anni

Vero o falso

10. ● D'estate fa caldo perché in quel periodo la Terra è più vicina al Sole.

11. ● Il giorno sidereo, cioè il periodo di rotazione della Terra rispetto alle stelle, dura 23 h 56 min 4 s.

12. ●● Un punto dell'equatore ruota più velocemente di un punto di Milano, ma entrambi compiono un giro completo nello stesso tempo.

13. ● Agli equinozi il dì dura circa 12 ore in tutti i luoghi della Terra, esclusi i poli.

14. ●● Il piano di oscillazione di un pendolo di Foucault ruota alla stessa velocità a tutte le latitudini.

15. ● Nel calendario gregoriano il 1900 non era bisestile, mentre il 2000 lo era.

Applicare e calcolare

16. ● Due città si trovano sullo stesso meridiano a 555 km di distanza. A mezzogiorno dello stesso giorno l'inclinazione dei raggi solari rispetto alla verticale differisce di 5,0° fra le due città. Ripetendo il ragionamento di Eratostene, calcola la circonferenza e il raggio della Terra.

17. ●● Eratostene ottenne 250 000 stadi. Calcola la circonferenza in km usando (a) lo stadio di 157,5 m e (b) lo stadio di 185 m, e per ciascun valore l'errore percentuale rispetto alla circonferenza lungo un meridiano, 40 008 km.

18. ●● La velocità media della Terra lungo l'orbita è 29,8 km/s. Quanti chilometri percorre in un'ora e in un giorno?

19. ● Calcola l'altezza del Sole a mezzogiorno a Palermo ($\varphi = 38{,}1°$ N) agli equinozi, al solstizio di giugno e al solstizio di dicembre.

20. ●● Calcola l'altezza del Sole a mezzogiorno del solstizio di dicembre a Stoccolma ($\varphi = 59{,}3°$ N) e a Tromsø, in Norvegia ($\varphi = 69{,}6°$ N). Che cosa significa il risultato ottenuto per Tromsø?

21. ●● In una città dell'emisfero boreale, a mezzogiorno dell'equinozio di marzo, il Sole è alto 50° sull'orizzonte. Qual è la latitudine della città? Quanto sarà alto il Sole a mezzogiorno del solstizio di giugno?

22. ●●● L'anno giuliano dura in media 365,25 giorni, l'anno tropico 365,2422 giorni. (a) Di quanti minuti all'anno il calendario giuliano è in errore? (b) Quanti giorni di errore si erano accumulati fra il Concilio di Nicea (325) e il 1582? (c) Verifica che 400 anni gregoriani contengono 146 097 giorni e calcola la durata media dell'anno gregoriano.

Leggere dati e figure

23. ● Osserva la Figura 10.3. A quale latitudine la velocità di rotazione è circa la metà di quella all'equatore? Quale città della figura vi si avvicina di più?

24. ●● Osserva la Tabella 10.2. Come varia l'ombra di mezzogiorno di un'asta alta 1 m nel corso dell'anno? Spiega perché l'ombra più lunga coincide con il periodo più freddo.

25. ●● Osserva la Figura 10.5. (a) In quali regioni il Sole resta sopra l'orizzonte per 24 ore? (b) Perché proprio il circolo polare artico è il limite di questa regione? (c) Che cosa succede, nello stesso giorno, all'equatore?

26. ●● Osserva la Figura 10.4 e usa le date medie dei solstizi e degli equinozi (20 marzo, 21 giugno, 23 settembre, 21 dicembre). Calcola quanti giorni durano l'estate astronomica boreale (dal 21 giugno al 23 settembre) e l'inverno astronomico boreale (dal 21 dicembre al 20 marzo, anno non bisestile). Perché l'inverno è più breve?

Indagare e argomentare

27. ●● Progetta un'esperienza per misurare la latitudine della tua città con un'asta verticale, il giorno di un equinozio. Quali grandezze devi misurare, a che ora, e come ricavi la latitudine? Quali sono le principali fonti di errore?

28. ●● Perché in Australia il Natale cade in piena estate? Spiegalo con la Figura 10.4, facendo riferimento all'inclinazione dei raggi e alla durata del dì.

29. ●●● Immagina che l'asse terrestre fosse perpendicolare al piano dell'orbita. Come cambierebbero le stagioni, la durata del dì nel corso dell'anno, l'altezza del Sole a mezzogiorno e le zone astronomiche?

30. ●● Un amico tornato da Sydney racconta che là l'acqua del lavandino scendeva girando al contrario «per colpa della forza di Coriolis». Spiegagli che cos'è l'effetto di Coriolis, dove è davvero importante e perché la sua spiegazione non regge.

Approfondimento: la velocità di rotazione

31. ●● Calcola la velocità lineare di rotazione, in km/h, di Torino ($\varphi = 45{,}1°$ N; $\cos\varphi = 0{,}706$) e di Helsinki ($\varphi = 60{,}2°$ N; $\cos\varphi = 0{,}497$). Usa $v_{\text{equatore}} = 1672$ km/h.

PER APPROFONDIRE

- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: le pagine sulla forma della Terra, sulla gravità e sul geoide, con le misure moderne della geodesia.
- [SAG] C. Sagan, *Cosmos*: il primo capitolo racconta l'esperimento di Eratostene e la Biblioteca di Alessandria.
- [HAW] S. Hawking, *Dal big bang ai buchi neri*: il primo capitolo ripercorre le prove antiche della sfericità della Terra e il passaggio dal modello geocentrico a quello eliocentrico.

Glossario del capitolo

Afelio
Punto dell'orbita terrestre più lontano dal Sole (≈ 152,1 milioni di km), raggiunto all'inizio di luglio.

Anno bisestile
Anno di 366 giorni; nel calendario gregoriano lo sono gli anni divisibili per 4, esclusi i secolari non divisibili per 400.

Anno tropico
Intervallo fra due equinozi di primavera successivi (365,242 giorni); è la base del calendario.

Cicli di Milanković
Variazioni periodiche di precessione, obliquità ed eccentricità che modificano la distribuzione dell'insolazione e sono legate alle glaciazioni.

Circolo d'illuminazione
Cerchio massimo, perpendicolare ai raggi solari, che separa l'emisfero illuminato da quello in ombra.

Dì
Parte del giorno in cui il Sole è sopra l'orizzonte; il suo opposto è la notte.

Effetto di Coriolis
Deviazione apparente dei corpi in moto osservati sulla Terra in rotazione: verso destra nell'emisfero boreale, verso sinistra in quello australe.

Ellissoide di rotazione
Solido generato dalla rotazione di un'ellisse intorno al suo asse minore; approssima la forma della Terra, schiacciata ai poli (raggi ≈ 6378 km e ≈ 6357 km).

Equinozio
Istante in cui il Sole a mezzogiorno è allo zenit sull'equatore e il dì dura circa 12 ore ovunque (19–21 marzo, 22–23 settembre).

Geoide
Superficie che coincide con il livello medio del mare in quiete, prolungata sotto i continenti e perpendicolare in ogni punto al filo a piombo; è il riferimento per le altitudini.

Giorno sidereo
Periodo di rotazione della Terra rispetto alle stelle lontane: 23 h 56 min 4 s.

Giorno solare
Intervallo fra due passaggi successivi del Sole sul meridiano locale; in media dura 24 h.

Moto di rivoluzione
Movimento della Terra lungo la sua orbita ellittica intorno al Sole, alla velocità media di circa 29,8 km/s.

Moto di rotazione
Movimento della Terra su se stessa intorno all'asse terrestre, da ovest verso est (antiorario visto dal polo Nord).

Obliquità
Inclinazione dell'asse terrestre rispetto alla perpendicolare al piano dell'orbita: oggi circa 23,44°.

Perielio
Punto dell'orbita terrestre più vicino al Sole (≈ 147,1 milioni di km), raggiunto all'inizio di gennaio.

Precessione degli equinozi
Lento moto conico dell'asse terrestre, con periodo di circa 26 000 anni, che sposta il polo celeste e la posizione degli equinozi.

Solstizio
Istante in cui il Sole a mezzogiorno è allo zenit su uno dei tropici; segna il dì più lungo o più breve dell'anno (20–21 giugno, 21–22 dicembre).

Zenit
Punto della sfera celeste che si trova esattamente sulla verticale dell'osservatore.

Zone astronomiche
Le cinque fasce delimitate da tropici e circoli polari: zona torrida, due zone temperate, due zone glaciali.

Soluzioni

1. B. Solo una sfera proietta un'ombra dal bordo sempre circolare, qualunque sia la direzione da cui è illuminata.

2. C. Il geoide è la superficie del livello medio del mare in quiete, prolungata sotto i continenti; la B descrive l'ellissoide.

3. A. La Terra ruota da ovest verso est, in senso antiorario visto dal polo Nord; per questo il cielo sembra ruotare da est verso ovest.

4. D. In un giorno la Terra avanza di circa 360°/365,26 ≈ 1° sull'orbita e deve ruotare di circa 1° in più (≈ 3 min 56 s) per riavere il Sole sul meridiano.

5. B. Nell'emisfero boreale la deviazione è verso destra; nell'australe verso sinistra; all'equatore è nulla.

6. C. Il perielio cade all'inizio di gennaio (≈ 147,1 milioni di km); l'afelio all'inizio di luglio.

7. D. L'anno tropico (365,242 d) è l'intervallo fra due equinozi di primavera; A e B descrivono l'anno sidereo.

8. A. Al solstizio di giugno il Sole è allo zenit sul Tropico del Cancro, 23,44° N.

9. C. Circa 26 000 anni.

10. F. Al perielio (inizio gennaio) la Terra è più vicina al Sole, in pieno inverno boreale. Le stagioni dipendono dall'inclinazione dei raggi e dalla durata del dì, dovute all'inclinazione dell'asse.

11. V. Il giorno solare medio, invece, dura 24 h.

12. V. La velocità angolare è la stessa ovunque (360° in un giorno sidereo); la velocità lineare è maggiore all'equatore, dove il parallelo è più lungo (≈ 1672 km/h contro ≈ 1172 km/h a Milano).

13. V. Agli equinozi il circolo d'illuminazione passa per i poli e divide a metà tutti i paralleli (ai poli il Sole scorre lungo l'orizzonte).

14. F. La rotazione del piano di oscillazione dipende dalla latitudine: un giro in un giorno sidereo ai poli, circa 32 h a Parigi, nessuna rotazione all'equatore.

15. V. Il 1900 è secolare e non divisibile per 400; il 2000 è divisibile per 400.

16. 5,0° è 1/72 dell'angolo giro (360°/5,0° = 72). $C = 72 \times 555\ \text{km} = 39\,960\ \text{km} \approx 4{,}00 \times 10^4\ \text{km}$; $R = C/(2\pi) = 39\,960\ \text{km} / 6{,}283 \approx 6360\ \text{km}$.

17. (a) $250\,000 \times 0{,}1575\ \text{km} = 39\,375\ \text{km} \approx 39\,400\ \text{km}$; errore $(39\,375 - 40\,008)/40\,008 \times 100 \approx -1{,}6\ \%$. (b) $250\,000 \times 0{,}185\ \text{km} = 46\,250\ \text{km} \approx 46\,300\ \text{km}$; errore ≈ +15,6 %.

18. In un'ora: $29{,}8\ \text{km/s} \times 3600\ \text{s} = 107\,280\ \text{km} \approx 1{,}07 \times 10^5\ \text{km}$. In un giorno: $107\,280\ \text{km} \times 24 \approx 2{,}57 \times 10^6$ km.

19. Equinozi: $h = 90° - 38{,}1° = 51{,}9°$. Solstizio di giugno: $51{,}9° + 23{,}44° \approx 75{,}3°$. Solstizio di dicembre: $51{,}9° - 23{,}44° \approx 28{,}5°$.

20. Stoccolma: $h = 90° - 59{,}3° - 23{,}44° \approx 7{,}3°$: il Sole resta bassissimo. Tromsø: $h = 90° - 69{,}6° - 23{,}44° \approx -3{,}0°$: il valore negativo indica che il Sole resta sotto l'orizzonte anche a mezzogiorno. Tromsø è oltre il circolo polare artico (66,56° N) ed è in piena notte polare.

21. All'equinozio $h = 90° - \varphi$, quindi $\varphi = 90° - 50° = 40°$ N. Al solstizio di giugno: $h = 50° + 23{,}44° \approx 73{,}4°$.

22. (a) $365{,}25 - 365{,}2422 = 0{,}0078$ d; $0{,}0078 \times 1440$ min ≈ 11 min all'anno. (b) $1582 - 325 = 1257$ anni; $1257 \times 0{,}0078\ \text{d} \approx 9{,}8\ \text{d} \approx 10$ giorni, proprio i dieci giorni soppressi nel 1582. (c) In 400 anni i bisestili sono $100 - 3 = 97$ (esclusi 3 anni secolari su 4): $400 \times 365 + 97 = 146\,097$ d; $146\,097 / 400 = 365{,}2425$ d.

23. Circa a 60° di latitudine ($\cos 60° = 0{,}5$: ≈ 836 km/h, metà di 1672 km/h). La città più vicina è Oslo (59,9° N, ≈ 839 km/h).

24. L'ombra è minima a giugno (0,40 m), di 1,00 m agli equinozi e massima a dicembre (2,53 m).

Un'ombra lunga significa Sole basso: i raggi arrivano molto obliqui e distribuiscono la stessa energia su una superficie più ampia (circa 2,7 volte quella minima a dicembre), attraversano più atmosfera e il dì è più corto (≈ 8 h 35 min): il suolo riceve meno energia e si raffredda più a lungo.

25. (a) In tutta la calotta oltre il circolo polare artico (66,56° N). (b) Il circolo d'illuminazione, perpendicolare ai raggi, è inclinato di 23,44° rispetto all'asse; quindi è tangente al parallelo che dista 23,44° dal polo, cioè al circolo polare (90° − 23,44° = 66,56°): tutti i paralleli più a nord restano interamente nella parte illuminata. (c) All'equatore il circolo d'illuminazione divide a metà il parallelo: 12 ore di luce e 12 di buio; a mezzogiorno il Sole è alto 66,56°, verso nord.

26. Estate: dal 21 giugno al 23 settembre 9 + 31 + 31 + 23 = 94 giorni. Inverno: dal 21 dicembre al 20 marzo 10 + 31 + 28 + 20 = 89 giorni. L'inverno boreale comprende il perielio, quando la Terra è più vicina al Sole e, per la seconda legge di Keplero, si muove più velocemente: percorre il suo quarto d'orbita in meno tempo.

27. Traccia: il giorno dell'equinozio si pianta un'asta perfettamente verticale (verificata con il filo a piombo) su un piano orizzontale (livella). Si segna l'estremità dell'ombra a intervalli regolari intorno al mezzogiorno vero (che in Italia cade intorno alle 12 oppure alle 13 con l'ora legale, a seconda della longitudine): l'ombra più corta corrisponde al mezzogiorno. Misurati l'altezza a dell'asta e la lunghezza minima b dell'ombra, si disegna in scala il triangolo rettangolo di cateti a e b e si misura con il goniometro l'angolo h opposto all'asta (altezza del Sole); poi $\varphi = 90° - h$. Errori: asta non verticale o terreno non orizzontale, bordo dell'ombra sfumato (penombra), istante del mezzogiorno non individuato bene, data non esattamente equinoziale. Conviene ripetere la misura e fare la media.

28. Traccia: a dicembre è il polo Sud a essere inclinato verso il Sole. Nell'emisfero australe il Sole a mezzogiorno è alto (allo zenit sul Tropico del Capricorno), i raggi arrivano quasi perpendicolari e i dì sono più lunghi delle notti: è estate. La distanza dal Sole è uguale per i due emisferi, quindi non c'entra.

29. Traccia: il Sole sarebbe sempre allo zenit sull'equatore, come oggi agli equinozi. Il circolo d'illuminazione passerebbe sempre per i poli: dì di 12 ore ovunque e per tutto l'anno. L'altezza del Sole a mezzogiorno sarebbe sempre $90° - \varphi$. Non esisterebbero stagioni dovute all'asse (resterebbe solo il piccolo effetto della distanza, circa 7 % di energia in più al perielio), né tropici e circoli polari: niente dì e notte polari, il clima dipenderebbe solo dalla latitudine.

30. Traccia: l'effetto di Coriolis è la deviazione apparente dei corpi in moto osservati da una Terra che ruota: a destra nell'emisfero boreale, a sinistra nell'australe. Conta per moti lunghi su grandi distanze (venti, cicloni, correnti oceaniche). In un lavandino è milioni di volte più debole degli effetti della forma del recipiente e dei moti residui dell'acqua: il verso del vortice è casuale, varia da un lavandino all'altro anche nello stesso emisfero.

31. Torino: 1672 km/h × 0,706 ≈ 1180 km/h (≈ 328 m/s). Helsinki: 1672 km/h × 0,497 ≈ 831 km/h (≈ 231 m/s).