CAPITOLO

11

La Luna e il sistema Terra-Luna

La Luna non brilla di luce propria, eppure è l'oggetto più facile da osservare nel cielo: basta alzare gli occhi e saper guardare.

OBIETTIVI

1. Descrivere le caratteristiche fisiche della Luna, la sua superficie e l'ipotesi più accreditata sulla sua origine.
2. Spiegare i moti della Luna, la rotazione sincrona e la differenza fra mese sidereo e mese sinodico.
3. Riconoscere le fasi lunari, spiegarne la causa e prevedere quando la Luna sorge e tramonta in ciascuna fase.
4. Spiegare la geometria delle eclissi di Sole e di Luna e perché non avvengono ogni mese.
5. Spiegare la causa astronomica delle maree e le differenze fra maree sigiziali e di quadratura.
6. Collegare le maree al lento rallentamento della rotazione terrestre e all'allontanamento della Luna.

INDICE DEL CAPITOLO

11.1 Le caratteristiche fisiche della Luna 2
11.2 I moti della Luna 6
11.3 Le fasi lunari 10
11.4 Le eclissi 14
11.5 Le maree 18
11.6 L'esplorazione della Luna 22

Scienze naturali 1 · Parte II · La Terra nello spazio · versione 1.0
Capitolo 11: La Luna e il sistema Terra-Luna · pagine 269–296 del volume completo · estratto per lo studio

Di tutti i corpi celesti la Luna è quello che conosciamo meglio. È l'unico, oltre alla Terra, su cui degli esseri umani abbiano camminato, e l'unico di cui possiamo vedere a occhio nudo montagne e pianure. Cambia aspetto da una sera all'altra, sorge ogni giorno in ritardo rispetto al giorno prima, a volte oscura il Sole in pieno giorno e a volte diventa rossa nel mezzo della notte. Con la sua attrazione solleva gli oceani due volte al giorno e, senza che ce ne accorgiamo, rallenta la rotazione del nostro pianeta.

Per i popoli antichi la Luna era soprattutto un orologio: il ciclo delle sue fasi, lungo circa un mese, è all'origine della parola stessa «mese» e di molti calendari, alcuni dei quali sono usati ancora oggi. In questo capitolo vedremo come è fatta la Luna e da dove viene, come si muove intorno alla Terra, perché presenta le fasi, come si producono le eclissi e in che modo, insieme al Sole, genera le maree. Nel Capitolo 10 hai studiato i moti della Terra: qui li ritroverai, perché Terra e Luna formano un unico sistema che si muove insieme intorno al Sole.

11.1 Le caratteristiche fisiche della Luna

11.1.1 Dimensioni, massa e gravità

La Luna è l'unico **satellite naturale** della Terra, cioè un corpo celeste che orbita intorno a un pianeta. Ha un diametro di circa 3475 km, poco più di un quarto di quello terrestre (in media circa 12 742 km; 12 756 km all'equatore): in fila, servirebbero meno di quattro Lune per coprire il diametro della Terra (Figura 11.1a). Se confrontiamo i volumi, il rapporto diventa molto più grande: nella Terra entrerebbero circa 50 Lune. La distanza media fra i centri dei due corpi è di circa 384 400 km, pari a una trentina di diametri terrestri; la luce la percorre in poco più di un secondo.

La massa della Luna è circa 1/81 di quella della Terra, e la sua densità media è di circa 3,3 g/cm^3, nettamente inferiore a quella terrestre (5,5 g/cm^3). Una massa così piccola produce una gravità debole: sulla superficie lunare l'accelerazione di gravità vale circa 1,62 m/s^2, cioè circa **1/6** di quella terrestre (9,81 m/s^2). Ricorda però la distinzione fra massa e peso (Capitolo 1): un astronauta che sulla Terra ha una massa di 80 kg ha la stessa massa anche sulla Luna, ma il suo peso, cioè la forza con cui la Luna lo attira, è circa sei volte minore. Per questo gli astronauti delle missioni Apollo, pur con tute pesantissime, si muovevano a balzi.

Tabella 11.1 La Luna e la Terra a confronto (valori medi arrotondati, dati NASA).

Grandezza	Luna	Terra
Diametro medio	≈ 3475 km	≈ 12 742 km
Massa	$7{,}35 \times 10^{22}$ kg	$5{,}97 \times 10^{24}$ kg
Densità media	3,34 g/cm³	5,51 g/cm³
Accelerazione di gravità in superficie	1,62 m/s²	9,81 m/s²
Velocità di fuga	2,4 km/s	11,2 km/s
Periodo di rotazione (rispetto alle stelle)	27,32 d	23 h 56 min
Temperatura superficiale (estremi all'equatore)	da ≈ −173 °C a ≈ +127 °C	media ≈ 15 °C

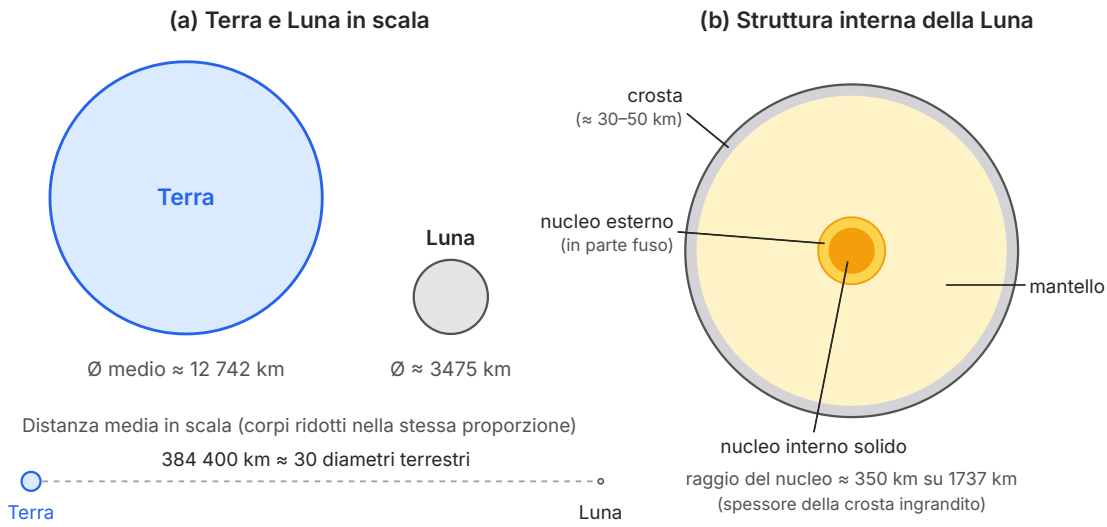


Figura 11.1 (a) Le dimensioni della Terra e della Luna in scala e, sotto, la loro distanza media con i corpi ridotti nella stessa proporzione: lo spazio fra i due corpi è molto più grande di quanto suggeriscano i disegni abituali. (b) Sezione schematica della Luna: crosta, mantello e un piccolo nucleo ricco di ferro, in parte fuso.

11.1.2 Un mondo senza aria

La Luna non ha una vera atmosfera. Esiste soltanto un velo di gas così rarefatto che, in pratica, la sua superficie si trova nel vuoto. Il motivo è la gravità debole: la **velocità di fuga**, cioè la velocità minima che un oggetto deve avere per allontanarsi definitivamente da un corpo celeste, sulla Luna è di soli 2,4 km/s. Alle temperature del dì lunare le molecole di un gas si muovono in media a qualche centinaio di metri al secondo, ma una piccola parte di esse supera la velocità

di fuga; in più il vento solare strappa continuamente gas alla superficie. Nel corso di miliardi di anni quasi tutto il gas è sfuggito nello spazio.

L'assenza di atmosfera ha molte conseguenze, tutte facili da immaginare.

- **Il cielo è nero** anche di giorno, perché manca l'aria che diffonde la luce del Sole (il cielo terrestre è azzurro proprio per questa diffusione). Le stelle sono visibili anche con il Sole alto.
- **Non c'è suono**: il suono è un'onda che si propaga in un mezzo materiale, e nel vuoto non può viaggiare.
- **L'escursione termica è enorme.** Sulla Terra l'atmosfera trattiene il calore e lo ridistribuisce con i venti. Sulla Luna il dì dura circa due settimane terrestri e la notte altrettanto: all'equatore la superficie supera i +120 °C nelle ore più calde e scende sotto i −170 °C prima dell'alba. In alcuni crateri vicino ai poli, dove il Sole non arriva mai, la temperatura resta sotto i −230 °C.
- **Non c'è erosione da vento o da acqua**, perché non ci sono né vento né acqua liquida. Le orme lasciate dagli astronauti, salvo l'impatto di qualche meteorite, resteranno visibili per milioni di anni.
- **Nessuno scudo contro i meteoriti**: sulla Terra la maggior parte dei piccoli corpi che arrivano dallo spazio brucia nell'atmosfera come «stelle cadenti»; sulla Luna li colpisce tutti la superficie.

11.1.3 La superficie: mari, terre alte e crateri

Già a occhio nudo la Luna piena mostra macchie scure su un fondo chiaro. Le zone scure sono i **mari lunari**: vaste pianure piatte, formate da lave scure (basalti) che si sono riversate all'interno di enormi bacini scavati da antichi impatti e poi si sono solidificate, fra circa 4 e 3 miliardi di anni fa. Il nome risale a quando si pensava che fossero distese d'acqua; in realtà sono completamente asciutti. Coprono circa un terzo della faccia rivolta verso di noi, ma pochissimo della faccia opposta.

Le zone chiare sono le **terre alte** (o altipiani): regioni montuose, più antiche dei mari (fino a circa 4,4 miliardi di anni), formate da rocce chiare e fittamente coperte di crateri. Le rocce lunari, come quelle terrestri, le studierai più avanti.

La Luna è costellata di **crateri da impatto**, depressioni circolari prodotte dalla caduta di meteoriti e asteroidi. Ce ne sono di ogni dimensione, da pochi centimetri a centinaia di chilometri. I più giovani, come Tycho (circa 85 km di diametro), sono circondati da lunghe «raggiere» chiare di materiale espulso nell'urto, ben visibili con un binocolo alla Luna piena. Sulla Terra i crateri sono rari non perché la Terra sia stata colpita di meno, ma perché l'atmosfera, l'acqua e l'attività geologica ne hanno cancellato quasi tutti; sulla Luna, invece, la superficie conserva come un archivio la storia dei bombardamenti degli ultimi quattro miliardi di anni.

Tutta la superficie è coperta dalla **regolite**, uno strato di polvere e frammenti di roccia prodotto da miliardi di anni di impatti, con uno spessore che va in genere da pochi metri a una

quindicina di metri. È una polvere finissima, abrasiva e appiccicosa, che si attaccava alle tute degli astronauti e agli strumenti.

Che cosa c'è sotto la superficie? I sismometri lasciati dalle missioni Apollo hanno registrato deboli «terremoti lunari»; insieme alle misure della gravità fatte dai satelliti, hanno permesso di ricostruire una struttura a strati (Figura 11.1b): una **crosta** spessa in media alcune decine di chilometri, più spessa sulla faccia nascosta; un **mantello** roccioso; un **nucleo** piccolo, ricco di ferro, con un raggio di circa 350 km, cioè appena un quinto del raggio lunare. Nella Terra, invece, il nucleo supera la metà del raggio: ecco perché la Luna è molto meno densa.

APPROFONDIMENTO

Galileo e le montagne della Luna

Nel 1609 Galileo Galilei puntò verso la Luna il cannocchiale che aveva costruito e, l'anno dopo, descrisse le sue osservazioni nel *Sidereus Nuncius* (1610). Secondo la fisica aristotelica, ancora dominante, i corpi celesti erano sfere perfette e incorruttibili. Galileo vide invece una superficie ineguale e scabra, piena di cavità e di rilievi, simile per molti aspetti alla superficie della Terra. Notò che lungo il **terminatore**, la linea che separa la parte illuminata da quella in ombra, alcuni punti luminosi comparivano isolati nella parte buia: erano cime di montagne già colpite dal Sole, come accade sulla Terra all'alba. Misurando la distanza di quei punti dal terminatore, stimò l'altezza dei monti lunari con un semplice ragionamento geometrico. Pochi decenni dopo, nel 1651, il gesuita ferrarese Giovanni Battista Riccioli pubblicò una mappa della Luna, preparata con Francesco Maria Grimaldi, da cui derivano molti dei nomi che usiamo ancora: il Mare della Tranquillità, il Mare della Serenità, i crateri Copernico e Tycho.

11.1.4 Da dove viene la Luna?

L'origine della Luna è stata a lungo un enigma. Nel tempo sono state proposte varie ipotesi: che la Luna si fosse staccata da una Terra in rapidissima rotazione; che si fosse formata altrove e fosse stata «catturata» dalla gravità terrestre; che Terra e Luna si fossero formate insieme, come un pianeta doppio. Nessuna di queste spiega bene tutti i dati, e in particolare quelli forniti dalle rocce riportate dalle missioni Apollo.

Oggi la spiegazione più accreditata è l'**ipotesi dell'impatto gigante**. Circa 4,5 miliardi di anni fa, poco dopo la formazione del Sistema solare (Capitolo 9), la giovane Terra sarebbe stata colpita di striscio da un corpo grande più o meno come Marte, a cui gli scienziati hanno dato il nome di Theia. L'urto avrebbe fuso e vaporizzato enormi quantità di roccia, proiettandole in orbita intorno alla Terra; da questo anello di detriti, in tempi brevi, si sarebbe aggregata la Luna. L'ipotesi spiega diversi fatti:

- la Luna ha un nucleo di ferro molto piccolo, perché si è formata soprattutto dal materiale roccioso esterno dei due corpi, mentre i nuclei metallici si sono in gran parte fusi in quello della Terra;

- le rocce lunari sono molto simili a quelle del mantello terrestre nella composizione degli isotopi dell'ossigeno (vedi Capitolo 7), come se Terra e Luna avessero un'origine comune;
- le rocce lunari sono povere di sostanze che evaporano facilmente, e ciò è coerente con un materiale passato attraverso temperature altissime.

Restano alcuni dettagli da chiarire, per esempio quanto materiale di Theia sia finito nella Luna, e la ricerca è ancora aperta: un buon esempio di come una teoria scientifica sia la migliore spiegazione disponibile, non una verità definitiva.

11.2 I moti della Luna

11.2.1 Rotazione, rivoluzione e traslazione

Come la Terra, anche la Luna compie più movimenti contemporaneamente.

- Il **moto di rivoluzione** intorno alla Terra avviene lungo un'orbita leggermente ellittica, nello stesso verso in cui la Terra ruota: antiorario se visto da sopra il polo Nord. La distanza varia fra circa 363 000 km al **perigeo** (il punto dell'orbita più vicino alla Terra) e circa 405 000 km all'**apogeo** (il più lontano). La velocità orbitale media è di circa 1 km/s.
- Il **moto di rotazione** intorno al proprio asse avviene nello stesso verso e richiede lo stesso tempo della rivoluzione, circa 27,3 giorni.
- Il **moto di traslazione** è quello con cui la Luna accompagna la Terra nel suo viaggio annuale intorno al Sole. Più precisamente, Terra e Luna ruotano entrambe intorno al loro centro di massa comune, il **baricentro** del sistema, che si trova a circa 4700 km dal centro della Terra, quindi all'interno del nostro pianeta; è questo punto a percorrere l'orbita ellittica intorno al Sole.

Poiché la Luna si sposta verso est lungo la sua orbita di circa 13° al giorno rispetto alle stelle, ogni sera la troviamo più a est rispetto alle stelle della sera precedente. Per la stessa ragione la Luna sorge e tramonta, in media, circa 50 minuti più tardi ogni giorno: la Terra deve ruotare un po' di più per «raggiungerla».

11.2.2 La rotazione sincrona: perché vediamo sempre la stessa faccia

Chiunque osservi la Luna per qualche mese si accorge che le macchie dei mari sono sempre le stesse, nella stessa posizione: dalla Terra vediamo sempre la stessa faccia. Questo non significa che la Luna non ruoti. Significa che compie un giro su se stessa esattamente nello stesso tempo in cui compie un giro intorno alla Terra: si parla di **rotazione sincrona**. La Figura 11.2 mostra la differenza: se la Luna non ruotasse affatto, mostrerebbe alla Terra, nel corso del mese, tutti i suoi lati.

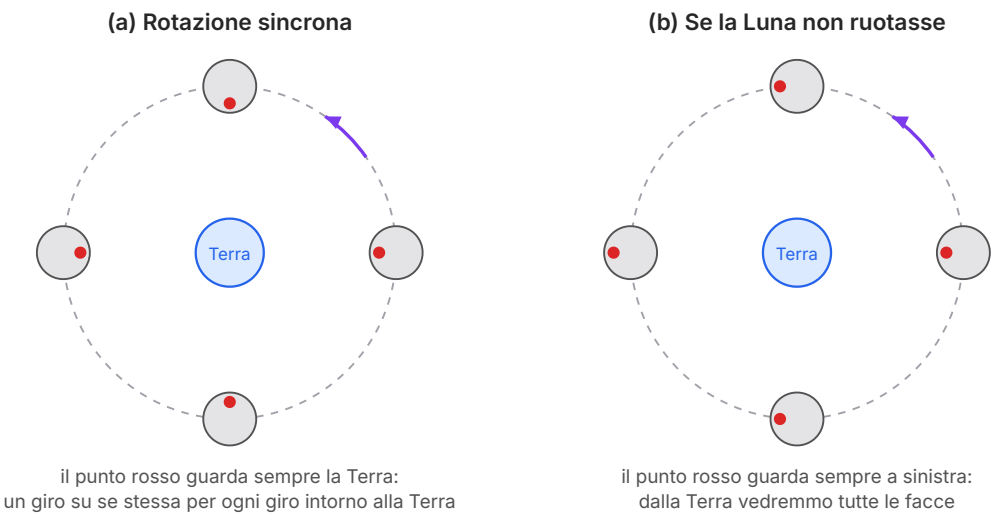


Figura 11.2 (a) Nella rotazione sincrona la Luna compie un giro su se stessa per ogni giro intorno alla Terra, e lo stesso punto della superficie (in rosso) resta sempre rivolto verso di noi. (b) Una Luna che non ruotasse mostrerebbe alla Terra, in un mese, tutte le sue facce. Visione dal polo Nord, schema non in scala.

Puoi verificarlo con un esperimento semplicissimo: cammina intorno a una sedia tenendo sempre lo sguardo rivolto verso di essa. Alla fine del giro sarai tornato al punto di partenza, ma avrai anche guardato, una dopo l'altra, tutte le pareti della stanza: hai compiuto anche un giro su te stesso.

La rotazione sincrona non è una coincidenza. Quando la Luna era giovane ruotava più velocemente; l'attrazione della Terra deformava leggermente il suo corpo, allungandolo nella direzione della Terra, e questa deformazione, come un freno, ha rallentato la rotazione finché i due periodi sono diventati uguali. È un effetto delle stesse forze che producono le maree (paragrafo 11.5), e molti altri satelliti del Sistema solare sono «agganciati» al loro pianeta nello stesso modo.

ERRORE FREQUENTE

Si sente spesso parlare del «lato oscuro della Luna» come di un emisfero immerso in un buio eterno. È falso. La metà che non vediamo mai è la **faccia nascosta**: è nascosta a noi, non al Sole. Riceve la luce solare esattamente quanto l'altra; quando da Terra vediamo la Luna nuova, cioè la faccia visibile al buio, la faccia nascosta è completamente illuminata. È stata fotografata per la prima volta nel 1959 dalla sonda sovietica Luna 3, e nel 2019 la sonda cinese Chang'e 4 vi è atterrata.

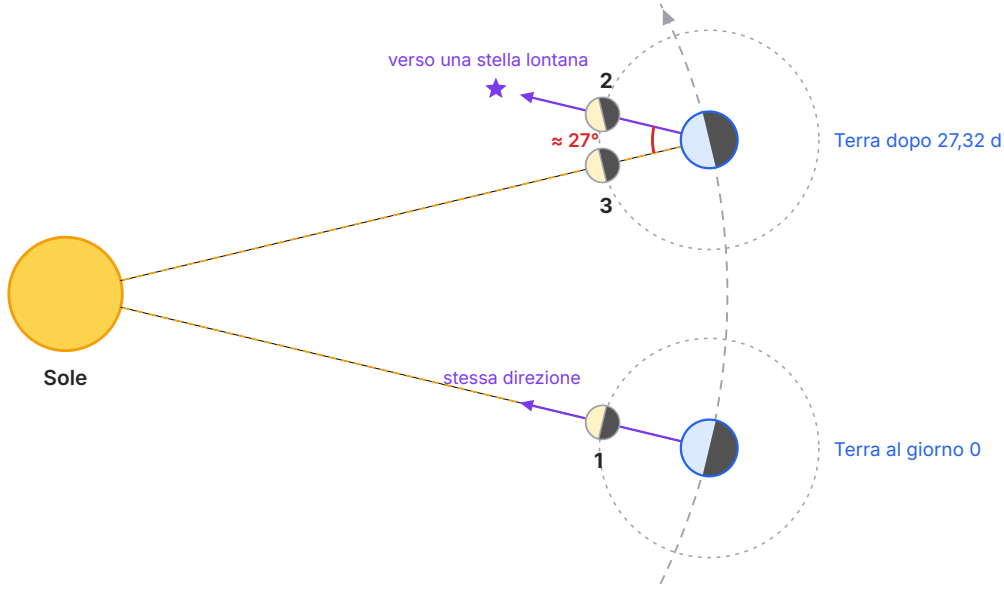
In realtà, nel corso del tempo, da Terra riusciamo a vedere un po' più della metà della superficie lunare, circa il 59 %. Il merito è delle **librazioni**, piccole oscillazioni apparenti della Luna che ci permettono di sbirciare oltre i suoi bordi. La principale nasce dal fatto che la rotazione della Luna è uniforme, mentre la sua velocità lungo l'orbita ellittica cambia (più veloce al perigeo, più lenta all'apogeo): rotazione e rivoluzione sono quindi leggermente «fuori passo» per una parte del mese. Un'altra dipende dall'inclinazione dell'asse lunare rispetto al piano dell'orbita, che ci mostra a turno un po' del polo nord e un po' del polo sud lunari.

11.2.3 Mese sidereo e mese sinodico

Quanto dura un giro della Luna intorno alla Terra? Dipende da quale riferimento usiamo, esattamente come per il giorno sidereo e il giorno solare (Capitolo 10).

Il **mese sidereo** è il tempo impiegato dalla Luna per tornare nella stessa posizione rispetto alle stelle lontane: dura 27,32 giorni. È il vero periodo di rivoluzione della Luna, ed è anche il suo periodo di rotazione.

Il **mese sinodico** (o lunazione) è invece il tempo che separa due fasi uguali consecutive, per esempio due Lune nuove: dura in media 29,53 giorni. È più lungo del mese sidereo perché nel frattempo la Terra si è spostata lungo la sua orbita intorno al Sole (Figura 11.3). In 27,32 giorni la Terra percorre circa 27° della sua orbita; quando la Luna ha completato un giro rispetto alle stelle, la direzione del Sole è cambiata di circa 27°, e la Luna impiega circa 2,2 giorni in più per tornare allineata fra Terra e Sole.



1 · Luna nuova (giorno 0).
2 · Dopo 27,32 d la Luna ha fatto un giro completo rispetto alle stelle (mese sidereo), ma la Terra si è spostata di circa 27° lungo l'orbita: non è ancora Luna nuova.
3 · Dopo altri 2,2 d circa la Luna è di nuovo fra Terra e Sole (mese sinodico: 29,53 d).

Schema non in scala: distanza Terra–Luna e dimensioni molto ingrandite.

Figura 11.3 Mese sidereo e mese sinodico. Durante un mese sidereo la Terra si sposta di circa 27° intorno al Sole; per ritrovare la stessa fase la Luna deve percorrere ancora circa 27° della sua orbita. Le frecce viola sono parallele: indicano la stessa direzione verso una stella lontanissima.

ESEMPIO SVOLTO

Calcolare il mese sinodico

Problema. Il mese sidereo dura 27,32 d e l'anno sidereo 365,26 d. Calcola la durata del mese sinodico.

Ragionamento. In un giorno la Luna percorre 1/27,32 di giro rispetto alle stelle; la direzione del Sole, vista dalla Terra, avanza nello stesso verso di 1/365,26 di giro. Rispetto al Sole, quindi, la Luna guadagna ogni giorno la differenza fra le due frazioni. Il mese sinodico è il tempo necessario per guadagnare un giro intero:

$$\frac{1}{T_{\text{sin}}} = \frac{1}{T_{\text{sid}}} - \frac{1}{T_{\text{anno}}}$$

Calcolo. $1/27{,}32 - 1/365{,}26 = 0{,}036\,603 - 0{,}002\,738 = 0{,}033\,865\ \text{d}^{-1}$; $T_{\text{sin}} = 1/0{,}033\,865 \approx 29{,}53$ d.

Controllo. Il risultato è maggiore di 27,32 d di circa 2,2 d, come previsto dalla Figura 11.3. In un anno ci sono $365{,}26/29{,}53 \approx 12{,}4$ lunazioni: un calendario di dodici mesi lunari, come quello islamico, resta indietro di circa 11 giorni all'anno rispetto alle stagioni.

11.3 Le fasi lunari

11.3.1 Perché la Luna cambia aspetto

La Luna non emette luce propria: la vediamo perché riflette la luce del Sole. In ogni istante il Sole illumina esattamente **metà** della sua superficie, quella rivolta verso di lui, mentre l'altra metà è al buio. Mentre la Luna gira intorno alla Terra, però, noi osserviamo questa metà illuminata da angolazioni sempre diverse: a volte la vediamo tutta, a volte solo in parte, a volte per niente. Questi cambiamenti di aspetto si chiamano **fasi lunari**, e si ripetono con il periodo del mese sinodico (Figura 11.4).

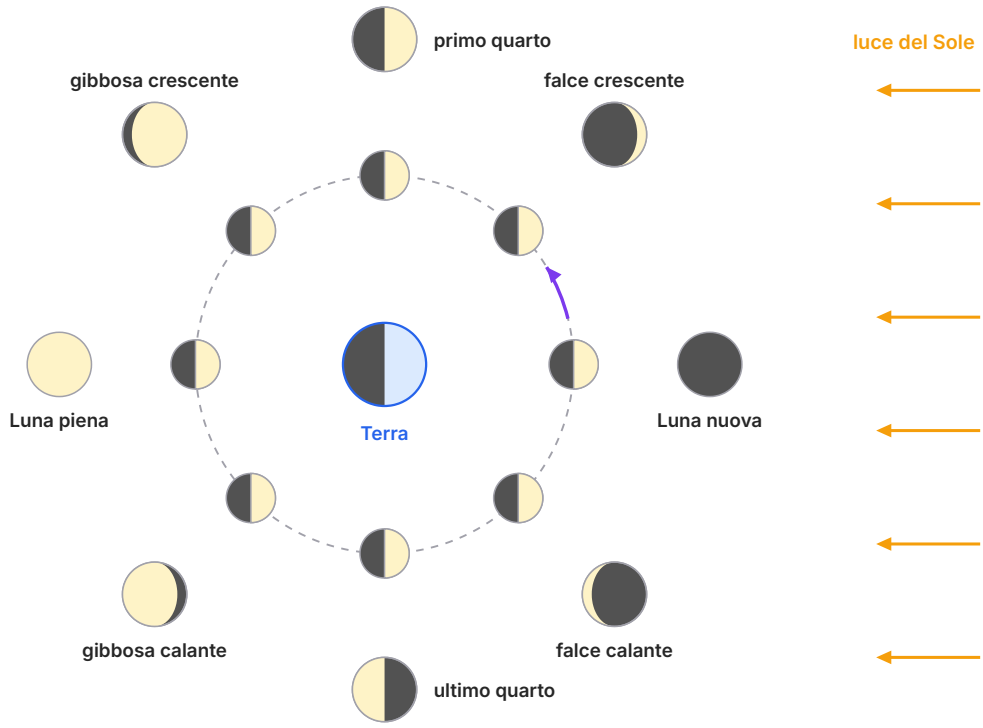


Figura 11.4 Le fasi lunari. Nell'anello interno la Luna è disegnata come la vedrebbe un osservatore posto sopra il polo Nord: la metà rivolta verso il Sole è sempre illuminata. Nell'anello esterno è disegnato l'aspetto della Luna in ciascuna posizione, come appare dall'emisfero boreale. Schema non in scala.

Seguiamo un ciclo completo partendo dalla posizione in cui la Luna si trova fra la Terra e il Sole.

- **Luna nuova** (**novilunio**): la faccia illuminata è rivolta tutta verso il Sole e noi vediamo solo la parte in ombra. La Luna è invisibile, anche perché si trova in cielo vicino al Sole.
- **Falce crescente**: dopo qualche giorno compare, poco dopo il tramonto, una sottile falce luminosa a ovest. Nell'emisfero boreale la parte illuminata è a destra.
- **Primo quarto**: circa una settimana dopo la Luna nuova, la Luna ha percorso un quarto di orbita e la vediamo illuminata per metà, con la parte luminosa a destra.
- **Gibbosa crescente**: la parte illuminata supera la metà e continua a crescere.
- **Luna piena** (**plenilunio**): circa due settimane dopo la Luna nuova la Luna è dalla parte opposta al Sole rispetto alla Terra e vediamo l'intera faccia illuminata.

- **Gibbosa calante**, **ultimo quarto** (metà sinistra illuminata) e **falce calante**: la parte illuminata diminuisce, ora sul lato sinistro, finché la Luna torna nuova.

Si dice che la Luna è **crescente** quando la parte illuminata aumenta (dalla Luna nuova alla piena) e **calante** quando diminuisce. Un vecchio detto aiuta a riconoscerle nell'emisfero boreale: «gobba a ponente, Luna crescente; gobba a levante, Luna calante». La «gobba», cioè il bordo curvo illuminato, è rivolta a ovest (ponente) quando la Luna cresce e a est (levante) quando cala. Nell'emisfero australe l'aspetto è capovolto: un osservatore in Australia vede la falce crescente illuminata a sinistra.

> **ERRORE FREQUENTE**
> «Le fasi sono prodotte dall'ombra della Terra che copre la Luna». È uno degli errori più diffusi, ma basta guardare la Figura 11.4 per capire che è impossibile: l'ombra della Terra è sempre dalla parte opposta al Sole, e potrebbe cadere sulla Luna solo alla Luna piena, proprio quando la vediamo tutta illuminata. Quando l'ombra della Terra copre davvero la Luna si ha un fenomeno diverso e molto più raro, l'eclisse di Luna (paragrafo 11.4). Un altro indizio: durante le fasi il confine fra luce e buio, il terminatore, è un arco di ellisse netto, mentre il bordo dell'ombra terrestre in un'eclisse è un arco di cerchio sfumato.

11.3.2 Quando sorge e tramonta la Luna

Poiché la posizione della Luna rispetto al Sole cambia con le fasi, cambiano anche gli orari in cui la Luna sorge e tramonta. Il ragionamento è sempre lo stesso: la Terra ruota verso est e ogni punto della sua superficie passa dal dì alla notte; la Luna sorge quando, per effetto della rotazione, entra nella parte di cielo visibile dall'osservatore. Alla Luna nuova la Luna è nella stessa direzione del Sole: sorge e tramonta con lui. Alla Luna piena è nella direzione opposta: sorge quando il Sole tramonta e tramonta quando il Sole sorge, e resta visibile per tutta la notte. La Tabella 11.2 riassume gli orari approssimativi; quelli reali possono differire anche di qualche ora a seconda della stagione e della latitudine.

Tabella 11.2 Orari approssimativi (ora solare locale) in cui la Luna sorge, passa al meridiano (è più alta nel cielo, a sud per l'Italia) e tramonta nelle quattro fasi principali.

Fase	Sorge	Culmina	Tramonta	Quando si vede
Luna nuova	≈ 6 h	≈ 12 h	≈ 18 h	non si vede
Primo quarto	≈ 12 h	≈ 18 h	≈ 24 h	pomeriggio e prima metà della notte
Luna piena	≈ 18 h	≈ 24 h	≈ 6 h	tutta la notte
Ultimo quarto	≈ 24 h	≈ 6 h	≈ 12 h	seconda metà della notte e mattino

Le fasi intermedie hanno orari intermedi, perché la Luna ritarda in media di circa 50 minuti al giorno: la falce crescente sorge a metà mattina (verso le 9) e tramonta qualche ora dopo il Sole (verso le 21); la gibbosa crescente sorge a metà pomeriggio e tramonta verso le 3 di notte; la gibbosa calante sorge in serata, verso le 21, e tramonta a metà mattina; la falce calante sorge qualche ora prima dell'alba e tramonta a metà pomeriggio.

La tabella spiega un'osservazione che molti fanno senza capirla: la Luna si vede spesso anche di giorno. Nei giorni intorno all'ultimo quarto, per esempio, è alta nel cielo del mattino, mentre intorno al primo quarto la si vede nel pomeriggio, prima del tramonto.

11.3.3 La luce cinerea

Nei giorni vicini alla Luna nuova, quando la falce è sottile, osservando con attenzione si vede anche il resto del disco lunare, debolmente illuminato da una luce grigiastra. È la **luce cinerea** (da *cenere*, per il suo colore): è luce del Sole riflessa dalla Terra verso la Luna e poi di nuovo dalla Luna verso di noi. Visto dalla Luna, infatti, il nostro pianeta presenta anch'esso delle fasi, opposte a quelle lunari: quando per noi la Luna è nuova, dalla Luna la Terra appare «piena», e illumina la notte lunare con un disco circa 3,7 volte più largo della Luna piena nel nostro cielo e molto più luminoso, perché nuvole, ghiacci e oceani riflettono la luce più delle scure rocce lunari.

COLLEGAMENTI

Storia della scienza. La prima spiegazione corretta della luce cinerea si trova negli appunti di Leonardo da Vinci, all'inizio del Cinquecento, nel manoscritto noto come Codice Leicester. Leonardo capì che la parte buia della Luna era rischiarata dalla luce del Sole riflessa dalla Terra, anche se attribuiva gran parte del riflesso agli oceani. Il fenomeno ha oggi anche un uso scientifico: misurando con precisione la luminosità della luce cinerea, gli scienziati possono stimare quanta luce solare la Terra riflette nello spazio, un dato importante per lo studio del clima (Capitoli 13 e 14).

ESEMPIO SVOLTO

Esperienza di laboratorio · Le fasi con una lampada e una palla

Materiale: una lampada senza paralume (il Sole), una palla chiara di 6–10 cm infilata su una matita (la Luna), una stanza buia. La tua testa rappresenta la Terra.

Procedimento: mettiti a qualche metro dalla lampada, tieni la palla davanti a te a braccio teso, un po' più in alto della testa, e ruota lentamente su te stesso in senso antiorario (verso sinistra), tenendo sempre la palla davanti al viso. Annota l'aspetto della parte illuminata della palla ogni ottavo di giro, partendo dalla posizione in cui la palla è fra te e la lampada.

Osservazioni attese: vedrai in successione la palla buia, una falce illuminata a destra, metà destra illuminata, una forma gibbosa, la palla tutta illuminata (alle tue spalle c'è la lampada: alza la palla perché la tua testa non la oscuri), e poi le stesse forme con la luce a sinistra.

Conclusione: le fasi dipendono solo dalla posizione di Sole, Terra e Luna, non da un'ombra. Se abbassi la palla esattamente all'altezza della testa nella posizione opposta alla lampada, la tua ombra la copre: hai simulato un'eclisse di Luna.

11.4 Le eclissi

11.4.1 Ombra e penombra

Un'**eclisse** si verifica quando un corpo celeste entra nell'ombra di un altro, oppure quando un corpo nasconde un altro alla vista di un osservatore. Per capirle dobbiamo prima capire come sono fatte le ombre di corpi illuminati da una sorgente estesa come il Sole. Dietro alla Luna (o alla Terra) si forma un cono di **ombra**, la regione da cui il Sole è completamente nascosto; tutto intorno si estende la **penombra**, la regione da cui il Sole è nascosto solo in parte. Da un punto nella penombra si vede ancora una porzione del disco solare, e la luce diminuisce ma non scompare (Figura 11.5).

L'ombra di un corpo più piccolo del Sole ha la forma di un cono che si restringe fino a un vertice: l'ombra della Luna è lunga in media circa 374 000 km, un po' meno della distanza media Terra–Luna; quella della Terra è lunga circa 1,4 milioni di chilometri e alla distanza della Luna è ancora larga circa due volte e mezza il diametro lunare.

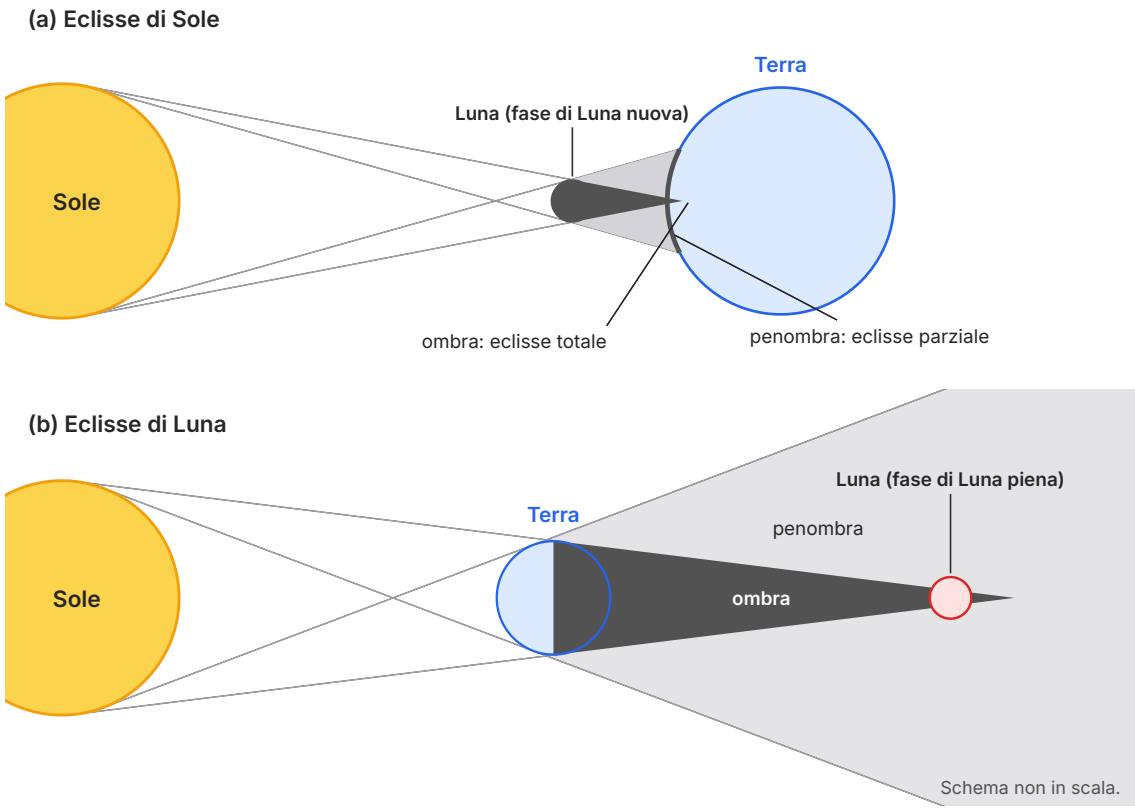


Figura 11.5 Geometria delle eclissi, con ombra (grigio scuro) e penombra (grigio chiaro). (a) Eclisse di Sole: la Luna nuova proietta la sua ombra su una piccola regione della Terra, dove l'eclisse è totale; nella penombra è parziale. (b) Eclisse di Luna: la Luna piena attraversa l'ombra della Terra. Dimensioni e distanze non in scala.

11.4.2 Eclissi di Sole

Un'**eclisse di Sole** avviene quando la Luna si interpone fra il Sole e la Terra e la sua ombra cade sulla superficie terrestre: è possibile quindi solo in fase di Luna nuova. Ne esistono tre tipi.

- L'**eclisse totale** si osserva dalla zona della Terra raggiunta dall'ombra della Luna. È una striscia stretta, larga al massimo poche centinaia di chilometri, che l'ombra percorre da ovest verso est. Il cielo si oscura, compaiono le stelle più brillanti e attorno al disco nero della Luna si vede la corona solare (Capitolo 9). La fase totale dura pochi minuti, al massimo circa sette minuti e mezzo.
- L'**eclisse parziale** si osserva dalla penombra, una regione molto più ampia: la Luna copre solo una parte del Sole, che appare «morsicato».
- L'**eclisse anulare** avviene quando la Luna è vicina all'apogeo: appare un po' più piccola del Sole e, anche perfettamente allineata, non riesce a coprirlo tutto, lasciando visibile un anello luminoso. In questo caso il vertice del cono d'ombra non arriva fino alla Terra.

Che le eclissi totali siano possibili dipende da una coincidenza notevole: il Sole ha un diametro circa 400 volte maggiore di quello della Luna, ma è anche circa 390 volte più lontano. Visti dalla Terra, i due dischi hanno quindi quasi la stessa dimensione apparente, circa mezzo grado. Una totale di Sole è visibile, da uno stesso luogo, in media solo una volta ogni qualche secolo: in Italia l'ultima osservabile da una vasta parte della penisola è stata quella del 15 febbraio 1961. Il 12 agosto 2026 un'eclisse totale è stata visibile in Spagna, mentre in Italia è apparsa parziale; secondo i calcoli, il 2 agosto 2027 la fascia di totalità sfiorerà l'Italia passando sull'isola di Lampedusa.

ESEMPIO SVOLTO

Totale o anulare?

Problema. Il Sole ha un diametro di 1 392 000 km e dista 149 600 000 km; la Luna ha un diametro di 3475 km. Confronta le dimensioni apparenti dei due corpi quando la Luna si trova al perigeo (363 300 km) e all'apogeo (405 500 km).

Ragionamento. Le dimensioni apparenti di un oggetto lontano sono proporzionali al rapporto diametro/distanza: più grande è il rapporto, più grande appare l'oggetto.

Calcolo. Sole: $1\,392\,000/149\,600\,000 \approx 0{,}009\,30$. Luna al perigeo: $3475/363\,300 \approx 0{,}009\,57$. Luna all'apogeo: $3475/405\,500 \approx 0{,}008\,57$.

Conclusione. Al perigeo la Luna appare leggermente più grande del Sole e può coprirlo tutto: eclisse totale. All'apogeo appare più piccola: anche con un allineamento perfetto l'eclisse è anulare.

DA RICORDARE

Non si deve **mai** guardare il Sole direttamente, nemmeno durante un'eclisse parziale o con occhiali da sole: la radiazione può danneggiare la retina in modo permanente, e senza dolore. Si usano solo filtri certificati per l'osservazione solare (norma ISO 12312-2) oppure metodi indiretti, come proiettare l'immagine del Sole su un cartoncino attraverso un piccolo foro. Soltanto durante la breve fase di totalità, e solo per chi si trova nella fascia di ombra, il Sole è completamente coperto.

11.4.3 Eclissi di Luna

Un'**eclisse di Luna** avviene quando la Terra si interpone fra il Sole e la Luna e la Luna entra nell'ombra della Terra: è possibile quindi solo in fase di Luna piena. A differenza di quella di Sole, è visibile contemporaneamente da tutto l'emisfero terrestre in cui è notte e la Luna è sopra l'orizzonte, ed è perfettamente sicura da osservare a occhio nudo. Se la Luna entra tutta nell'ombra l'eclisse è totale, e la fase totale può durare fino a circa un'ora e tre quarti; se ci entra

in parte è parziale; se attraversa solo la penombra l'oscuramento è così debole che quasi non si nota.

Durante la totalità la Luna di solito non scompare, ma assume un colore rosso rame. La luce del Sole che attraversa l'atmosfera terrestre, ai bordi del pianeta, viene deviata verso l'interno dell'ombra; nel passaggio la parte azzurra della luce viene diffusa e rimane soprattutto quella rossa. È la stessa ragione per cui il Sole al tramonto appare rosso: durante un'eclisse totale, in un certo senso, la Luna è illuminata dalla luce di tutti i tramonti e le albe della Terra.

11.4.4 Perché le eclissi non avvengono ogni mese

Se ogni mese c'è una Luna nuova e una Luna piena, perché non abbiamo un'eclisse di Sole e una di Luna ogni mese? Perché l'orbita della Luna è inclinata di circa 5,1° rispetto al piano dell'orbita terrestre, detto anche piano dell'**eclittica**. Di solito, alla Luna nuova, la Luna passa un po' sopra o un po' sotto la linea Terra–Sole, e la sua ombra manca la Terra; alla Luna piena passa sopra o sotto l'ombra della Terra.

L'orbita lunare attraversa il piano dell'eclittica in due punti, i **nodi**; la retta che li unisce è la **linea dei nodi**. Un'eclisse può avvenire solo quando la Luna nuova o la Luna piena cade vicino a uno dei nodi, cioè quando la linea dei nodi è orientata più o meno verso il Sole (Figura 11.6). Questo accade due volte l'anno, a circa sei mesi di distanza: sono le «stagioni delle eclissi», durante le quali si verificano di solito un'eclisse di Sole e una di Luna a circa due settimane l'una dall'altra. In ogni anno solare avvengono almeno due eclissi di Sole, spesso soltanto parziali.

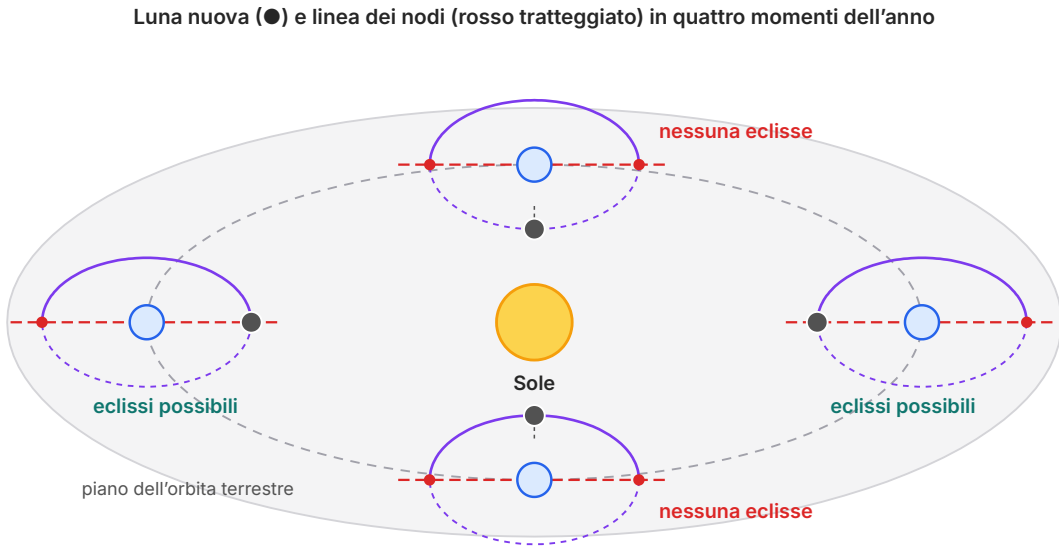


Figura 11.6 L'orbita della Luna è inclinata rispetto al piano dell'orbita terrestre. Quando la linea dei nodi punta verso il Sole (a sinistra e a destra), la Luna nuova si trova sulla linea Terra–Sole e può esserci un'eclisse; negli altri periodi dell'anno passa sopra o sotto il Sole (in alto e in basso). Schema in prospettiva, non in scala.

11.5 Le maree

11.5.1 L'attrazione differenziale

Chi ha passato una giornata su una spiaggia dell'Atlantico o della costa adriatica settentrionale ha visto il mare ritirarsi e tornare a salire con regolarità. Le **maree** sono oscillazioni periodiche del livello del mare: in gran parte delle coste si alternano due alte maree e due basse maree in poco più di un giorno. Qui ci occupiamo della loro causa astronomica; la descrizione oceanografica, con le ampiezze e gli esempi delle varie coste, è nel Capitolo 15.

La causa delle maree è l'attrazione gravitazionale della Luna e, in misura minore, del Sole. Secondo la legge di gravitazione universale (Capitolo 9) l'attrazione diminuisce con la distanza. La Luna attira quindi i diversi punti della Terra con forze diverse: il punto della Terra più vicino alla Luna (A nella Figura 11.7a) è attratto più del centro della Terra (C), e il centro è attratto più del punto più lontano (B). Ciò che conta per le maree non è l'attrazione in sé, ma questa **differenza** fra l'attrazione in ogni punto e quella sul centro della Terra, che si chiama **forza di marea**.

- Nel punto A, l'acqua è tirata verso la Luna più della Terra nel suo complesso: si solleva in direzione della Luna.
- Nel punto B, è la Terra nel suo complesso a essere tirata verso la Luna più dell'acqua: l'acqua «resta indietro» e si solleva dalla parte opposta.
- Ai lati, a 90° dalla direzione della Luna, la forza di marea spinge leggermente l'acqua verso il centro della Terra.

Il risultato è che l'oceano si deforma in un ellissoide allungato lungo la direzione Terra–Luna, con **due rigonfiamenti** opposti (Figura 11.7b): uno verso la Luna e uno dalla parte opposta. Nei punti dei rigonfiamenti c'è alta marea; a 90° da essi c'è bassa marea.

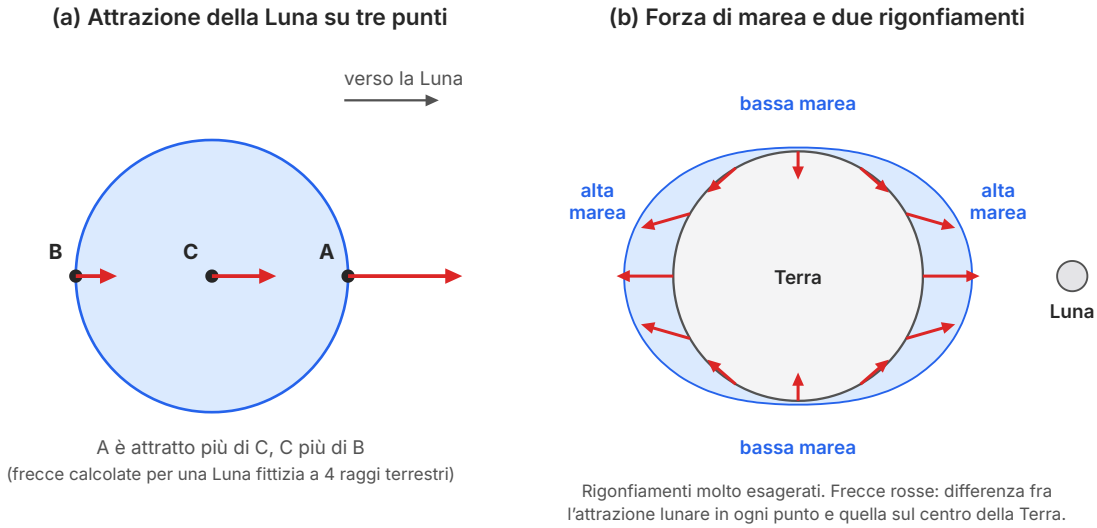


Figura 11.7 La causa astronomica delle maree. (a) La Luna attira con più forza i punti della Terra più vicini. (b) Le forze di marea, cioè le differenze fra l'attrazione in ciascun punto e quella sul centro della Terra, calcolate per i punti della superficie: allungano l'oceano lungo la direzione Terra–Luna e producono due rigonfiamenti opposti.

ERRORE FREQUENTE

Due errori sono molto comuni. Il primo è pensare che ci sia un solo rigonfiamento, quello rivolto verso la Luna: così però ci sarebbe una sola alta marea al giorno, mentre nella maggior parte dei luoghi se ne osservano due. Il secondo è attribuire le maree solo alla Luna: anche il Sole produce maree, circa la metà di quelle lunari, e il loro effetto si somma o si sottrae a quello della Luna a seconda delle fasi.

11.5.2 Il ritmo delle maree

I due rigonfiamenti restano allineati con la Luna, mentre la Terra ruota «sotto» di essi. Un punto della costa passa quindi attraverso due rigonfiamenti e due avvallamenti mentre la Terra compie un giro rispetto alla Luna. Questo giro non dura 24 h ma circa **24 h 50 min**, perché nel frattempo la Luna si è spostata lungo la sua orbita (è lo stesso ritardo di circa 50 minuti con cui la Luna sorge ogni giorno). Di conseguenza due alte maree successive sono separate in media da circa **12 h 25 min**, e ogni giorno le maree arrivano circa 50 minuti più tardi del giorno prima.

ESEMPIO SVOLTO

Prevedere gli orari delle maree

Problema. In un porto l'alta marea si verifica alle 6:12 di mattina. A che ora ci si aspettano le due alte maree successive?

Calcolo. 6:12 + 12 h 25 min = 18:37 dello stesso giorno; 18:37 + 12 h 25 min = 7:02 del giorno dopo.

Controllo. Fra le 6:12 di un giorno e le 7:02 del giorno dopo passano 24 h 50 min: l'alta marea è arrivata 50 minuti più tardi, come la Luna. Nella realtà la forma delle coste e dei fondali modifica questi tempi, ma la regolarità di fondo è quella astronomica.

11.5.3 Maree sigiziali e di quadratura

Anche il Sole produce due rigonfiamenti di marea, allineati con la sua direzione. Benché il Sole sia enormemente più massiccio della Luna, è anche circa 390 volte più lontano, e la forza di marea diminuisce molto rapidamente con la distanza (in proporzione inversa al cubo della distanza): così l'effetto del Sole è soltanto circa 0,46 volte quello della Luna. Gli effetti dei due astri si combinano in modo diverso a seconda della loro posizione (Figura 11.8).

- In Luna nuova e in Luna piena, Sole, Terra e Luna sono allineati: questa configurazione si chiama **sizigie**. I rigonfiamenti solari e lunari si sommano e si hanno le **maree sigiziali** (o maree vive), con la massima differenza fra alta e bassa marea.
- Al primo e all'ultimo quarto, la Luna è a 90° dal Sole: è la configurazione di **quadratura**. I rigonfiamenti solari cadono dove la Luna produce bassa marea e in parte li compensano: si hanno le **maree di quadratura** (o maree morte), con la differenza minima fra alta e bassa marea.

Poiché le sizigie si ripetono ogni mezzo mese sinodico, le maree vive e morte si alternano circa ogni settimana.

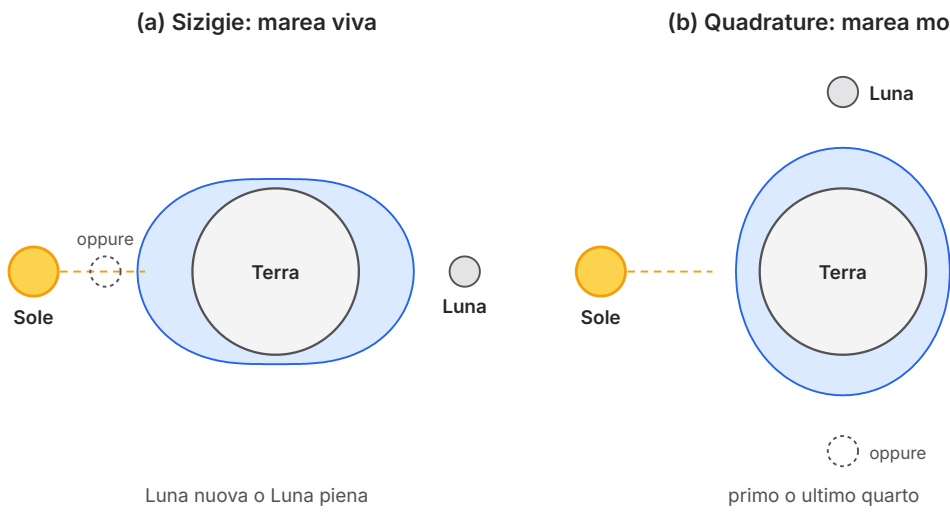


Figura 11.8 (a) In sizigie (Luna nuova o piena) gli effetti di marea della Luna e del Sole si sommano: marea viva. (b) In quadratura (primo o ultimo quarto) si contrastano: marea morta. Visione dal polo Nord, non in scala.

COLLEGAMENTI

Storia della scienza e latino. Che le maree seguano la Luna lo sapevano già gli antichi: Plinio il Vecchio, nella *Naturalis historia* (I secolo d.C.), ne attribuiva la causa alla Luna e al Sole. La spiegazione delle maree con l'attrazione differenziale della Luna e del Sole fu data da Isaac Newton nei *Principia* (1687), come una delle prove più convincenti della gravitazione universale: la stessa forza che fa cadere una mela governa il ritmo del mare. Prima di lui anche Galileo aveva cercato di spiegare le maree, ma le attribuiva ai moti della Terra e rifiutava l'idea di un'influenza della Luna. Le forze di marea agiscono anche sulle rocce: la superficie solida della Terra si alza e si abbassa ogni giorno di qualche decina di centimetri, senza che ce ne accorgiamo, perché si muove tutto il suolo intorno a noi.

11.5.4 Una Terra più lenta, una Luna più lontana

Le maree hanno un effetto lento ma profondo sull'intero sistema Terra-Luna. L'acqua degli oceani, spostata dai rigonfiamenti, sfrega contro i fondali e le coste, e questo **attrito di marea** funziona come un freno sulla rotazione terrestre: la durata del giorno aumenta di circa 2 millesimi di secondo ogni secolo. Un effetto minuscolo, ma che si accumula: i coralli fossili, che crescono con strati giornalieri e annuali, indicano che circa 380 milioni di anni fa un anno conteneva circa 400 giorni, e quindi un giorno durava meno di 22 ore.

La rotazione terrestre, più veloce del moto della Luna, trascina leggermente in avanti i rigonfiamenti; la loro attrazione, a sua volta, spinge la Luna su un'orbita sempre più ampia. Oggi la Luna si allontana dalla Terra di circa **3,8 cm all'anno**. Questo valore è misurato con grande precisione inviando impulsi laser verso i catadiottri (specchi speciali che rimandano la luce nella direzione da cui arriva) lasciati sulla Luna dalle missioni Apollo e da due veicoli sovietici, e misurando il tempo di andata e ritorno della luce. Fra moltissimi milioni di anni la Luna apparirà troppo piccola per coprire interamente il Sole: le eclissi totali non saranno più possibili, e resteranno soltanto quelle anulari.

11.6 L'esplorazione della Luna

La Luna è stato il primo obiettivo dell'esplorazione spaziale. Nel 1959 la sonda sovietica Luna 2 fu il primo oggetto costruito dall'uomo a raggiungerne la superficie, e Luna 3 inviò le prime immagini della faccia nascosta. Negli anni Sessanta Stati Uniti e Unione Sovietica gareggiarono per arrivare per primi a portarvi esseri umani, in quella che fu chiamata «corsa allo spazio».

La sfida fu vinta dal **programma Apollo** della NASA. Nel dicembre 1968 l'equipaggio dell'Apollo 8 fu il primo a orbitare intorno alla Luna. Il 20 luglio 1969 il modulo lunare dell'Apollo 11 si posò nel Mare della Tranquillità: Neil Armstrong e Edwin «Buzz» Aldrin camminarono sulla Luna, mentre Michael Collins li attendeva in orbita. Quando Armstrong mise piede sulla superficie, in Italia erano le prime ore del 21 luglio, e milioni di persone seguirono l'evento in diretta televisiva. Seguirono altri cinque allunaggi riusciti (Apollo 12, 14, 15, 16 e 17), mentre l'Apollo 13, nel 1970, dovette rinunciare all'allunaggio per un guasto e il suo equipaggio rientrò fortunosamente sulla Terra. L'ultima missione, l'Apollo 17, partì nel dicembre 1972. In tutto dodici astronauti hanno camminato sulla Luna e hanno riportato a Terra circa 382 kg di rocce e regolite, che sono state fondamentali per ricostruire l'età della superficie lunare e per formulare l'ipotesi dell'impatto gigante.

Dopo il 1972, e fino al momento in cui scriviamo (2026), nessun essere umano ha più messo piede sulla Luna, ma l'esplorazione robotica è continuata con sonde orbitali, lander e veicoli di diversi paesi, che hanno cartografato la superficie, cercato il ghiaccio d'acqua nei crateri polari perennemente in ombra e raccolto nuovi campioni. Il programma Artemis della NASA, avviato con un volo senza equipaggio nel 2022, ha l'obiettivo di riportare astronauti sulla Luna, anche come tappa verso l'esplorazione di Marte.

IN SINTESI

Luna in cifre: Ø ≈ 3475 km (≈ 0,27 della Terra); massa ≈ 1/81 della Terra; gravità ≈ 1/6; distanza media ≈ 384 400 km (perigeo ≈ 363 000 km, apogeo ≈ 405 000 km).

Mesi: sidereo 27,32 d (rivoluzione e rotazione); sinodico 29,53 d (fasi); $1/T_{\text{sin}} = 1/T_{\text{sid}} - 1/T_{\text{anno}}$.

Eclissi: di Sole solo in Luna nuova, di Luna solo in Luna piena, e solo vicino ai nodi (orbita inclinata di ≈ 5,1°).

Maree: due rigonfiamenti; alte maree ogni ≈ 12 h 25 min; effetto del Sole ≈ 0,46 di quello lunare; vive in sizigie, morte in quadratura. La Luna si allontana di ≈ 3,8 cm/anno.

SINTESI

- La Luna è l'unico satellite naturale della Terra: diametro circa 3475 km, massa circa 1/81 di quella terrestre, gravità circa 1/6, distanza media circa 384 400 km.
- Per la gravità debole la Luna non ha atmosfera: cielo nero, assenza di suono, escursione termica da circa +127 °C a circa −173 °C, nessuna erosione da vento o acqua.
- La superficie presenta mari (pianure di lava scura), terre alte chiare più antiche, crateri da impatto e uno strato di regolite; l'interno comprende crosta, mantello e un piccolo nucleo di ferro.
- Secondo l'ipotesi dell'impatto gigante la Luna si formò circa 4,5 miliardi di anni fa dai detriti dello scontro fra la giovane Terra e un corpo grande come Marte.
- La Luna ruota su se stessa nello stesso tempo in cui rivoluziona intorno alla Terra (rotazione sincrona): per questo vediamo sempre la stessa faccia; con le librazioni ne vediamo circa il 59 %.
- Il mese sidereo (27,32 d) si misura rispetto alle stelle; il mese sinodico (29,53 d), più lungo perché la Terra nel frattempo si sposta intorno al Sole, è il periodo delle fasi.
- Le fasi dipendono da quanta parte della metà illuminata della Luna vediamo dalla Terra, non dall'ombra terrestre; la Luna piena sorge al tramonto, il primo quarto a mezzogiorno, l'ultimo quarto a mezzanotte.
- La luce cinerea è luce solare riflessa dalla Terra sulla parte buia della Luna.
- Le eclissi di Sole (totali, parziali, anulari) avvengono in Luna nuova, quelle di Luna in Luna piena; non avvengono ogni mese perché l'orbita lunare è inclinata di circa 5,1° e servono allineamenti vicino ai nodi.
- Le maree sono causate dall'attrazione differenziale di Luna e Sole, che produce due rigonfiamenti opposti; le alte maree si succedono ogni 12 h 25 min circa.
- Le maree sono vive in sizigie (Luna nuova e piena) e morte in quadratura (primo e ultimo quarto).
- L'attrito di marea rallenta la rotazione terrestre e allontana la Luna di circa 3,8 cm all'anno; il programma Apollo (1969–1972) portò dodici astronauti sulla Luna.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● La massa della Luna è circa:

   A. 1/6 della massa della Terra

   B. 1/81 della massa della Terra

   C. 1/4 della massa della Terra

   D. 1/50 della massa della Terra

2. ● Vediamo sempre la stessa faccia della Luna perché:
   - **A.** la Luna non ruota su se stessa
   - **B.** la Luna ruota su se stessa in 24 ore
   - **C.** il periodo di rotazione della Luna è uguale a quello di rivoluzione
   - **D.** la faccia opposta è sempre al buio

3. ● I mari lunari sono:
   - **A.** vaste pianure di lava scura solidificata
   - **B.** bacini un tempo pieni d'acqua, oggi ghiacciati
   - **C.** le regioni più antiche e più ricche di crateri
   - **D.** zone coperte da nubi di polvere

4. ● Il mese sinodico è:
   - **A.** il tempo di una rotazione della Luna rispetto alle stelle
   - **B.** il tempo impiegato dalla luce per andare dalla Terra alla Luna
   - **C.** il periodo di 27,32 giorni
   - **D.** l'intervallo fra due Lune nuove consecutive

5. ●● Al primo quarto la Luna sorge, approssimativamente:
   - **A.** a mezzanotte
   - **B.** verso mezzogiorno
   - **C.** al tramonto del Sole
   - **D.** all'alba

6. ● Un'eclisse di Luna può avvenire soltanto:
   - **A.** in Luna nuova
   - **B.** al primo quarto
   - **C.** in Luna piena
   - **D.** all'ultimo quarto

7. ●● Non si verifica un'eclisse di Sole a ogni Luna nuova perché:
   - **A.** la Luna è troppo piccola per fare ombra alla Terra
   - **B.** l'ombra della Luna è sempre troppo corta
   - **C.** la Luna nuova cade sempre di giorno
   - **D.** l'orbita lunare è inclinata di circa 5° sul piano dell'orbita terrestre

8. ● Le maree sigiziali (vive) si verificano:
   - **A.** in Luna nuova e in Luna piena
   - **B.** al primo e all'ultimo quarto
   - **C.** solo nei mesi estivi
   - **D.** solo quando la Luna è all'apogeo

9. ●● In un'eclisse anulare di Sole:
   A. la Terra si trova fra il Sole e la Luna
   B. la Luna, più lontana del solito, appare più piccola del Sole e lascia visibile un anello
   C. la Luna copre il Sole per molte ore
   D. la Luna appare di colore rosso

Vero o falso

10. ● La faccia nascosta della Luna è sempre al buio.

11. ● Le fasi lunari sono prodotte dall'ombra della Terra che copre in parte la Luna.

12. ● La luce cinerea è luce solare riflessa dalla Terra verso la Luna.

13. ● In gran parte delle coste si osservano due alte maree e due basse maree in circa 24 h 50 min.

14. ●● Un'eclisse totale di Sole è visibile contemporaneamente da tutto l'emisfero terrestre illuminato.

15. ●● La Luna si sta allontanando dalla Terra di circa 3,8 cm all'anno.

Applicare e calcolare

16. ● La distanza media Terra–Luna è 384 400 km e la luce viaggia a 299 792 km/s. Quanto tempo impiega un impulso laser per raggiungere la Luna? E per tornare indietro dopo la riflessione su un catadiottro?

17. ● Un astronauta con la tuta ha una massa complessiva di 120 kg. Calcola il suo peso sulla Terra (g = 9,81 m/s^2) e sulla Luna (g = 1,62 m/s^2). Qual è la sua massa sulla Luna?

18. ●● Considerando l'orbita lunare come una circonferenza di raggio 384 400 km percorsa in 27,32 d, calcola la velocità media della Luna in km/h e in km/s.

19. ●●● Un astronomo dispone dei valori 27,32 d per il mese sidereo e 365,26 d per l'anno sidereo. Ricava la durata del mese sinodico e calcola quante lunazioni ci sono in un anno.

20. ●● La Luna si allontana dalla Terra di 3,8 cm all'anno. Di quanto si è allontanata dal luglio 1969 (Apollo 11) al luglio 2025? Di quanti chilometri si allontanerà in un milione di anni? A quale percentuale della distanza attuale (384 400 km) corrisponde questo aumento?

21. ● In un porto l'alta marea si verifica alle 9:40. A che ora ci si aspettano le due alte maree successive? A che ora, circa, si avrà la bassa marea intermedia fra le prime due?

22. ●● Il Sole (diametro 1 392 000 km) dista 149 600 000 km; la Luna ha diametro 3475 km. Calcola il rapporto diametro/distanza del Sole e della Luna alla distanza media (384 400 km). Quale dei due appare più grande? Quante volte il Sole è più grande della Luna, e quante volte è più lontano?

23. ●●● La forza di marea di un corpo è proporzionale alla sua massa e inversamente proporzionale al cubo della sua distanza. Usando la massa del Sole ($1{,}99 \times 10^{30}$ kg) e della Luna ($7{,}34 \times 10^{22}$ kg) e le distanze medie $1{,}496 \times 10^{8}$ km e $3{,}844 \times 10^{5}$ km, calcola il rapporto fra la forza di marea del Sole e quella della Luna.

24. ●●● La Luna ha massa $7{,}34 \times 10^{22}$ kg e raggio 1737 km. Calcola la sua densità media in g/cm^3 (volume della sfera $V = 4/3\ \pi r^3$) e confrontala con quella della Terra (5,51 g/cm^3). Che cosa suggerisce questo confronto sul nucleo della Luna?

Leggere dati e figure

25. ● Osserva la Figura 11.4. Come appare la Luna dalla Terra quando si trova nella posizione in alto (a 90° dal Sole)? E quando si trova in basso a sinistra, fra la Luna piena e l'ultimo quarto? Per ciascuna posizione indica se la Luna è crescente o calante.

26. ●● Usando la Tabella 11.2: a) un mattino alle 7 vedi la Luna alta nel cielo verso sud, illuminata per metà. In quale fase è? Quale lato è illuminato? b) Perché è impossibile vedere la Luna piena alta nel cielo a mezzogiorno?

27. ●● Osserva la Figura 11.5. a) Nel disegno (a), in quale zona della Terra si osserva l'eclisse totale e in quale quella parziale? b) Perché un'eclisse di Luna è visibile da un'area della Terra molto più ampia di un'eclisse totale di Sole?

28. ●● Osserva la Figura 11.6. a) In quali posizioni della Terra sono possibili le eclissi? b) Quanto tempo separa, all'incirca, due «stagioni delle eclissi» successive? c) Che cosa accadrebbe se l'orbita lunare giacesse esattamente sul piano dell'orbita terrestre?

Indagare e argomentare

29. ●● Un compagno sostiene che le fasi lunari sono dovute all'ombra della Terra. Confuta la sua idea con almeno due argomenti, usando le posizioni di Sole, Terra e Luna e i tempi in cui la Luna sorge.

30. ●● Progetta, con un compagno e una sedia, un esperimento che mostri che la Luna ruota su se stessa anche se ci mostra sempre la stessa faccia. Descrivi che cosa farebbe ciascuno e che cosa si dovrebbe osservare.

31. ●● Spiega perché la superficie della Luna è piena di crateri antichi, mentre sulla Terra se ne riconoscono pochi, pur essendo i due corpi vicini e colpiti in passato con frequenze simili.

32. ●●● «Fra moltissimi milioni di anni dalla Terra non si vedranno più eclissi totali di Sole». Spiega perché questa previsione è corretta, collegando le maree, la rotazione terrestre e l'orbita della Luna.

PER APPROFONDIRE

- [SAG] C. Sagan, *Cosmos*: le pagine sulla Luna, sugli impatti che ne hanno segnato la superficie e sull'esplorazione spaziale.
- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: il capitolo sulla Terra nel Sistema solare, con l'origine della Luna e il confronto fra i pianeti rocciosi.
- [HAW] S. Hawking, *Dal big bang ai buchi neri*: per chi vuole capire meglio la gravità, la forza che governa orbite, eclissi e maree.

Glossario del capitolo

Attrito di marea
Attrito delle acque spostate dalle maree che rallenta la rotazione terrestre e fa allontanare la Luna di circa 3,8 cm all'anno.

Cratere da impatto
Depressione circolare prodotta dalla caduta di un meteorite o di un asteroide su una superficie.

Eclisse di Luna
Fenomeno in cui la Luna piena entra nell'ombra della Terra; è visibile da tutto l'emisfero notturno.

Eclisse di Sole
Fenomeno in cui la Luna nuova si interpone fra Sole e Terra e la sua ombra cade sulla Terra; può essere totale, parziale o anulare.

Fasi lunari
Cambiamenti dell'aspetto della Luna dovuti alla diversa porzione della sua metà illuminata che vediamo dalla Terra.

Forza di marea
Differenza fra l'attrazione esercitata da un corpo celeste su un punto della Terra e quella esercitata sul centro della Terra.

Ipotesi dell'impatto gigante
Ipotesi secondo cui la Luna si formò circa 4,5 miliardi di anni fa dai detriti dell'urto fra la giovane Terra e un corpo grande come Marte.

Librazioni
Piccole oscillazioni apparenti della Luna che permettono di osservare dalla Terra, nel tempo, circa il 59 % della sua superficie.

Linea dei nodi
Retta che unisce i due punti in cui l'orbita lunare, inclinata di circa 5,1°, attraversa il piano dell'orbita terrestre.

Luce cinerea
Debole luce che rischiara la parte buia della Luna vicino alla Luna nuova: luce solare riflessa dalla Terra.

Maree sigiziali e di quadratura
Maree vive (Luna nuova e piena, effetti di Sole e Luna sommati) e maree morte (primo e ultimo quarto, effetti in contrasto).

Mari lunari
Vaste pianure scure della Luna formate da lave basaltiche solidificate in grandi bacini d'impatto, fra circa 4 e 3 miliardi di anni fa.

Mese sidereo
Tempo impiegato dalla Luna per compiere un giro intorno alla Terra rispetto alle stelle: 27,32 giorni.

Mese sinodico
Intervallo fra due fasi lunari uguali consecutive, per esempio due Lune nuove: 29,53 giorni in media.

Ombra e penombra
Ombra: regione da cui la sorgente di luce è completamente nascosta. Penombra: regione da cui è nascosta solo in parte.

Regolite
Strato di polvere e frammenti di roccia, spesso da pochi metri a una quindicina di metri, che copre la superficie lunare.

Rotazione sincrona
Situazione in cui un satellite ruota su se stesso nello stesso tempo in cui compie una rivoluzione: per questo vediamo sempre la stessa faccia della Luna.

Satellite naturale
Corpo celeste che orbita intorno a un pianeta; la Luna è l'unico satellite naturale della Terra.

Terre alte
Regioni chiare e montuose della Luna, più antiche dei mari e fittamente coperte di crateri.

Soluzioni

1. B. La massa della Luna è circa $7{,}35 \times 10^{22}$ kg, cioè circa 1/81 di quella terrestre; 1/6 è invece il rapporto fra le accelerazioni di gravità in superficie.

2. C. Rotazione sincrona: periodo di rotazione = periodo di rivoluzione = 27,32 d.

3. A. Sono pianure di lave basaltiche scure solidificate in grandi bacini d'impatto; non hanno mai contenuto mari d'acqua.

4. D. È il periodo delle fasi, 29,53 d in media.

5. B. Al primo quarto la Luna è a 90° a est del Sole: sorge verso mezzogiorno, culmina verso le 18 e tramonta verso mezzanotte.

6. C. Solo quando la Terra è fra Sole e Luna, cioè in Luna piena.

7. D. Per l'inclinazione di circa 5,1° l'ombra lunare di solito passa sopra o sotto la Terra; l'eclisse è possibile solo vicino ai nodi.

8. A. In sizigie gli effetti di Luna e Sole si sommano.

9. B. Vicino all'apogeo il disco lunare è più piccolo di quello solare e il cono d'ombra non raggiunge la Terra.

10. F. È la faccia *nascosta*, non buia: riceve la luce del Sole come l'altra ed è tutta illuminata quando per noi è Luna nuova.

11. F. Le fasi dipendono da quanta parte della metà illuminata vediamo; l'ombra della Terra cade sulla Luna solo nelle eclissi di Luna, in Luna piena.

12. V.

13. V. È il periodo di rotazione della Terra rispetto alla Luna; due alte maree ogni ≈ 12 h 25 min.

14. F. La totalità si vede solo nella stretta fascia raggiunta dall'ombra della Luna (al massimo poche centinaia di km); nella penombra l'eclisse è parziale, altrove non si vede. È l'eclisse di Luna a essere visibile da tutto l'emisfero notturno.

15. V. Misura ottenuta con impulsi laser riflessi dai catadiottri lasciati dalle missioni Apollo.

16. t = 384 400 km / 299 792 km/s ≈ 1,28 s per l'andata; andata e ritorno ≈ 2,56 s.

17. Terra: $P = 120 \text{ kg} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2 \approx 1{,}18 \times 10^3$ N. Luna: $P = 120 \text{ kg} \times 1{,}62 \text{ m/s}^2 \approx 194$ N (circa 1/6). La massa resta 120 kg.

18. Circonferenza = $2\pi \times 384\,400$ km ≈ $2{,}415 \times 10^6$ km; tempo = 27,32 × 24 h = 655,7 h; $v \approx 3{,}68 \times 10^3$ km/h; dividendo per 3600: $v \approx 1{,}02$ km/s.

19. $1/T_{\text{sin}} = 1/27{,}32 - 1/365{,}26 \approx 0{,}036\,603 - 0{,}002\,738 = 0{,}033\,865\ \text{d}^{-1}$; $T_{\text{sin}} \approx 29{,}53$ d. Lunazioni in un anno: 365,26/29,53 ≈ 12,37.

20. 56 anni × 3,8 cm/anno ≈ 213 cm ≈ 2,1 m. In 10^6 anni: $3{,}8 \times 10^6$ cm = 38 km. 38/384 400 × 100 ≈ 0,0099 % ≈ 0,01 %.

21. 9:40 + 12 h 25 min = 22:05; 22:05 + 12 h 25 min = 10:30 del giorno dopo. La bassa marea cade circa a metà intervallo: 9:40 + 6 h 12 min ≈ 15:52 (circa 15:50).

22. Sole: 1 392 000/149 600 000 ≈ 0,009 30; Luna: 3475/384 400 ≈ 0,009 04. Alla distanza media il Sole appare leggermente più grande (un'eclisse centrale sarebbe anulare). Il Sole è circa 401 volte più grande (≈ 400) e circa 389 volte più lontano (≈ 390): i due fattori quasi si compensano.

23. Rapporto = $(1{,}99 \times 10^{30}/7{,}34 \times 10^{22}) \times (3{,}844 \times 10^5/1{,}496 \times 10^8)^3 \approx 2{,}71 \times 10^7 \times 1{,}70 \times 10^{-8} \approx 0{,}46$. La forza di marea del Sole è circa il 46 % di quella della Luna.

24. r = 1737 km = $1{,}737 \times 10^8$ cm; $V = 4/3\ \pi\ r^3 \approx 2{,}20 \times 10^{25}$ cm^3; $m = 7{,}34 \times 10^{25}$ g; $d \approx 3{,}34$ g/cm^3, circa il 61 % di quella terrestre. La Luna contiene poco ferro: il suo nucleo metallico è piccolo (raggio ≈ 350 km), coerente con l'ipotesi dell'impatto gigante.

25. In alto (90°): primo quarto, metà destra illuminata, Luna crescente. In basso a sinistra (225°): gib-

bosa calante, illuminata più della metà con la parte buia a destra, Luna calante.

26. a) Ultimo quarto (culmina verso le 6 e tramonta verso mezzogiorno); è illuminata la metà sinistra (est, verso il Sole che sta sorgendo). b) La Luna piena è opposta al Sole: culmina verso mezzanotte e a mezzogiorno è sotto l'orizzonte.

27. a) Totale nella piccola zona raggiunta dal vertice del cono d'ombra della Luna; parziale nella regione molto più ampia coperta dalla penombra. b) Nell'eclisse di Luna è la Luna a entrare nell'ombra della Terra e a oscurarsi davvero: la vede scura chiunque l'abbia sopra l'orizzonte, cioè tutto l'emisfero in cui è notte; nell'eclisse di Sole l'ombra lunare sulla Terra è piccola.

28. a) Nelle due posizioni (a sinistra e a destra) in cui la linea dei nodi punta verso il Sole. b) Circa sei mesi. c) Ogni Luna nuova darebbe un'eclisse di Sole e ogni Luna piena un'eclisse di Luna, cioè una di ciascun tipo ogni mese.

29. Traccia: l'ombra della Terra è sempre dalla parte opposta al Sole, quindi potrebbe raggiungere la Luna solo in Luna piena, quando invece la vediamo tutta illuminata; la falce crescente si vede la sera vicino al Sole al tramonto, dove l'ombra della Terra non può arrivare; il terminatore delle fasi è un'ellisse netta, il bordo dell'ombra in un'eclisse è circolare e sfumato; le fasi si ripetono ogni mese, le eclissi di Luna no.

30. Traccia: uno studente (la Terra) sta fermo; l'altro (la Luna) gira intorno alla sedia/compagno guardandolo sempre in faccia. Un osservatore esterno, o lo stesso studente che cammina, nota che la «Luna» vede in successione tutte le pareti della stanza: ha compiuto un giro su se stessa per ogni giro intorno. Ripetendo il giro guardando sempre la stessa parete, il compagno al centro vedrebbe a turno faccia, fianchi e nuca: è il caso senza rotazione.

31. Traccia: sulla Terra l'atmosfera brucia i corpi più piccoli; vento, acqua, ghiaccio e vegetazione erodono e ricoprono i crateri; l'attività geologica (vulcani, movimenti della crosta, che studierai più avanti) rinnova la superficie. Sulla Luna mancano atmosfera, acqua e attività geologica recente, quindi i crateri si conservano per miliardi di anni.

32. Traccia: l'attrito di marea rallenta la rotazione terrestre e i rigonfiamenti, trascinati in avanti, spingono la Luna su un'orbita più ampia (≈ 3,8 cm/anno). Allontanandosi, la Luna appare sempre più piccola; oggi le dimensioni apparenti di Sole e Luna sono quasi uguali e al perigeo la Luna può coprire il Sole. Quando anche al perigeo il rapporto diametro/distanza della Luna sarà minore di quello del Sole, le eclissi centrali saranno solo anulari.