CAPITOLO

9

Il Sistema solare

Per migliaia di anni i pianeti sono stati puntini erranti fra le stelle. Oggi sono mondi con un nome, una superficie e una storia.

OBIETTIVI

1. Descrivere l'origine del Sistema solare secondo l'ipotesi della nebulosa e la sua struttura generale.
2. Descrivere la struttura del Sole, l'origine della sua energia e le manifestazioni della sua attività.
3. Ricostruire il passaggio dal modello geocentrico a quello eliocentrico e il ruolo di Copernico, Galileo, Keplero e Newton.
4. Enunciare e applicare le tre leggi di Keplero e spiegare, in forma qualitativa, l'idea di gravitazione universale di Newton.
5. Confrontare pianeti terrestri e gioviani e descrivere ciascun pianeta in modo sintetico.
6. Riconoscere i corpi minori (pianeti nani, asteroidi, comete, meteoroidi) e le regioni in cui si trovano.

INDICE DEL CAPITOLO

9.1 Origine e struttura del Sistema solare 2
9.2 Il Sole, la nostra stella 5
9.3 Dal geocentrismo alle leggi di Keplero 8
9.4 I pianeti 14
9.5 I corpi minori 17
9.6 Esplorare il Sistema solare e cercare altri mondi 20

Scienze naturali 1 · Parte II · La Terra nello spazio · versione 1.0
Capitolo 9: Il Sistema solare · pagine 215–240 del volume completo · estratto per lo studio

Nel Capitolo 8 hai viaggiato fino ai confini dell'Universo osservabile. Ora torniamo vicino a casa. Intorno a una stella qualunque, a circa metà strada fra il centro e il bordo della Via Lattea, ruota un corteo di corpi celesti: otto pianeti con i loro satelliti, alcuni pianeti nani, milioni di asteroidi e miliardi di comete. È il **Sistema solare**, l'insieme dei corpi legati al Sole dalla forza di gravità.

Il Sistema solare è anche il luogo in cui è nata la scienza moderna: per spiegare il moto dei pianeti gli astronomi hanno costruito modelli sempre più precisi, inventato strumenti e scoperto una legge, la gravitazione universale, che vale tanto per una mela che cade quanto per Nettuno. In questo capitolo vedremo come si è formato il Sistema solare, come funziona il Sole, come si muovono i pianeti e quali sono i loro caratteri, fino ai corpi più piccoli e lontani.

9.1 Origine e struttura del Sistema solare

9.1.1 L'ipotesi della nebulosa

Il Sistema solare ha un'età di circa **4,6 miliardi di anni**: i granuli più antichi dei meteoriti, datati con metodi basati sulla radioattività, hanno circa 4,57 miliardi di anni e sono considerati i primi solidi formati intorno al giovane Sole.

Il modello oggi accettato è l'**ipotesi della nebulosa**, proposta nel Settecento da Immanuel Kant e Pierre-Simon de Laplace e arricchita da molte osservazioni moderne. In sintesi:

1. **Una nube in contrazione.** Una nube di gas (soprattutto idrogeno ed elio) e polveri, simile alle nebulose in cui oggi nascono le stelle (vedi Capitolo 8), cominciò a contrarsi sotto l'effetto della propria gravità.
2. **Un disco che ruota.** Contraendosi, la nube ruotava sempre più in fretta, come una pattinatrice che chiude le braccia, e si appiattiva in un **disco protoplanetario**. Al centro la materia si concentrava e si scaldava: quando superò una decina di milioni di kelvin si accese la fusione dell'idrogeno e nacque il Sole.
3. **Dai granelli ai planetesimi.** Nel disco i granelli di polvere si univano in corpi di qualche chilometro, i **planetesimi**, che scontrandosi e attraendosi crebbero fino a diventare protopianeti: è l'accrescimento.
4. **Mondi diversi a distanze diverse.** Vicino al Sole faceva troppo caldo perché acqua, metano e ammoniaca restassero solidi: condensavano solo silicati e metalli, scarsi nella nebulosa, e si formarono pianeti piccoli e rocciosi. Oltre la **linea della neve**, a qualche unità astronomica dal Sole, fra le orbite attuali di Marte e Giove, anche i ghiacci erano solidi: i nuclei dei protopianeti crebbero molto e catturarono enormi quantità di idrogeno ed elio. Nacquero i pianeti giganti.

5. **La pulizia del disco.** Il vento del giovane Sole spazzò via il gas rimasto. I planetesimi rimasti sopravvivono ancora oggi come asteroidi e comete.

L'ipotesi della nebulosa spiega fatti che altrimenti sarebbero coincidenze: tutti i pianeti girano intorno al Sole nello stesso verso in cui ruota il Sole stesso, le loro orbite giacciono quasi nello stesso piano, i pianeti rocciosi sono vicini al Sole e i giganti lontani. Inoltre i telescopi moderni hanno fotografato intorno a molte stelle giovani dischi di gas e polveri, alcuni con lacune scavate da pianeti in formazione: è come vedere il nostro passato in diretta.

9.1.2 L'architettura del Sistema solare

Il Sole contiene circa il **99,86 %** della massa dell'intero Sistema solare. Tutto il resto, pianeti compresi, è quasi una briciola, e più di due terzi della massa dei pianeti appartiene a un solo corpo, Giove. Le distanze nel Sistema solare si misurano comodamente in unità astronomiche (UA): 1 UA è la distanza media Terra–Sole, circa 149,6 milioni di km (vedi Capitolo 8 e Tabella A.3).

Partendo dal Sole incontriamo (Figura 9.1):

- i quattro **pianeti terrestri**, Mercurio, Venere, Terra e Marte, entro 1,5 UA;
- la **fascia principale degli asteroidi**, fra circa 2,1 e 3,3 UA;
- i quattro **pianeti giganti**, Giove, Saturno, Urano e Nettuno, fra 5 e 30 UA;
- la **fascia di Kuiper**, una ciambella di corpi ghiacciati fra circa 30 e 50 UA, dove si trova Plutone;
- molto più lontano, la **nube di Oort**, un guscio sferico ipotetico di nuclei cometari che si estenderebbe fino a decine di migliaia di UA.

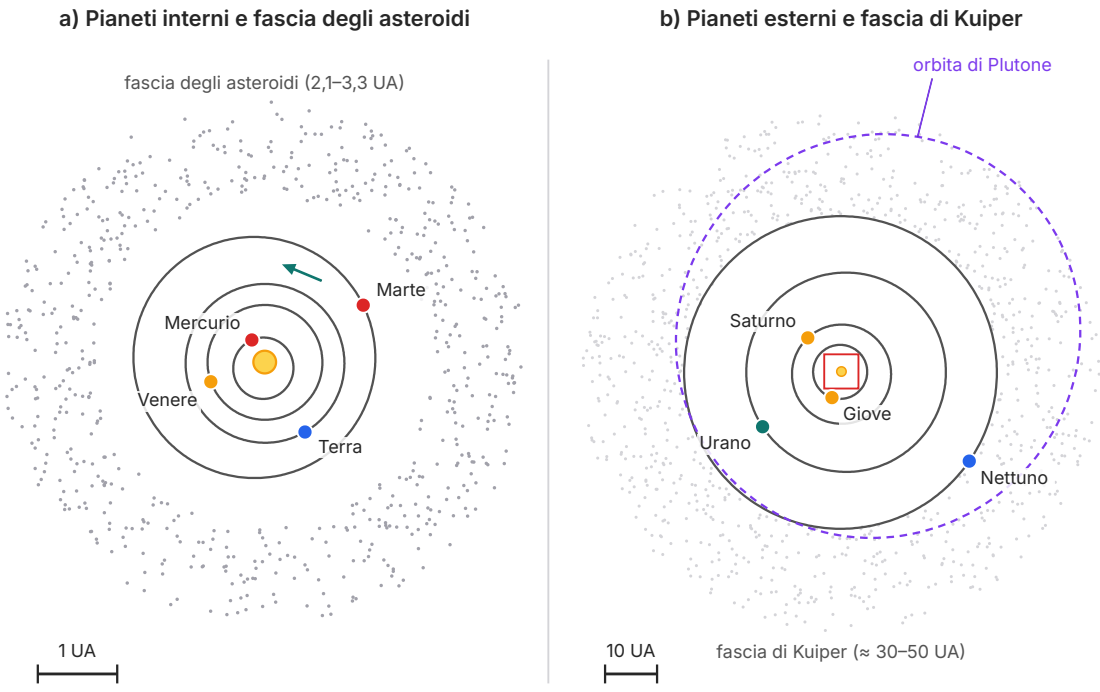


Figura 9.1 Le orbite dei pianeti disegnate in scala, viste dal polo nord del piano dell'orbita terrestre (orbite reali con eccentricità e orientamento dei perieli; posizioni dei pianeti indicative). a) Pianeti interni e fascia degli asteroidi; il Sole è il disco giallo, la freccia indica il verso di rivoluzione, comune a tutti i pianeti. b) Pianeti esterni, fascia di Kuiper e orbita di Plutone (tratteggiata, disegnata nel piano senza tenere conto della sua inclinazione di 17°); il quadratino rosso al centro contiene tutto il pannello a.

Gli spazi fra i pianeti crescono allontanandosi dal Sole (Figura 9.1): se l'orbita di Nettuno avesse un diametro di 100 m, quanto un campo da calcio, la Terra girerebbe a meno di 2 m dal Sole. Il Sistema solare è soprattutto spazio vuoto.

DA RICORDARE

Tre regolarità del Sistema solare sono la «firma» della sua origine da un unico disco in rotazione: i pianeti orbitano tutti nello stesso verso (antiorario visto dal polo nord dell'orbita terrestre), le orbite stanno quasi in uno stesso piano, e la composizione dei pianeti cambia con la distanza dal Sole (rocciosi vicino, gassosi e ghiacciati lontano).

9.2 Il Sole, la nostra stella

9.2.1 Carta d'identità del Sole

Il Sole è una stella di sequenza principale di tipo G2 V (vedi Capitolo 8), del tutto ordinaria rispetto alle altre stelle. Per noi però è gigantesco: il suo raggio è di circa **696 000 km**, 109 volte quello terrestre. In massa è composto per circa tre quarti da idrogeno e per circa un quarto da elio. È interamente gassoso, anzi è un *plasma*, un gas così caldo che gli atomi hanno perso parte dei loro elettroni. Non avendo una superficie solida, non ruota come un corpo rigido: all'equatore compie un giro in circa 25 giorni, vicino ai poli in circa 35 (rotazione differenziale).

9.2.2 La struttura interna e l'atmosfera

La struttura interna del Sole si ricostruisce con modelli fisici, controllati misurando le vibrazioni della sua superficie. Dal centro verso l'esterno distinguiamo sei strati (Figura 9.2).

- **Nucleo** (fino a circa un quarto del raggio). Temperatura di circa 15 milioni di kelvin e densità di oltre cento volte quella dell'acqua: qui avvengono le reazioni nucleari che producono l'energia del Sole.
- **Zona radiativa** (fino a circa il 70 % del raggio). L'energia procede come radiazione, assorbita e riemessa innumerevoli volte in direzioni casuali: impiega decine o centinaia di migliaia di anni ad attraversare questa zona.
- **Zona convettiva** (dal 70 % del raggio alla superficie). Il gas più caldo sale, si raffredda in superficie e ridiscende, come l'acqua in una pentola sul fuoco: l'energia è trasportata da moti convettivi.
- **Fotosfera**. È la «superficie» visibile, spessa qualche centinaio di chilometri, da cui esce quasi tutta la luce; temperatura di circa 5800 K. Al telescopio, con filtri adatti, appare punteggiata di *granuli*, le sommità delle celle convettive.
- **Cromosfera**. Uno strato sottile e rosato, visibile a occhio nudo solo durante le eclissi totali; la temperatura sale fino a circa 20 000 K.
- **Corona**. L'atmosfera esterna, tenue, estesa per milioni di chilometri, con temperature superiori al milione di kelvin: perché sia tanto più calda della fotosfera è ancora un problema aperto.

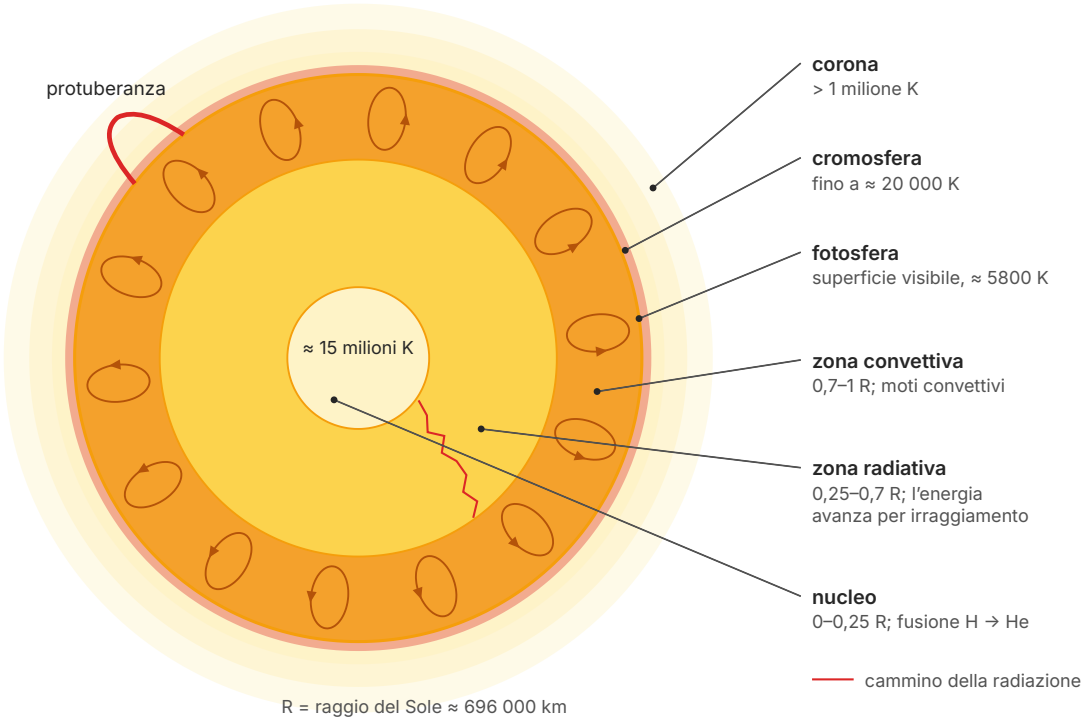


Figura 9.2 Sezione schematica del Sole. Le proporzioni fra nucleo, zona radiativa e zona convettiva sono rispettate; fotosfera e cromosfera, spesse solo poche migliaia di chilometri, sono ingrandite per renderle visibili. Nella zona radiativa l'energia procede con un cammino casuale (linea rossa), nella zona convettiva è trasportata da celle di convezione.

9.2.3 Da dove viene l'energia del Sole

Il Sole irraggia un'enorme quantità di energia da 4,6 miliardi di anni: nessuna reazione chimica potrebbe durare tanto. La fonte è la **fusione nucleare**: nel nucleo, a temperature e pressioni altissime, nuclei di idrogeno si uniscono attraverso una catena di passaggi a formare nuclei di elio:

$$4 \text{ nuclei di idrogeno} \rightarrow 1 \text{ nucleo di elio} + \text{energia}$$

Il nucleo di elio ha una massa leggermente minore (circa lo 0,7 % in meno) dei quattro nuclei di idrogeno di partenza: la massa mancante si è trasformata in energia, secondo la relazione di Einstein $E = m \cdot c^2$ che incontrerai più avanti negli studi. Ogni secondo il Sole trasforma in elio circa 600 milioni di tonnellate di idrogeno; ciononostante resterà sulla sequenza principale ancora per circa 5 miliardi di anni, poi diventerà una gigante rossa e finirà come nana bianca (vedi Capitolo 8). A differenza delle reazioni chimiche dei Capitoli 5 e 6, qui cambia la natura stessa degli atomi: l'idrogeno diventa elio.

ERRORE FREQUENTE

«Il Sole è una palla di fuoco che brucia idrogeno». Il Sole *non brucia*: la combustione è una reazione chimica fra un combustibile e l'ossigeno, e libera relativamente poca energia. Se il Sole fosse fatto di carbone e bruciasse, si esaurirebbe in qualche migliaio di anni. La sua energia viene da reazioni *nucleari*, in cui nuclei leggeri si fondono e parte della massa si trasforma in energia.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto è «vecchia» la luce del Sole?

Problema. La luce viaggia nel vuoto a $c = 299\,792$ km/s. Quanto tempo impiega a percorrere 1 UA $= 1{,}496 \times 10^8$ km?

Soluzione. Il tempo è distanza diviso velocità:

$$t = \frac{1{,}496 \times 10^8 \text{ km}}{2{,}998 \times 10^5 \text{ km/s}} = 499 \text{ s} \approx 8 \text{ min } 19 \text{ s}$$

Commento. Vediamo il Sole com'era poco più di 8 minuti fa. Se il Sole si spegnesse all'improvviso, ce ne accorgeremmo solo dopo 8 minuti e 19 secondi. L'energia che illumina la fotosfera, però, era stata prodotta nel nucleo decine di migliaia di anni prima.

9.2.4 Il Sole attivo: macchie, brillamenti, vento solare

Il Sole non è sempre uguale a se stesso. Le sue manifestazioni variabili costituiscono l'attività solare, e sono legate al suo intenso e complicato campo magnetico, che la rotazione differenziale continua ad avvolgere e deformare.

Le **macchie solari** sono regioni della fotosfera in cui il campo magnetico, molto intenso, frena i moti convettivi: il gas si raffredda a circa 3800 K e appare scuro solo per contrasto con la fotosfera circostante, più calda e più luminosa. Spesso sono più grandi della Terra e durano da qualche giorno a qualche settimana. Il loro numero varia secondo il **ciclo solare**, di circa **11 anni**, dal minimo, quando il disco può restare senza macchie per settimane, al massimo.

Nelle regioni delle macchie il campo magnetico solleva archi di gas incandescente, le protuberanze. Quando il campo si riorganizza bruscamente si producono i brillamenti, esplosioni che in pochi minuti liberano enormi quantità di radiazione e particelle; a volte la corona espelle nello spazio miliardi di tonnellate di plasma.

Anche quando è tranquillo, il Sole perde continuamente materia: dalla corona fluisce il **vento solare**, un flusso di particelle cariche (soprattutto protoni ed elettroni) a qualche centinaio di km/s. Il campo magnetico terrestre lo devia, ma incanala una parte delle particelle verso le regioni polari, dove urtano gli atomi e le molecole dell'alta atmosfera facendoli brillare: sono le **aurore** (boreali e australi), a 100–300 km di quota.

COLLEGAMENTI

Chimica e cittadinanza. I colori delle aurore sono righe di emissione (vedi Capitolo 8): il verde e il rosso sono emessi dagli atomi di ossigeno. Nelle tempeste magnetiche più forti le aurore arrivano alle medie latitudini: nella notte fra il 10 e l'11 maggio 2024 un'aurora rossa è stata fotografata in molte regioni d'Italia. Le stesse tempeste possono disturbare satelliti, GPS, comunicazioni radio e, nei casi estremi, reti elettriche, come accadde ai telegrafi durante l'evento di Carrington del 1859. Per questo il Sole è sorvegliato ogni giorno: è il *meteo spaziale*.

9.3 Dal geocentrismo alle leggi di Keplero

9.3.1 Il modello geocentrico di Tolomeo

A occhio nudo la Terra sembra immobile e tutto pare girarle intorno. Gli antichi distinguevano le stelle «fisse» dai *pianeti* (in greco «erranti»), che si spostano lentamente fra le costellazioni e di tanto in tanto tornano indietro per qualche settimana (**moto retrogrado**).

Il modello più completo dell'antichità fu quello di Claudio Tolomeo, astronomo greco vissuto ad Alessandria d'Egitto nel II secolo d.C., esposto nell'*Almagesto*. Nel **modello geocentrico** la Terra sta ferma al centro; intorno a lei ruotano, nell'ordine, la Luna, Mercurio, Venere, il Sole, Marte, Giove e Saturno, e infine la sfera delle stelle fisse (Figura 9.3a). Per spiegare il moto retrogrado ogni pianeta percorre un piccolo cerchio, l'**epiciclo**, il cui centro ruota intorno alla Terra lungo un cerchio più grande, il *deferente*. Il modello prevedeva le posizioni dei pianeti abbastanza bene da essere accettato fino al Cinquecento.

Già nel III secolo a.C. Aristarco di Samo aveva proposto che la Terra girasse intorno al Sole, ma l'idea non ebbe seguito: se la Terra si muovesse, si pensava, le stelle dovrebbero mostrare una parallasse (vedi Capitolo 8), che nessuno vedeva. Esiste, ma è così piccola che fu misurata solo nel 1838.

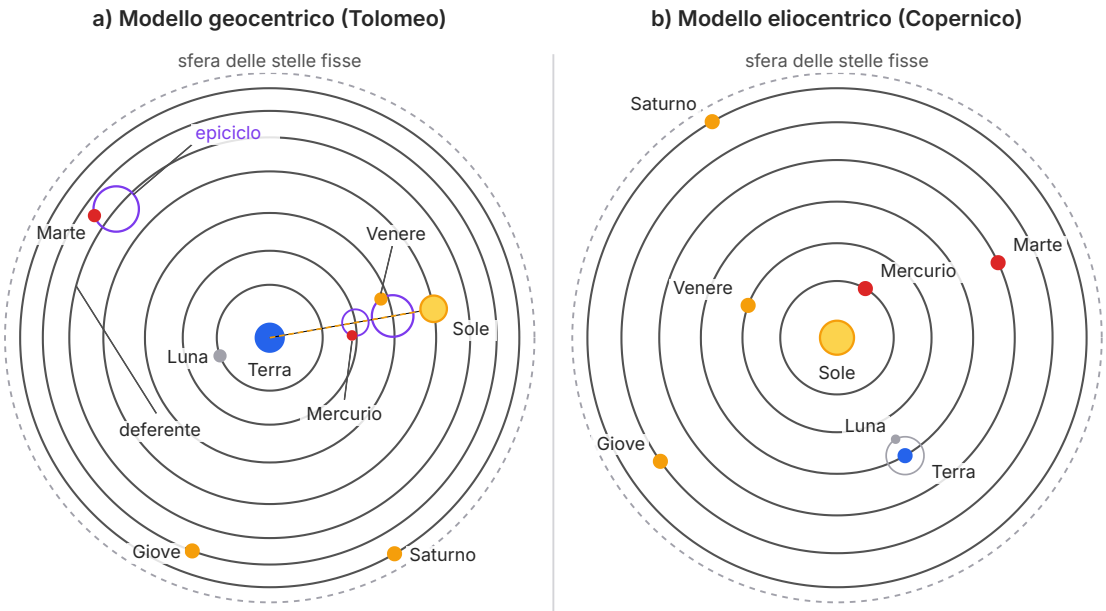


Figura 9.3 Due modelli del cosmo a confronto (schemi non in scala). a) Nel modello geocentrico di Tolomeo la Terra è immobile al centro; i pianeti percorrono epicicli il cui centro si muove sul deferente (per semplicità sono disegnati solo alcuni epicicli). Il centro dell'epiciclo di Venere resta sempre sulla linea Terra–Sole (tratteggio arancione). b) Nel modello eliocentrico di Copernico il Sole è al centro e la Terra, con la Luna, è il terzo pianeta.

9.3.2 La rivoluzione copernicana

Nel 1543, l'anno della sua morte, l'astronomo polacco Niccolò Copernico pubblicò il *De revolutionibus orbium coelestium* («Sulle rivoluzioni delle sfere celesti»). Nel suo **modello eliocentrico** il Sole è fermo al centro, mentre la Terra è un pianeta come gli altri: ruota su se stessa in un giorno e gira intorno al Sole in un anno; solo la Luna gira intorno alla Terra (Figura 9.3b).

Il vantaggio era la semplicità. Il moto retrogrado diventa un effetto di prospettiva: la Terra, più interna e più veloce, «sorpassa» un pianeta esterno, che per qualche settimana sembra andare all'indietro rispetto alle stelle lontane, come un camion sorpassato in autostrada. Il modello spiegava anche perché Mercurio e Venere non si allontanano mai molto dal Sole nel cielo, e permetteva di calcolare le distanze relative dei pianeti. Copernico però conservava le orbite circolari e le sue previsioni non erano molto più precise di quelle di Tolomeo.

9.3.3 Galileo e il cannocchiale

Nel 1609 Galileo Galilei, professore a Padova, costruì un cannocchiale e lo puntò verso il cielo. Le sue scoperte, pubblicate dal 1610 nel *Sidereus Nuncius* («Il messaggero delle stelle») e negli anni seguenti, demolirono le certezze antiche:

- la Luna ha montagne e crateri: non è una sfera celeste perfetta, ma un mondo simile alla Terra;
- la Via Lattea è formata da una moltitudine di stelle invisibili a occhio nudo;
- Giove è accompagnato da quattro satelliti (oggi detti *galileiani*): dunque non tutto ruota intorno alla Terra;
- Venere mostra una serie completa di fasi, come la Luna, e cambia molto di dimensione apparente: quando appare piena è piccola, quando è una sottile falce è grande. Questo è possibile solo se Venere gira intorno al Sole;
- il Sole ha macchie che si spostano sul disco: anche il Sole è imperfetto e ruota su se stesso.

Le fasi di Venere erano l'argomento più forte. Nel modello di Tolomeo Venere, con il suo epiciclo, resta sempre fra la Terra e il Sole (Figura 9.3a): dovremmo vederla sempre falcata o «nuova», mai piena. Nel modello eliocentrico, invece, Venere passa anche dietro il Sole e mostra tutte le fasi, come Galileo osservò.

APPROFONDIMENTO

Galileo, la scienza e il processo

Galileo (Pisa 1564 – Arcetri 1642) fu il primo a portare prove osservative a favore di Copernico. Scriveva anche in italiano, per farsi capire da un pubblico ampio, e sosteneva che la natura si studia con «sensate esperienze e necessarie dimostrazioni», cioè con esperimenti uniti al ragionamento matematico (vedi Capitolo 1). Nel 1632 pubblicò il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, in cui il sistema copernicano usciva vincitore; nel 1633 fu processato dal Sant'Uffizio, costretto ad abiurare e confinato nella sua villa di Arcetri, dove continuò a studiare la meccanica fino alla morte.

9.3.4 Le tre leggi di Keplero

Negli stessi anni il tedesco Giovanni Keplero (Johannes Kepler) risolse il problema della forma delle orbite. A Praga era stato assistente del danese Tycho Brahe, che aveva raccolto, senza cannocchiale, le misure più precise mai fatte delle posizioni dei pianeti. Ereditati quei dati nel 1601, Keplero cercò per anni di descrivere l'orbita di Marte con dei cerchi, ma restava una differenza di 8 primi d'arco, troppo grande per gli strumenti di Tycho, precisi a un paio di primi. Keplero non ignorò quel disaccordo e abbandonò il cerchio. Ne nacquero tre leggi, pubblicate nel 1609 (*Astronomia nova*, prima e seconda) e nel 1619 (*Harmonices mundi*, terza).

Prima legge (delle orbite). *Le orbite dei pianeti sono ellissi, di cui il Sole occupa uno dei due fuochi.* Un'ellisse è una curva chiusa in cui la somma delle distanze di ogni punto da due punti fissi, i *fuochi*, è costante: la si disegna con uno spago fissato a due chiodi e una matita che lo tiene teso. Metà dell'asse più lungo è il **semiasse maggiore** *a*, pari alla distanza media del pianeta dal Sole. Il punto dell'orbita più vicino al Sole è il **perielio**, il più lontano l'**afelio**. Lo schiacciamen-

to si misura con l'eccentricità e, che vale 0 per una circonferenza e si avvicina a 1 per ellissi molto allungate. Le orbite dei pianeti sono quasi circolari (Terra 0,017, Marte 0,093, Mercurio 0,21); la Figura 9.4 usa un'eccentricità esagerata.

Seconda legge (delle aree). *Il segmento che congiunge il Sole al pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.* Al perielio il pianeta deve percorrere nello stesso tempo un arco più lungo, quindi va più veloce; all'afelio va più piano (Figura 9.4). La Terra, per esempio, va a circa 30,3 km/s a inizio gennaio e a 29,3 km/s a inizio luglio (vedi Capitolo 10).

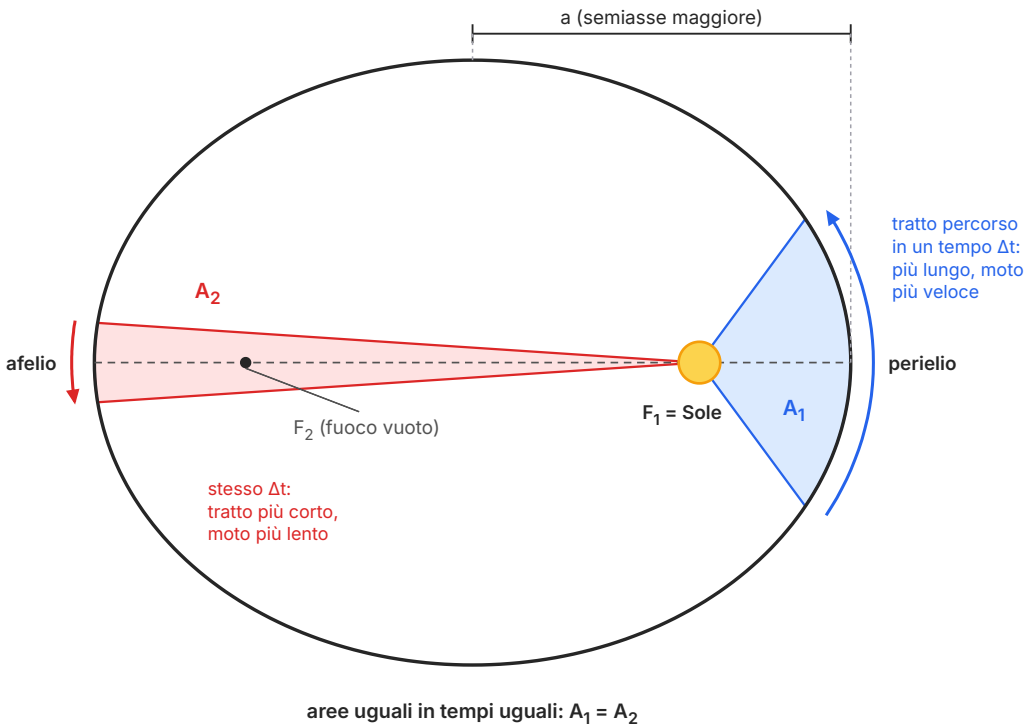


Figura 9.4 Prima e seconda legge di Keplero. L'orbita è un'ellisse con il Sole in un fuoco (F_1); qui l'eccentricità è esagerata (e = 0,6), mentre le orbite dei pianeti sono quasi circolari. Le due aree colorate, calcolate con le leggi del moto, sono uguali e vengono percorse nello stesso intervallo di tempo: vicino al perielio il pianeta percorre un arco più lungo, quindi è più veloce.

Terza legge (dei periodi). *I quadrati dei periodi di rivoluzione dei pianeti sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle loro orbite.* In simboli, per tutti i pianeti che orbitano intorno al Sole il rapporto

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{costante}$$

ha lo stesso valore. Se misuriamo il periodo T in anni e il semiasse a in unità astronomiche, per la Terra $T = 1$ e $a = 1$, quindi la costante vale 1 e la legge diventa semplicemente:

$$T^2 = a^3 \quad (T \text{ in anni}, a \text{ in UA})$$

La Tabella 9.1 verifica la legge con i dati della Tabella C.1, e la Figura 9.5 mostra che i punti (a^3; T^2) cadono su una retta per l'origine di pendenza 1: è la proporzionalità diretta del Capitolo 1. Più un pianeta è lontano, più è lungo il suo anno, non solo perché l'orbita è più lunga ma anche perché il pianeta si muove più lentamente.

Tabella 9.1 Verifica della terza legge di Keplero con i dati della Tabella C.1 (T in anni, a in UA). Il rapporto T^2/a^3 vale 1 entro un paio di millesimi: le piccole differenze dipendono dagli arrotondamenti dei dati.

Pianeta	a (UA)	a^3	T (anni)	T^2	T^2/a^3
Mercurio	0,387	0,0580	0,241	0,0580	1,001
Venere	0,723	0,3779	0,615	0,3784	1,001
Terra	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Marte	1,524	3,540	1,88	3,534	0,999
Giove	5,20	140,6	11,86	140,7	1,000
Saturno	9,54	868,3	29,46	867,9	1,000
Urano	19,19	7067	84,0	7056	0,998
Nettuno	30,07	27 189	164,8	27 159	0,999

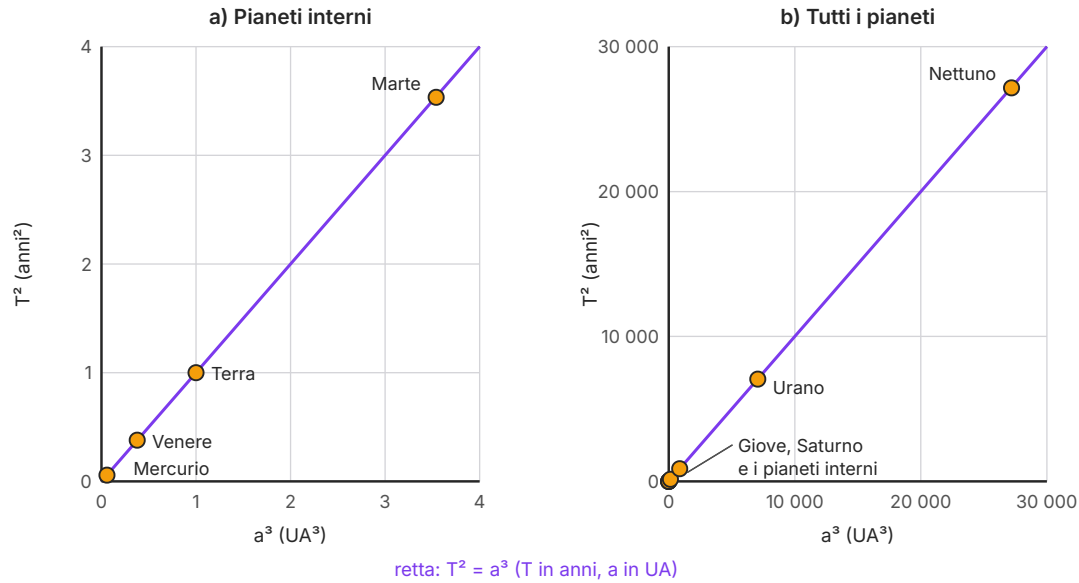


Figura 9.5 Terza legge di Keplero: T^2 in funzione di a^3 per gli otto pianeti, con i dati della Tabella 9.1. Tutti i punti cadono sulla retta $T^2 = a^3$, di pendenza 1. a) Ingrandimento dei pianeti interni; b) tutti i pianeti, con i pianeti interni, Giove e Saturno schiacciati vicino all'origine.

ESEMPIO SVOLTO

Usare la terza legge di Keplero

Problema 1. Cerere, il più grande corpo della fascia degli asteroidi, ha un'orbita con semiasse maggiore $a = 2{,}77$ UA. Qual è il suo periodo di rivoluzione?

Soluzione. Da $T^2 = a^3$ ricaviamo $T = \sqrt{(a^3)}$. Calcoliamo $a^3 = 2{,}77^3 = 21{,}25$; quindi $T = \sqrt{21{,}25} = 4{,}61$ anni.

Problema 2. Un oggetto della fascia di Kuiper impiega 248 anni a compiere un giro intorno al Sole. Qual è la sua distanza media dal Sole?

Soluzione. Ora conosciamo T e cerchiamo a: $a^3 = T^2 = 248^2 = 61\,504$, quindi $a = \sqrt[3]{61\,504} \approx 39{,}5$ UA. Sono proprio i dati di Plutone.

Controllo. Cerere sta fra Marte (1,88 anni) e Giove (11,86 anni) e il suo periodo è compreso fra i loro: il risultato è ragionevole. Con la calcolatrice, la radice cubica si ottiene come potenza con esponente 1/3.

COLLEGAMENTI

Storia della scienza · Perché i pianeti seguono le leggi di Keplero. Le leggi di Keplero descrivono *come* si muovono i pianeti, non *perché*. La risposta arrivò nel 1687 con i *Principia* di Isaac Newton. Secondo la **legge di gravitazione universale** due corpi qualsiasi si attraggono con una forza che cresce con le loro masse e diminuisce con la distanza: raddoppiando la distanza, la forza diventa quattro volte più debole. Fra oggetti comuni questa attrazione è impercettibile; quella di corpi enormi come la Terra o il Sole è decisiva. Newton capì che la forza che fa cadere una mela è la stessa che tiene la Luna in orbita: la Luna «cade» continuamente verso la Terra, ma ha anche una velocità laterale, e ne risulta un'orbita chiusa. Dalla sua legge Newton ricavò tutte e tre le leggi di Keplero; la stessa forza spiega il peso (Capitolo 1) e le maree (Capitolo 11). La legge in forma matematica la incontrerai più avanti negli studi; il titolo latino dell'opera, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, ricorda che allora la scienza della natura si chiamava ancora «filosofia naturale».

IN SINTESI

I legge di Keplero: orbite ellittiche, con il Sole in uno dei fuochi.

II legge: il raggio Sole–pianeta descrive aree uguali in tempi uguali; velocità massima al perielio, minima all'afelio.

III legge: T^2/a^3 = costante; con T in anni e a in UA, $T^2 = a^3$.

9.4 I pianeti

9.4.1 Che cos'è un pianeta

Nel 2006 l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ha stabilito che un **pianeta** è un corpo celeste che (1) orbita intorno al Sole, (2) ha una massa sufficiente perché la propria gravità gli dia una forma quasi sferica, (3) ha «ripulito» le vicinanze della sua orbita, cioè domina la sua zona. I corpi che soddisfano solo le prime due condizioni, e non sono satelliti, sono *pianeti nani* (paragrafo 9.5). I pianeti sono quindi otto.

I pianeti non brillano di luce propria, ma riflettono quella del Sole. Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno sono visibili a occhio nudo e noti fin dall'antichità; Urano e Nettuno sono stati scoperti con il telescopio.

9.4.2 Pianeti terrestri e pianeti gioviani

Gli otto pianeti formano due famiglie (Tabella 9.2 e Figura 9.6). I **pianeti terrestri** (Mercurio, Venere, Terra, Marte) sono piccoli, densi, fatti di rocce silicatiche con un nucleo ricco di ferro. I **pianeti gioviani** (Giove, Saturno, Urano, Nettuno) sono grandi, poco densi e privi di superficie

solida: Giove e Saturno sono *giganti gassosi* di idrogeno ed elio; Urano e Nettuno sono *giganti ghiacciati*, ricchi di acqua, ammoniaca e metano intorno a un nucleo roccioso.

Tabella 9.2 Confronto fra pianeti terrestri e gioviani. I valori numerici sono nella Tabella C.1 in appendice.

Caratteristica	Pianeti terrestri	Pianeti gioviani
Distanza dal Sole	da 0,4 a 1,5 UA	da 5 a 30 UA
Diametro	da circa 4900 a 12 800 km	da circa 49 500 a 143 000 km
Densità media	alta: 3,9–5,5 g/cm^3	bassa: 0,7–1,6 g/cm^3
Composizione	rocce silicatiche e metalli	idrogeno ed elio; acqua, ammoniaca, metano
Superficie	solida	assente: il gas diventa gradualmente fluido
Rotazione	lenta (da circa 1 giorno a 243 giorni)	rapida (da circa 10 a 17 ore)
Satelliti e anelli	pochi satelliti o nessuno; niente anelli	numerosi satelliti; sistemi di anelli

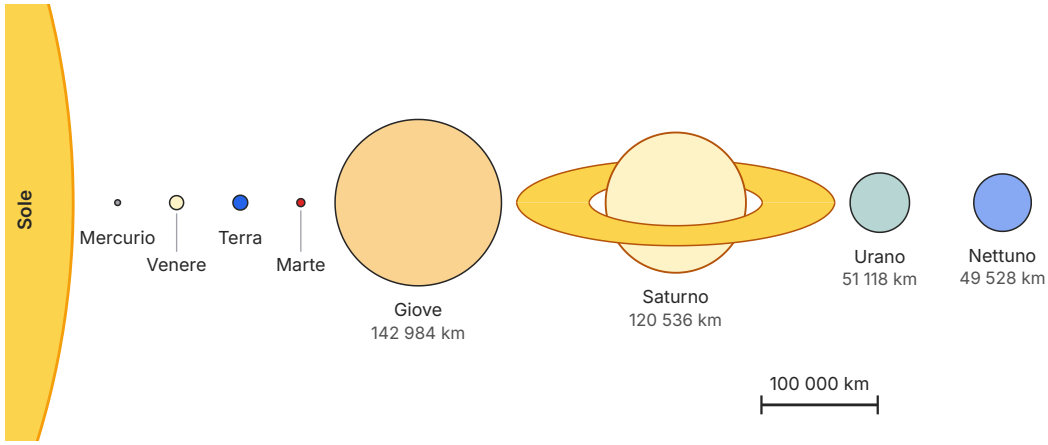


Figura 9.6 Il Sole e i pianeti con le dimensioni in scala (diametri equatoriali della Tabella C.1; per Saturno sono disegnati gli anelli principali, fino a circa 137 000 km dal centro). Le distanze fra i pianeti non sono in scala: in questa scala la Terra disterebbe dal Sole circa 150 volte la larghezza della figura.

La divisione è proprio quella prevista dall'ipotesi della nebulosa, con la linea della neve a fare da confine.

ESEMPIO SVOLTO

Un Sistema solare in scala

Problema. Vogliamo costruire nel cortile della scuola un modello in cui il Sole è una palla di 1,0 m di diametro. Il diametro reale del Sole è 1 392 700 km. Quanto devono essere grandi la Terra (diametro 12 756 km) e Giove (142 984 km), e a che distanza dal Sole vanno collocati (1,00 UA e 5,20 UA)?

Soluzione. Il fattore di riduzione è 1 392 700 km : 1,0 m, cioè 1 m ogni $1{,}39 \times 10^6$ km. Applichiamolo a ogni misura (1 UA = $1{,}496 \times 10^8$ km):

- Terra: 12 756 / 1 392 700 = 0,0092 m ≈ **9 mm**, come un pisello;
- Giove: 142 984 / 1 392 700 = 0,103 m ≈ **10 cm**, come un pompelmo;
- distanza della Terra: $1{,}496 \times 10^8$ / $1{,}3927 \times 10^6$ = 107,4 m ≈ **107 m**;
- distanza di Giove: 5,20 × 107,4 m ≈ **559 m**.

Commento. Nettuno andrebbe posto a circa 3,2 km. Con il Sole grande come un pallone da ginnastica, il modello non entra in nessun cortile: il Sistema solare è quasi tutto vuoto.

9.4.3 I pianeti uno per uno

Mercurio. È il pianeta più piccolo e il più vicino al Sole. Senza una vera atmosfera, ha una superficie piena di crateri, simile a quella della Luna. Ruota lentamente, perciò le escursioni termiche sono estreme: oltre 400 °C di giorno, circa −170 °C di notte. Lo studia la sonda europeo-giapponese BepiColombo, intitolata allo scienziato padovano Giuseppe Colombo.

Venere. Ha dimensioni e massa simili a quelle della Terra, ma è un mondo infernale: l'atmosfera è formata per il 96 % da diossido di carbonio, al suolo la pressione è oltre 90 volte quella terrestre e nubi di acido solforico nascondono la superficie. Il forte effetto serra (vedi Capitolo 13) porta la temperatura a circa 460 °C: Venere è il pianeta più caldo, più di Mercurio. Dopo la Luna è l'oggetto più luminoso del cielo notturno, la «stella del mattino» o «della sera».

Terra. È il più grande e il più denso dei pianeti terrestri, l'unico conosciuto con acqua liquida stabile in superficie e con la vita. Le sue caratteristiche e i suoi moti sono l'argomento dei Capitoli 10 e 11.

Marte. Il «pianeta rosso» deve il colore agli ossidi di ferro della superficie. Ha un diametro circa metà di quello terrestre e un'atmosfera sottile di diossido di carbonio, con una pressione inferiore all'1 % di quella terrestre. La giornata dura 24 h 37 min e l'asse è inclinato quasi come quello terrestre, perciò ha le stagioni; ai poli ha calotte di ghiaccio d'acqua e di CO_2. Letti di fiumi prosciugati mostrano che in passato vi scorreva acqua liquida: i rover vi cercano tracce di vita antica.

Giove. Ha un diametro 11 volte quello terrestre e una massa 318 volte maggiore, più del doppio di quella di tutti gli altri pianeti insieme. L'atmosfera di idrogeno ed elio è divisa in bande colorate; la Grande Macchia Rossa è una tempesta più grande della Terra, osservata da quasi

due secoli. Fra i satelliti galileiani spiccano Io, il corpo più vulcanicamente attivo del Sistema solare, Europa, con un oceano salato sotto una crosta di ghiaccio, e Ganimede, il satellite più grande del Sistema solare, più grande di Mercurio.

Saturno. È famoso per il suo sistema di anelli, formati da innumerevoli frammenti di ghiaccio d'acqua, da granelli a blocchi di qualche metro. Con una densità di 0,69 g/cm^3 è l'unico pianeta meno denso dell'acqua. Titano, il suo satellite maggiore, ha un'atmosfera densa di azoto e laghi di metano ed etano liquidi.

Urano. Scoperto nel 1781 da William Herschel, fu il primo pianeta trovato con il telescopio. Il metano dell'atmosfera gli dà un colore azzurro-verde. Il suo asse è inclinato di circa 98°: Urano «rotola» lungo l'orbita, e ciascun polo resta per decenni al Sole e poi per decenni al buio.

Nettuno. È il pianeta più lontano, a 30 UA, e impiega quasi 165 anni per un'orbita. Di colore blu intenso, ha i venti più veloci del Sistema solare, oltre 2000 km/h. Fu scoperto nel 1846 «con carta e penna»: il francese Urbain Le Verrier, studiando le irregolarità del moto di Urano, calcolò con la legge di Newton dove doveva trovarsi un pianeta perturbatore, e il tedesco Johann Galle lo trovò a meno di un grado dalla posizione prevista.

9.5 I corpi minori

9.5.1 I pianeti nani e il caso di Plutone

Plutone fu scoperto nel 1930 dallo statunitense Clyde Tombaugh e per 76 anni fu considerato il nono pianeta. È però piccolo (diametro di circa 2380 km, meno della Luna) e ha un'orbita eccentrica e inclinata di 17°: per circa vent'anni di ogni giro è più vicino al Sole di Nettuno (Figura 9.1b). Dagli anni Novanta si scoprirono nella stessa zona molti altri corpi ghiacciati, e nel 2005 Eris, simile a Plutone per dimensioni e di massa maggiore: o si accettavano decine di nuovi pianeti, o occorreva una definizione.

Nell'agosto 2006 l'IAU scelse la seconda strada: Plutone, che condivide la sua zona orbitale con migliaia di corpi della fascia di Kuiper, divenne un **pianeta nano**. Oggi l'IAU riconosce come pianeti nani Cerere, Plutone, Eris, Haumea e Makemake, ma altri potrebbero aggiungersi. È il modo in cui la scienza aggiorna le proprie categorie quando arrivano dati nuovi. Nel 2015 la sonda New Horizons ha sorvolato Plutone, rivelando montagne di ghiaccio d'acqua e pianure di azoto ghiacciato.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> «Plutone non è più un pianeta perché è troppo piccolo». Non è la dimensione il criterio decisivo: anche Mercurio è piccolo. Plutone è un pianeta nano perché *non domina la propria zona orbitale*, che condivide con moltissimi altri corpi della fascia di Kuiper. Allo stesso modo Cerere, che è abbastanza massiccio da essere sferico, è un pianeta nano perché si trova in mezzo alla fascia degli asteroidi.

9.5.2 Asteroidi, fascia di Kuiper e nube di Oort

Gli **asteroidi** sono corpi rocciosi o metallici, spesso irregolari, da pochi metri a qualche centinaio di chilometri. La maggior parte si trova nella fascia principale degli asteroidi, fra Marte e Giove: sono planetesimi che non hanno mai formato un pianeta perché la gravità di Giove li faceva scontrare troppo velocemente per unirsi. Al contrario dei film di fantascienza, la fascia è quasi vuota, e la sua massa complessiva è molto minore di quella della Luna. Alcuni asteroidi hanno orbite che si avvicinano a quella terrestre e sono sorvegliati con attenzione.

Oltre Nettuno, fra circa 30 e 50 UA, si estende la **fascia di Kuiper**, con un numero enorme di corpi ghiacciati, residui della parte esterna del disco protoplanetario; il primo dopo Plutone e Caronte fu scoperto nel 1992. Da qui provengono molte comete di *corto periodo* (meno di 200 anni).

Più lontano, Jan Oort ipotizzò nel 1950 la **nube di Oort**, un immenso guscio sferico di nuclei cometari esteso forse da qualche migliaio a decine di migliaia di UA. Non è mai stata osservata direttamente: la si deduce dalle comete di *lungo periodo*, che arrivano da ogni direzione del cielo.

> **APPROFONDIMENTO**
>
> **Giuseppe Piazzi e la notte di Capodanno del 1801**
>
> La sera del 1° gennaio 1801, dall'Osservatorio di Palermo, l'astronomo Giuseppe Piazzi notò un debole puntino che nelle notti successive si spostava fra le stelle. Lo seguì per settimane, poi lo perse; il matematico tedesco Carl Friedrich Gauss inventò un nuovo metodo per calcolarne l'orbita da poche osservazioni e permise di ritrovarlo alla fine dell'anno. Piazzi lo chiamò Cerere, dalla dea protettrice della Sicilia. Con un diametro di circa 940 km, Cerere fu il primo asteroide scoperto e dal 2006 è un pianeta nano.

9.5.3 Le comete

Una **cometa** è un piccolo corpo ghiacciato che percorre un'orbita molto allungata intorno al Sole. La sua parte solida, il nucleo, misura in genere da qualche centinaio di metri a qualche decina di chilometri: è un miscuglio di ghiacci (d'acqua, di diossido e di monossido di carbonio) e di polveri, scuro come il carbone. Per la sua composizione è stato chiamato «palla di neve sporca».

Lontana dal Sole, la cometa è solo un nucleo freddo e invisibile. A qualche UA dal Sole il calore fa *sublimare* i ghiacci (vedi Capitolo 2) e il gas, uscendo, trascina la polvere: intorno al nucleo si forma la chioma, da cui si sviluppano le code, lunghe anche decine di milioni di chilometri (Figura 9.7). Le code sono due:

- la **coda di ioni** (o di gas), azzurrina, rettilinea e sottile: è formata da gas ionizzato che il vento solare spinge via a grande velocità, per cui punta sempre in verso (quasi esattamente)

opposto al Sole;

- la **coda di polveri**, giallo-bianca, più larga e incurvata: i granelli sono spinti più lentamente dalla pressione della luce solare e restano un po' indietro lungo l'orbita.

Per questo, quando la cometa si allontana dal Sole, le code la *precedono*: non indicano la direzione del moto, ma la direzione del Sole.

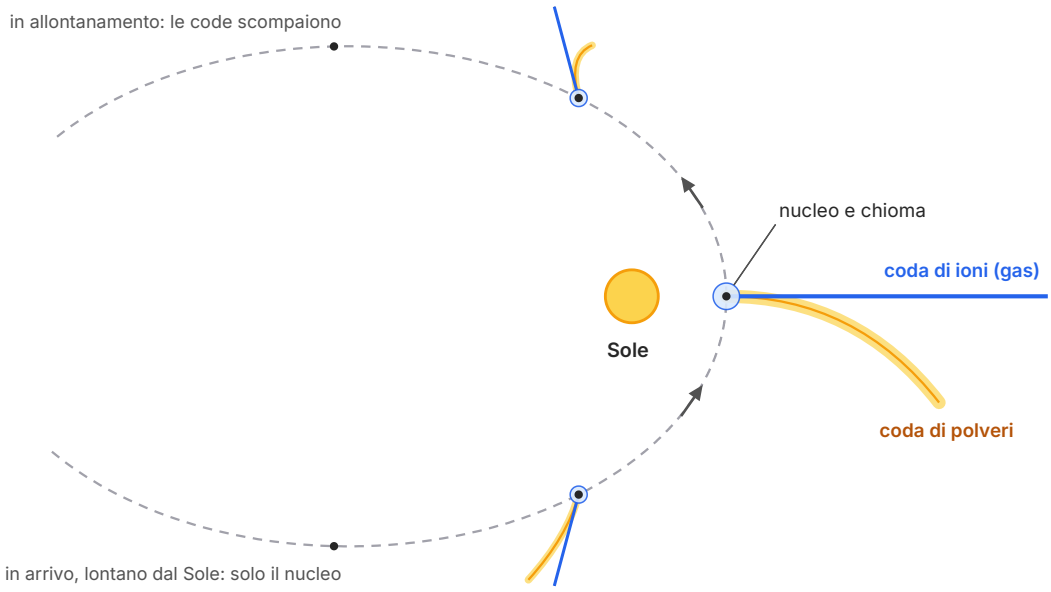


Figura 9.7 Una cometa lungo la sua orbita (schema non in scala). Lontano dal Sole è un nucleo inattivo; vicino al Sole sviluppa la chioma, la coda di ioni (blu, dritta, esattamente opposta al Sole) e la coda di polveri (gialla, incurvata e rivolta all'indietro rispetto al moto). Le frecce indicano il verso del moto: in allontanamento le code precedono la cometa.

La cometa più famosa è quella di Halley, che torna ogni 76 anni circa: nel 1705 Edmond Halley, con la legge di Newton, capì che le comete del 1531, 1607 e 1682 erano un unico oggetto e ne previde il ritorno per il 1758, puntualmente avvenuto quando era già morto. L'ultimo passaggio è del 1986, il prossimo è previsto nel 2061. Nel 2014 la sonda europea Rosetta si è messa in orbita intorno alla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko e vi ha fatto scendere il lander Philae.

9.5.4 Meteoroidi, meteore e meteoriti

Lo spazio fra i pianeti è attraversato da frammenti di roccia e metallo staccati da asteroidi o lasciati dalle comete: i **meteoroidi**. Quando un meteoroide entra nell'atmosfera a 11–72 km/s, l'attrito lo riscalda fino a vaporizzarlo e l'aria lungo la traiettoria si illumina, di solito fra 80 e 120

km di quota: è una **meteora**, la «stella cadente», prodotta in genere da granelli più piccoli di un chicco di riso. I frammenti più grandi che raggiungono il suolo sono i **meteoriti**, rocciosi, ferrosi o misti.

Quando la Terra attraversa la scia di detriti lasciata da una cometa, si osserva uno *sciame meteorico*: decine di meteore all'ora che sembrano provenire tutte dallo stesso punto del cielo. Il più celebre in Italia è quello delle Perseidi, le «lacrime di San Lorenzo», visibile intorno alla metà di agosto, prodotto dai detriti della cometa Swift-Tuttle.

I corpi più grandi lasciano crateri, come il Meteor Crater in Arizona, largo circa 1,2 km. Circa 66 milioni di anni fa un asteroide di una decina di chilometri cadde nell'attuale Yucatán, in Messico (cratere di Chicxulub), e contribuì all'estinzione dei dinosauri non aviani. Il 15 febbraio 2013 un asteroide di circa 20 m è esploso nell'atmosfera sopra la città russa di Čeljabinsk: l'onda d'urto ha rotto migliaia di finestre e ferito più di mille persone.

ERRORE FREQUENTE

Tre parole simili, tre cose diverse. Il **meteoroide** è il corpo nello spazio; la **meteora** è il fenomeno luminoso nell'atmosfera (non è un oggetto e non è una stella); il **meteorite** è ciò che resta e si raccoglie al suolo. E le «stelle cadenti» non sono stelle: una stella vera è una sfera di gas molto più grande della Terra.

COLLEGAMENTI

Storia e cittadinanza. Nell'*Adorazione dei Magi* della Cappella degli Scrovegni a Padova Giotto dipinse la stella di Betlemme come una cometa: secondo un'interpretazione diffusa si ispirò al passaggio della cometa di Halley del 1301, e per questo la sonda europea che nel 1986 attraversò la chioma della Halley fu chiamata Giotto. Oggi gli asteroidi sono anche una questione di sicurezza: il 26 settembre 2022 la sonda NASA DART si è schiantata contro il piccolo asteroide Dimorfo, accorciandone il periodo orbitale di circa mezz'ora. Questo primo test di *difesa planetaria* è stato documentato dal minisatellite italiano LICIACube.

9.6 Esplorare il Sistema solare e cercare altri mondi

9.6.1 Le sonde spaziali

Dal lancio del primo satellite artificiale, lo Sputnik 1 nel 1957, abbiamo inviato sonde verso tutti i pianeti e verso asteroidi e comete. Le sonde di *sorvolo* passano vicino a un corpo e proseguono; gli *orbiter* gli girano intorno per anni; *lander* e *rover* scendono sulla superficie. Alcune missioni hanno riportato a Terra campioni di asteroidi.

Le due sonde Voyager, lanciate nel 1977, hanno sorvolato i pianeti giganti; nel 2012 la Voyager 1 ha superato l'*eliopausa*, il confine oltre il quale il vento solare non domina più, a circa 120

UA dal Sole, ed è l'oggetto costruito dall'uomo più lontano. La sonda Cassini ha studiato Saturno fino al 2017, e il suo modulo Huygens nel 2005 è sceso su Titano. L'Italia, con l'Agenzia Spaziale Italiana, partecipa a molte di queste missioni con strumenti, antenne e scienziati.

9.6.2 Gli esopianeti

Il Sole non è l'unica stella con pianeti. Un **esopianeta** (o pianeta extrasolare) è un pianeta che orbita intorno a una stella diversa dal Sole. Il primo intorno a una stella simile al Sole, 51 Pegasi b, fu scoperto nel 1995 dagli svizzeri Michel Mayor e Didier Queloz, premiati con il Nobel per la fisica nel 2019. Oggi se ne conoscono migliaia, e il loro numero cresce ogni anno.

Gli esopianeti si scoprono quasi sempre in modo indiretto. Con il *metodo dei transiti* si misura la piccola diminuzione periodica della luce della stella quando il pianeta le passa davanti. Con il *metodo delle velocità radiali* si osserva che la stella, attratta dal pianeta, oscilla: le righe del suo spettro si spostano un po' verso il blu e un po' verso il rosso (vedi Capitolo 8).

Gli astronomi cercano soprattutto pianeti rocciosi nella zona abitabile della loro stella, cioè alla distanza a cui potrebbe esistere acqua liquida in superficie, e studiano lo spettro della luce che attraversa le loro atmosfere alla ricerca di gas come vapore acqueo, ossigeno o metano. Finora non è stata trovata alcuna prova di vita fuori dalla Terra.

SINTESI

- Il Sistema solare si è formato circa 4,6 miliardi di anni fa dalla contrazione di una nebulosa di gas e polveri, che si è appiattita in un disco protoplanetario; al centro è nato il Sole, nel disco i pianeti per accrescimento di planetesimi.
- Oltre la linea della neve i ghiacci erano solidi: per questo i pianeti rocciosi sono vicini al Sole e i giganti lontani.
- Il Sole contiene il 99,86 % della massa del Sistema solare. Dall'interno: nucleo, zona radiativa, zona convettiva, fotosfera (≈ 5800 K), cromosfera, corona (oltre un milione di kelvin).
- L'energia del Sole viene dalla fusione nucleare dell'idrogeno in elio nel nucleo; una piccola parte della massa si trasforma in energia.
- Macchie, protuberanze, brillamenti e vento solare sono manifestazioni dell'attività solare, che segue un ciclo di circa 11 anni; il vento solare produce le aurore.
- Il modello geocentrico di Tolomeo usava epicicli e deferenti; il modello eliocentrico di Copernico (1543) spiega in modo semplice il moto retrogrado.
- Le osservazioni di Galileo (1610), in particolare le fasi di Venere, furono decisive contro il modello tolemaico.
- Leggi di Keplero: orbite ellittiche con il Sole in un fuoco; aree uguali in tempi uguali; $T^2 = a^3$ con T in anni e a in UA.
- Newton (1687): i corpi si attraggono con una forza di gravità che cresce con le masse e diminuisce con la distanza; questa forza spiega le leggi di Keplero, il peso e le maree.
- I pianeti terrestri sono piccoli, densi e rocciosi; i pianeti gioviani sono grandi, poco densi, gassosi o ghiacciati, con anelli e molti satelliti.
- I corpi minori comprendono pianeti nani (Plutone dal 2006, Cerere, Eris…), asteroidi, oggetti della fascia di Kuiper e comete, che provengono dalla fascia di Kuiper e dalla nube di Oort.
- Le code delle comete puntano in verso opposto al Sole; meteoroide, meteora e meteorite sono tre cose diverse. Intorno ad altre stelle si conoscono migliaia di esopianeti.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● L'energia del Sole proviene:
   - **A.** dalla fusione di nuclei di idrogeno in nuclei di elio
   - **B.** dalla combustione dell'idrogeno con l'ossigeno
   - **C.** dalla fissione di nuclei di uranio
   - **D.** dal calore accumulato al momento della formazione

2. ● Lo strato del Sole da cui proviene quasi tutta la luce che vediamo è:

   A. il nucleo
   B. la corona
   C. la fotosfera
   D. la zona radiativa

3. ● Le macchie solari appaiono scure perché:

   A. sono buchi nella superficie del Sole
   B. sono più fredde della fotosfera che le circonda
   C. sono nubi di polvere sospese sopra la fotosfera
   D. sono le ombre dei pianeti interni

4. ●● Quale osservazione di Galileo era incompatibile con la disposizione dei pianeti prevista dal modello di Tolomeo?

   A. Le montagne sulla Luna
   B. Le stelle della Via Lattea
   C. Le macchie solari
   D. La serie completa delle fasi di Venere

5. ● Secondo la prima legge di Keplero, le orbite dei pianeti sono:

   A. circonferenze con il Sole al centro
   B. ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi
   C. ellissi con il Sole al centro
   D. epicicli che ruotano su deferenti

6. ● Per la seconda legge di Keplero, un pianeta si muove più velocemente:

   A. al perielio
   B. all'afelio
   C. quando si trova alla distanza media
   D. sempre alla stessa velocità

7. ●● Se la distanza fra due corpi raddoppia, la forza di gravità fra di loro:

   A. raddoppia
   B. si dimezza
   C. non cambia
   D. diventa un quarto

8. ● Quale insieme di caratteristiche è tipico dei pianeti gioviani?

   A. Piccole dimensioni, alta densità, superficie rocciosa
   B. Rotazione lenta e assenza di atmosfera
   C. Grandi dimensioni, bassa densità, anelli e molti satelliti
   D. Orbite interne alla fascia degli asteroidi

9. ●● Plutone è classificato come pianeta nano perché:
   A. è più piccolo della Luna
   B. non ha ripulito le vicinanze della sua orbita
   C. non orbita intorno al Sole
   D. non ha una forma quasi sferica

10. ● La coda di ioni di una cometa è rivolta:
    A. sempre in verso opposto al Sole
    B. nella direzione in cui si muove la cometa
    C. sempre verso il Sole
    D. verso la Terra

Vero o falso

11. ● La corona solare è più fredda della fotosfera.

12. ● Il numero di macchie solari varia con un ciclo di circa 11 anni.

13. ● Copernico dimostrò con il cannocchiale che la Terra gira intorno al Sole.

14. ●● La terza legge di Keplero vale anche per gli asteroidi e le comete che orbitano intorno al Sole.

15. ●● Venere è il pianeta più caldo perché è il più vicino al Sole.

16. ● Una meteora è un frammento di roccia caduto al suolo dallo spazio.

Applicare e calcolare

17. ● L'asteroide Vesta ha un'orbita con semiasse maggiore di 2,36 UA. Calcola il suo periodo di rivoluzione in anni.

18. ● Quanto tempo impiega la luce del Sole a raggiungere Giove, che dista in media 5,20 UA? Esprimi il risultato in minuti (1 UA = $1{,}496 \times 10^8$ km; $c = 3{,}00 \times 10^5$ km/s).

19. ●● La cometa di Halley ha un periodo di circa 76 anni e al perielio dista 0,59 UA dal Sole. Calcola il semiasse maggiore della sua orbita e la distanza all'afelio (ricorda che perielio + afelio = $2a$). Oltre l'orbita di quale pianeta arriva la cometa?

20. ●● In un modello in scala il Sole è una sfera di 1,0 m di diametro (diametro reale 1 392 700 km). Quanto devono misurare in questo modello il diametro di Marte (6792 km) e la sua distanza dal Sole (1,524 UA)?

21. ●● Uno studente ha una massa di 60 kg. Sulla Terra l'intensità di gravità è 9,8 N/kg, su Marte 3,7 N/kg. Calcola il peso dello studente sulla Terra e su Marte. La sua massa cambia?

22. ●● Giove ha una massa 317,8 volte quella della Terra e un raggio medio di 69 911 km (Terra: 6371 km; densità media 5,51 g/cm^3). Calcola quante volte il volume di Giove è maggiore di quello della Terra e ricava la densità media di Giove. Confronta il risultato con la Tabella C.1.

23. ●●● Un asteroide impiega 8,00 anni per compiere un'orbita intorno al Sole. A quale distanza media dal Sole si trova? Si trova all'interno o all'esterno della fascia principale degli asteroidi?

24. ●●● Calcola la velocità orbitale media della Terra, supponendo l'orbita circolare con raggio $1{,}496 \times 10^8$ km e periodo 365,26 d. Con lo stesso ragionamento, quanto vale la velocità media di Nettuno (a = 30,07 UA, T = 164,8 anni)?

Leggere dati e figure

25. ● Usando la Tabella C.1 in appendice, ordina i pianeti per densità crescente. Quale pianeta galleggerebbe, in teoria, in un'enorme vasca d'acqua? Quale proprietà distingue nettamente i due gruppi di pianeti?

26. ●● Nella Figura 9.5a leggi il valore approssimato di T^2 per Marte e ricava il periodo di Marte. Confronta il risultato con la Tabella 9.1.

27. ●● Nella Figura 9.1b stima, con la scala grafica, la distanza minima e la distanza massima di Plutone dal Sole. In quale tratto della sua orbita Plutone è più vicino al Sole di Nettuno?

28. ●● Osserva la Figura 9.7. Descrivi come cambiano le code della cometa nelle cinque posizioni disegnate e spiega perché, quando la cometa si allontana dal Sole, le code la precedono.

29. ● Usando i dati della Figura 9.6, calcola quante Terre allineate occorrono per coprire il diametro di Giove e quante per coprire il diametro del Sole (1 392 700 km).

Indagare e argomentare

30. ●● Spiega, aiutandoti con la Figura 9.3, perché la serie completa delle fasi di Venere osservata da Galileo era una prova contro il modello di Tolomeo e a favore di un modello in cui Venere gira intorno al Sole.

31. ●● Una compagna afferma: «Il Sole è un enorme fuoco di idrogeno: prima o poi finirà l'ossigeno e si spegnerà». Correggi l'affermazione con un ragionamento scientifico.

32. ●●● Una forte tempesta solare potrebbe avere conseguenze sulla vita quotidiana. Spiega quali tecnologie potrebbero risentirne e perché è utile sorvegliare il Sole ogni giorno (collegamento con l'educazione civica).

33. ●●● Progetta un'esperienza per misurare il periodo di rotazione del Sole osservando le macchie solari per due settimane, senza mai guardare il Sole direttamente. Indica gli strumenti, le misure da registrare, come ricavare il periodo e le principali fonti di errore.

PER APPROFONDIRE

- [SAG] C. Sagan, *Cosmos*: i capitoli su Keplero e sui pianeti raccontano la nascita dell'astronomia moderna e l'esplorazione del Sistema solare con le sonde Voyager.
- [HAW] S. Hawking, *Dal big bang ai buchi neri*: il primo capitolo ripercorre l'evoluzione dei modelli dell'Universo da Aristotele e Tolomeo fino a Newton.
- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: le pagine sull'origine del Sistema solare e sulla differenziazione dei pianeti rocciosi.

Glossario del capitolo

Cometa
Piccolo corpo ghiacciato su un'orbita molto allungata; vicino al Sole sviluppa chioma e due code rivolte in verso opposto al Sole.

Corona
Atmosfera esterna del Sole, molto rarefatta ed estesa, con temperature superiori al milione di kelvin.

Epiciclo
Nel modello di Tolomeo, piccolo cerchio percorso da un pianeta, il cui centro si muove lungo un cerchio maggiore (deferente) intorno alla Terra.

Esopianeta
Pianeta che orbita intorno a una stella diversa dal Sole; il primo intorno a una stella simile al Sole fu scoperto nel 1995.

Fotosfera
Strato del Sole da cui proviene quasi tutta la luce visibile; temperatura di circa 5800 K.

Fusione nucleare
Reazione in cui nuclei leggeri si uniscono formando nuclei più pesanti; nel Sole quattro nuclei di idrogeno formano un nucleo di elio liberando energia.

Ipotesi della nebulosa
Modello secondo cui il Sistema solare si è formato circa 4,6 miliardi di anni fa dalla contrazione di una nube di gas e polveri, appiattitasi in un disco in rotazione.

Legge di gravitazione universale
Due corpi si attraggono con una forza proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza (Newton, 1687).

Leggi di Keplero
Le tre leggi del moto dei pianeti: orbite ellittiche con il Sole in un fuoco; aree uguali in tempi uguali; T^2 proporzionale ad a^3.

Linea della neve
Distanza dal giovane Sole oltre la quale acqua, metano e ammoniaca erano solidi; separa la zona dei pianeti rocciosi da quella dei giganti.

Macchie solari
Regioni della fotosfera più fredde (circa 3800 K) e quindi più scure, dovute a campi magnetici intensi; il loro numero varia con un ciclo di circa 11 anni.

Meteoroide, meteora, meteorite
Il frammento nello spazio, il fenomeno luminoso che produce entrando nell'atmosfera, il residuo che raggiunge il suolo.

Modello eliocentrico
Modello, proposto da Copernico nel 1543, in cui il Sole è al centro e la Terra è un pianeta che ruota su se stesso e gli gira intorno.

Perielio e afelio
Rispettivamente il punto dell'orbita di un corpo più vicino e più lontano dal Sole.

Pianeta nano
Corpo che orbita intorno al Sole e ha forma quasi sferica, ma non ha ripulito la propria zona orbitale e non è un satellite (es. Plutone, Cerere, Eris).

Pianeti gioviani
Giove, Saturno, Urano e Nettuno: grandi, poco densi, senza superficie solida, con anelli e numerosi satelliti.

Pianeti terrestri
Mercurio, Venere, Terra e Marte: piccoli, densi, con superficie rocciosa e nucleo metallico.

Planetesimi
Corpi solidi di dimensioni chilometriche formati nel disco protoplanetario, che per accrescimento hanno dato origine ai pianeti; i residui sono asteroidi e comete.

Sistema solare
L'insieme del Sole e dei corpi legati a esso dalla gravità: pianeti, satelliti, pianeti nani, asteroidi, comete, meteoroidi, gas e polveri.

Vento solare
Flusso continuo di particelle cariche emesse dalla corona solare; interagendo con il campo magnetico terrestre produce le aurore.

Soluzioni

1. A. Nel nucleo nuclei di idrogeno si fondono in nuclei di elio; la massa che manca si trasforma in energia. Non è una combustione.

2. C. La fotosfera, la «superficie» visibile a circa 5800 K, emette quasi tutta la luce solare.

3. B. Le macchie (≈ 3800 K) sono più fredde della fotosfera circostante (≈ 5800 K) e appaiono scure solo per contrasto.

4. D. Nel modello tolemaico Venere resta sempre fra la Terra e il Sole e non potrebbe mai apparire piena; la serie completa delle fasi richiede che Venere giri intorno al Sole.

5. B. Prima legge di Keplero: orbite ellittiche con il Sole in uno dei due fuochi.

6. A. Al perielio il pianeta è più vicino al Sole e, per descrivere aree uguali in tempi uguali, deve percorrere archi più lunghi.

7. D. La forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza: $2^2 = 4$, quindi diventa un quarto.

8. C. I gioviani sono grandi, poco densi, senza superficie solida, con anelli e numerosi satelliti.

9. B. Secondo la definizione IAU del 2006 Plutone non ha ripulito la sua zona orbitale, che condivide con molti corpi della fascia di Kuiper.

10. A. Il gas ionizzato è spinto dal vento solare: la coda di ioni punta sempre in verso opposto al Sole, qualunque sia la direzione del moto.

11. F. La corona supera il milione di kelvin, mentre la fotosfera è a circa 5800 K.

12. V. Il ciclo solare ha una durata media di circa 11 anni.

13. F. Copernico pubblicò il suo modello nel 1543, prima dell'invenzione del cannocchiale, sulla base di argomenti geometrici; le prime prove osservative con il cannocchiale furono di Galileo, dal 1609–1610.

14. V. La terza legge vale per tutti i corpi che orbitano intorno al Sole, perché il rapporto T^2/a^3 dipende solo dalla massa del Sole.

15. F. Venere è il pianeta più caldo (≈ 460 °C), ma a causa del fortissimo effetto serra della sua densa atmosfera di CO_2; il pianeta più vicino al Sole è Mercurio.

16. F. La meteora è il fenomeno luminoso prodotto nell'atmosfera; il frammento che raggiunge il suolo è un meteorite.

17. $T = \sqrt{(a^3)} = \sqrt{(2{,}36^3)} = \sqrt{13{,}14} = 3{,}63$ anni.

18. $d = 5{,}20 \times 1{,}496 \times 10^8$ km $= 7{,}78 \times 10^8$ km; $t = d/c = 7{,}78 \times 10^8 / 3{,}00 \times 10^5 = 2{,}59 \times 10^3$ s ≈ 43,2 min.

19. $a^3 = 76^2 = 5776$, quindi $a = \sqrt[3]{5776} \approx 17{,}9$ UA. Afelio $= 2a$ − perielio $= 2 \times 17{,}94 - 0{,}59 \approx 35{,}3$ UA: la cometa si spinge oltre l'orbita di Nettuno (30,07 UA), fino alla fascia di Kuiper.

20. Fattore di scala: 1,0 m ogni 1 392 700 km. Diametro di Marte: 6792 / 1 392 700 m = 0,0049 m ≈ 4,9 mm. Distanza: $1{,}524 \times 1{,}496 \times 10^8$ km $= 2{,}280 \times 10^8$ km → $2{,}280 \times 10^8 / 1\,392\,700 \approx 164$ m ($\approx 1{,}6 \times 10^2$ m).

21. Terra: $P = m \cdot g = 60$ kg $\times$ 9,8 N/kg $\approx 5{,}9 \times 10^2$ N (588 N). Marte: 60 kg × 3,7 N/kg $\approx 2{,}2 \times 10^2$ N (222 N). La massa resta 60 kg: cambia solo il peso, che è una forza.

22. Rapporto dei raggi: 69 911 / 6371 = 10,97; rapporto dei volumi: $10{,}97^3 \approx 1321$. Densità = 5,51 g/cm^3 × 317,8 / 1321 ≈ 1,33 g/cm^3, in accordo con la Tabella C.1. Giove ha una massa 318 volte maggiore ma un volume 1321 volte maggiore: per questo è molto meno denso della Terra.

23. $a^3 = T^2 = 8{,}00^2 = 64{,}0$, quindi $a = \sqrt[3]{64{,}0} = 4{,}00$ UA. È all'esterno della fascia principale (2,1–3,3 UA), fra la fascia e l'orbita di Giove (5,20 UA).

24. Terra: $v = 2\pi r/T = 2\pi \times 1{,}496 \times 10^8$ km / (365,26 × 86 400 s) = $9{,}400 \times 10^8$ km / $3{,}156 \times 10^7$ s ≈ 29,8 km/s. Nettuno: l'orbita è 30,07 volte più lunga e il periodo 164,8 volte più lungo, quindi v = 29,8 × 30,07 / 164,8 ≈ 5,43 km/s. I pianeti lontani sono più lenti.

25. Saturno (0,69) < Urano (1,27) < Giove (1,33) < Nettuno (1,64) < Marte (3,93) < Venere (5,24) < Mercurio (5,43) < Terra (5,51) g/cm^3. Galleggerebbe Saturno, l'unico meno denso dell'acqua. I gioviani hanno tutti densità inferiori a 2 g/cm^3, i terrestri superiori a 3,9 g/cm^3.

26. Dal grafico $T^2 \approx 3{,}5$ anni^2, quindi $T \approx \sqrt{3{,}5} \approx 1{,}9$ anni; la Tabella 9.1 dà 1,88 anni ($T^2 = 3{,}534$), in accordo entro l'incertezza della lettura.

27. Con la scala di 10 UA si stima una distanza minima di circa 30 UA e una massima di circa 49 UA (i valori reali sono 29,7 e 49,3 UA). Plutone è più vicino al Sole di Nettuno nel breve tratto intorno al perielio (in basso a sinistra nella figura), dove la sua orbita tratteggiata passa all'interno di quella di Nettuno.

28. Lontano dal Sole la cometa è solo un nucleo, senza chioma né code; avvicinandosi i ghiacci sublimano, compaiono chioma e code, che sono più lunghe vicino al perielio; allontanandosi le code si accorciano e scompaiono. In ogni posizione la coda di ioni è dritta e opposta al Sole, mentre quella di polveri è incurvata e rimane indietro lungo l'orbita. Le code sono spinte dal vento solare e dalla luce, che provengono dal Sole: perciò puntano sempre lontano dal Sole e, quando la cometa se ne allontana, si trovano davanti a essa.

29. Giove: 142 984 / 12 756 ≈ 11,2, cioè circa 11 Terre. Sole: 1 392 700 / 12 756 ≈ 109 Terre.

30. Traccia: nel modello tolemaico l'epiciclo di Venere è sempre centrato sulla linea Terra–Sole, quindi Venere sta sempre più vicina a noi del Sole e ci mostra soprattutto la sua faccia in ombra: si vedrebbero solo falci sottili o la fase «nuova», mai la fase piena. Nel modello eliocentrico Venere gira intorno al Sole e a volte si trova dalla parte opposta rispetto a noi, mostrando la faccia illuminata: appare piena e piccola (lontana), mentre quando è falcata appare grande (vicina). Galileo osservò proprio questo: il modello di Tolomeo era confutato da un'osservazione.

31. Traccia: il Sole non brucia, perché la combustione è una reazione chimica con l'ossigeno, che nel Sole non fa da comburente; inoltre una combustione esaurirebbe il combustibile in qualche migliaio di anni, mentre il Sole splende da 4,6 miliardi di anni. L'energia viene dalla fusione nucleare dell'idrogeno in elio nel nucleo, che non richiede ossigeno. Il Sole cambierà quando l'idrogeno del nucleo sarà esaurito, fra circa 5 miliardi di anni: diventerà una gigante rossa e poi una nana bianca.

32. Traccia: brillamenti ed espulsioni di plasma inviano verso la Terra radiazione e particelle cariche che disturbano il campo magnetico terrestre e l'alta atmosfera. Possono danneggiare l'elettronica dei satelliti, degradare la precisione del GPS e le comunicazioni radio, esporre gli astronauti a radiazioni e, nei casi estremi (come l'evento di Carrington del 1859), indurre correnti nelle linee elettriche lunghe e nei trasformatori. Sorvegliare il Sole permette di dare l'allarme con ore o giorni di anticipo, mettendo in sicurezza satelliti e reti: è un servizio pubblico che protegge infrastrutture da cui dipende la vita di tutti.

33. Traccia: si proietta l'immagine del Sole su un cartoncino bianco con un piccolo telescopio o un binocolo fissato su un treppiede (oppure si usa un filtro solare certificato), senza mai guardare attraverso lo strumento. Ogni giorno alla stessa ora si disegna il contorno del disco e la posizione delle macchie, con il disco sempre orientato allo stesso modo. Si misura di quanti gradi (o di quale frazione del diametro) si sposta una macchia al giorno: una macchia impiega circa 13–14 giorni ad attraversare il disco, quindi il periodo di rotazione apparente è circa il doppio, intorno a 27 giorni. Errori: orientamento del disco, macchie che cambiano forma o scompaiono, effetto prospettico vicino al bordo, giorni nuvolosi; conviene seguire più macchie e fare la media. Il periodo misurato dalla Terra è un po' più lungo di quello vero (circa 25 giorni all'equatore), perché nel frattempo la Terra si è spostata lungo l'orbita.