

Massimo Crippa Marco Fiorani

# GEOGRAFIA GENERALE

TERZA EDIZIONE



# Sommario

## ASTRONOMIA E ASTROFISICA

### sezione A

## L'universo

### unità

## Metodi e strumenti dell'indagine astronomica

1	La sfera celeste: una meravigliosa illusione	2
2	La sfera celeste come sistema di riferimento	3
2.1	Punti di riferimento sulla sfera celeste	4
2.2	Coordinate equatoriali	5
2.3	Coordinate orizzontali o altazimutali	5
<b>Scheda 1</b>	<b>Cosmologie antiche</b>	6
3	Modificazioni giornaliere e stagionali della sfera celeste	7
4	Gli strumenti dell'astronomia	8
<b>Scheda 2</b>	<b>La moderna telescopica ottica: problemi e soluzioni</b>	9
4.1	Radioastronomia e nuove metodologie	10
<b>Scheda 3</b>	<b>Telescopi spaziali: da Hubble a Planck</b>	11
<b>Scheda 4</b>	<b>L'astronomo dilettante</b>	12
4.2	L'analisi spettrale	14
■ <b>Sintesi</b>		15
■ <b>Verifiche</b>		16

### unità

## Stelle, galassie, universo

1	Lo studio delle stelle	17
1.1	Le distanze astronomiche	17
1.2	Luminosità e magnitudine delle stelle	18
1.3	Il metodo delle Cefeidi	20
1.4	Colore e temperatura di una stella	20
1.5	Classificazione spettrale delle stelle	21
1.6	La massa delle stelle	22
1.7	Il diagramma di Hertzsprung-Russell: un istante di vita delle stelle	22

1.8	Stelle particolari	23
1.9	Lo spazio interstellare	24
<b>Scheda 1</b>	<b>Effetto Doppler e redshift</b>	25
2	L'evoluzione delle stelle	25
2.1	Come nasce una stella	25
2.2	La fase di stabilità	26
2.3	Le fasi finali di vita di una stella	26
<b>Scheda 2</b>	<b>I processi di fusione nucleare che avvengono nelle stelle</b>	27
<b>Scheda 3</b>	<b>La teoria della relatività</b>	31
<b>Scheda 4</b>	<b>I buchi neri: il trionfo della gravità</b>	32
3	La Via Lattea	33
<b>Scheda 5</b>	<b>Esobiologia: la ricerca di forme di vita extraterrestri</b>	35
4	Galassie e ammassi galattici	36
4.1	Galassie attive e quasar	38
5	Origine ed evoluzione dell'universo	39
5.1	Una teoria alternativa: l'universo stazionario	40
5.2	La prova definitiva dell'espansione: la radiazione cosmica di fondo	40
<b>Scheda 6</b>	<b>Lenti gravitazionali e relatività</b>	41
5.3	Il modello inflazionario	42
6	Il futuro dell'universo	42
6.1	Materia oscura ed energia oscura	43
<b>Scheda 7</b>	<b>L'universo inflazionario</b>	44
<b>Scheda 8</b>	<b>Il paradosso di Olbers</b>	46
6.2	"La cosa più incomprensibile dell'universo è che esso sia comprensibile" (A. Einstein)	46
■ <b>Sintesi</b>		47
■ <b>Verifiche</b>		48

### unità

## Il sistema solare

1	Il sistema solare	50
1.1	Origine del sistema solare	50
2	Il Sole	51
2.1	La struttura interna del Sole	52
2.2	La parte esterna del Sole	53
<b>Scheda 1</b>	<b>Il Sole e i neutrini</b>	54
3	I pianeti del sistema solare	55
3.1	Le leggi che regolano il moto dei pianeti	55
3.2	Le caratteristiche dei pianeti	56
<b>Scheda 2</b>	<b>Le posizioni dei pianeti</b>	56

<b>Scheda 3 Il modello geocentrico</b>	58
3.3 Mercurio: un pianeta dal moto anomalo	59
3.4 Venere: il pianeta più luminoso	59
<b>Scheda 4 Il modello eliocentrico</b>	60
3.5 Marte: il pianeta rosso	61
3.6 Giove: il gigante	61
3.7 Saturno: il pianeta degli anelli	62
3.8 Urano: un pianeta perturbato	63
3.9 Nettuno: il pianeta gemello	63
<b>4 Pianeti nani, asteroidi e comete</b>	64
4.1 Plutone: da pianeta a pianeta nano	64
4.2 Gli altri pianeti nani	64
4.3 I corpi minori: asteroidi, comete, meteore e meteoriti	64
<b>Scheda 5 Apophis: impatto letale?</b>	65
<b>Scheda 6 L'esplorazione del sistema solare</b>	67
■ <b>Sintesi</b>	69
■ <b>Verifiche</b>	70

## ASTRONOMIA E ASTROFISICA

### sezione B

# La Terra nello spazio

## unità 4 Geodesia

1 La Terra: disco piatto o sfera?	72
<b>Scheda 1 Tre tipi di orizzonti</b>	74
2 La Terra non è perfettamente sferica	74
3 Come rappresentare la Terra: ellissoide e geoido	74
4 Le dimensioni della Terra	76
<b>Scheda 2 Eratostene e la lunghezza dell'equatore</b>	76
<b>Scheda 3 Cristoforo Colombo aveva ragione o torto?</b>	77
5 I sistemi di riferimento	77
5.1 Coordinate geografiche (assolute)	78

5.2 Coordinate polari (relative)	79
<b>Scheda 4 "Per tutti i tempi, per tutti gli uomini" (Condorcet)</b>	79
■ <b>Sintesi</b>	80
■ <b>Verifiche</b>	81

## unità 5

### I moti della Terra

1 Una serie complessa di movimenti	82
2 Caratteristiche del movimento di rotazione terrestre	82
3 Prove e conseguenze del moto di rotazione terrestre	83
<b>Scheda 1 La durata del giorno sidero</b>	83
3.1 Esperienza di Guglielmini	84
3.2 Esperienza di Foucault	84
3.3 Movimento apparente della sfera celeste e del Sole	85
3.4 Variazione dell'accelerazione di gravità con la latitudine	85
3.5 Legge di Ferrel (forza di Coriolis)	85
3.6 L'alternanza del dì e della notte	86
<b>Scheda 2 Tre tipi di crepuscolo: civile, nautico e astronomico</b>	86
4 Caratteristiche del movimento di rivoluzione terrestre	87
5 Prove del moto di rivoluzione terrestre	88
5.1 Aberrazione stellare annua	88
5.2 Effetto di parallasse annua ed effetto Doppler	88
<b>6 Le conseguenze del moto di rivoluzione</b>	89
6.1 Alternanza delle stagioni	89
6.2 Differente durata del dì e della notte	90
6.3 Diversa altezza del Sole	91
6.4 Esistenza delle zone astronomiche	92
6.5 Diversa durata del giorno sidero e del giorno solare	92
6.6 Moto apparente del Sole attraverso lo zodiaco	93
<b>7 I moti millenari della Terra</b>	94
7.1 Moto di precessione luni-solare	94
7.2 Altri moti millenari	95
<b>Scheda 3 L'oscillazione di Chandler</b>	95
<b>Scheda 4 Moti millenari e glaciazioni</b>	96
■ <b>Sintesi</b>	97
■ <b>Verifiche</b>	98





## unità

### La Luna

1	Caratteristiche generali della Luna	100
2	I movimenti della Luna	101
2.1	Il moto di rotazione	101
2.2	Il moto di rivoluzione	102
2.3	Il moto di traslazione	102
2.4	I moti secondari	103
<b>Scheda 1</b>	<b>La distanza Terra-Luna: non sempre uguale!</b>	104
3	Le conseguenze dei moti del sistema Terra-Luna	104
3.1	Librazioni lunari	104
3.2	Variazione della posizione della Luna sullo sfondo celeste	105
3.3	Le fasi lunari	105
3.4	Differenza tra mese lunare e mese sidereo	106
3.5	Le eclissi	106
<b>Scheda 2</b>	<b>Eclissi di Sole: va in scena lo spettacolo</b>	109
<b>Scheda 3</b>	<b>Il segreto della frequenza delle eclissi di Sole</b>	110
<b>Scheda 4</b>	<b>Il ciclo di Saros</b>	110
4	Caratteristiche geomorfologiche della Luna	111
4.1	Struttura interna della Luna	112
4.2	Origine della Luna	113
<b>Scheda 5</b>	<b>L'esplorazione lunare: dalle origini alla ricerca dell'acqua</b>	114
■ Sintesi		115
■ Verifiche		116



## unità

### L'orientamento e la misura del tempo

1	Orientarsi con gli astri	118
1.1	Orientarsi con la bussola	119
2	Come determinare le coordinate geografiche	120
2.1	Determinazione della latitudine in base all'altezza della Stella Polare	120
2.2	Determinazione della latitudine in base all'altezza del Sole	121
2.3	Determinazione della longitudine	122
2.4	L'altitudine	122
<b>Scheda 1</b>	<b>Il sistema GPS</b>	122
<b>Scheda 2</b>	<b>Il problema della longitudine</b>	123
3	La misura del tempo	123
3.1	Tempo civile e fusi orari	124
3.2	La linea del cambiamento di data	125
4	I calendari	125
<b>Scheda 3</b>	<b>L'analemma: una preziosa fonte di informazioni</b>	127
■ Sintesi		128
■ Verifiche		129

## GEOLOGIA

### sezione C

## Le rocce e i processi litogenetici



## unità

### I minerali

1	La mineralogia	132
2	La composizione della crosta terrestre	132
3	I minerali	133
4	Genesi e caratteristiche dei cristalli	134
4.1	La struttura dei cristalli	134
4.2	La forma dei cristalli	135
4.3	I solidi amorfi	136
<b>Scheda 1</b>	<b>Come si studiano i reticoli cristallini?</b>	136
5	Due importanti proprietà dei minerali: polimorfismo e isomorfismo	137
6	Alcune proprietà fisiche dei minerali	137
7	La classificazione dei minerali	139
8	I silicati e la loro classificazione	139
9	Un'ulteriore distinzione: minerali femici e sialici	143
<b>Scheda 2</b>	<b>Amianto: un killer invisibile</b>	143
10	I minerali non silicati	144
<b>Scheda 3</b>	<b>Le pietre preziose</b>	145
■ Sintesi		146
■ Verifiche		147



## unità

### Le rocce ignee o magmatiche

1	Le rocce	148
2	Il processo magmatico: dal magma alla roccia	149
3	La classificazione delle rocce magmatiche	149
3.1	Una prima classificazione in base alle condizioni di solidificazione	149
<b>Scheda 1</b>	<b>Lo studio delle rocce</b>	150
3.2	Un secondo criterio di classificazione: il contenuto in silice	152
3.3	La composizione mineralogica e chimica	154
<b>Scheda 2</b>	<b>Classificazione modale: il diagramma di Streckeisen</b>	155
4	La genesi dei magmi	156
<b>Scheda 3</b>	<b>Usi delle rocce ignee</b>	157

5	Il dualismo dei magmi	158
6	Cristallizzazione frazionata e differenziazione magmatica	158
	<b>Scheda 4</b> Le serie magmatiche	160
	■ <b>Sintesi</b>	161
	■ <b>Verifiche</b>	162



## Plutoni e vulcani

1	Plutoni	163
1.1	Corpi ipoabissali	164
2	I vulcani: meccanismo eruttivo	166
3	Attività vulcanica esplosiva	167
3.1	Il meccanismo di caduta gravitativa	168
3.2	Il meccanismo di flusso piroclastico	168
3.3	Il meccanismo di ondata basale	169
4	Attività vulcanica effusiva	169
5	Eruzioni centrali: edifici vulcanici e strutture laviche	170
5.1	Caldere	172
	<b>Scheda 1</b> Le più spaventose eruzioni vulcaniche della storia recente	173
6	Eruzioni lineari o fissurali	175
7	Vulcanismo secondario	175
	<b>Scheda 2</b> Islanda: terra di vulcani e ghiacciai	176
	<b>Scheda 3</b> Energia geotermica in Italia	177
8	Distribuzione dei vulcani sulla Terra	178
9	I vulcani italiani	178
	<b>Scheda 4</b> L'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.	181
	<b>Scheda 5</b> I Campi Flegrei: una zona ad alto rischio	182
10	Il rischio vulcanico	182
10.1	Il rischio vulcanico in Italia	183
	<b>Scheda 6</b> Il piano di emergenza per il Vesuvio	184
	■ <b>Sintesi</b>	185
	■ <b>Verifiche</b>	186



## Rocce sedimentarie e metamorfiche. Elementi di stratigrafia

1	Il processo sedimentario	188
1.1	Disgregazione, trasporto e sedimentazione	188
1.2	La diagenesi	189
2	La classificazione delle rocce sedimentarie	190
2.1	Le rocce clastiche	190

2.2	Le rocce organogene	190
	<b>Scheda 1</b> Le Dolomiti: un'antica barriera corallina	192
2.3	Le rocce di origine chimica	193
	<b>Scheda 2</b> I combustibili fossili	194
	<b>Scheda 3</b> Uso delle rocce sedimentarie in edilizia	195
3	Elementi di stratigrafia	196
	<b>Scheda 4</b> Dalle strutture sedimentarie agli ambienti di sedimentazione	197
3.1	Il rilevamento geologico	198
3.2	Unità litostratigrafiche	199
3.3	Unità biostratigrafiche	199
3.4	Unità cronostratigrafiche	199
3.5	Discontinuità stratigrafiche	200
3.6	Cicli sedimentari	201
4	Il processo metamorfico	202
5	Lo studio e la classificazione delle rocce metamorfiche	203
6	Tipi di metamorfismo e strutture derivate	204
6.1	Metamorfismo di contatto	204
6.2	Metamorfismo cataclastico	204
6.3	Metamorfismo regionale	204
7	Le serie metamorfiche	205
8	Il ciclo litogenetico	206
	<b>Scheda 5</b> Usi delle rocce metamorfiche	207
	■ <b>Sintesi</b>	208
	■ <b>Verifiche</b>	209

## GEOLOGIA

### sezione D

## La dinamica terrestre



## Geologia strutturale e terremoti

1	Le rocce possono subire deformazioni	212
2	I materiali reagiscono in modo diverso alle sollecitazioni	212
3	Le deformazioni nelle rocce: da cosa dipendono?	213
4	Deformazioni rigide	214
5	Deformazioni plastiche	215
5.1	Classificazione delle pieghe	216
5.2	Falde di ricoprimento	217
5.3	Stile tettonico	217
6	I terremoti	218
7	Le onde sismiche	219
7.1	Gli strumenti di rilevazione delle onde sismiche	220
8	Magnitudo e intensità di un terremoto	221
8.1	Le isosisme	223

8.2 Il concetto di rischio sismico	223
<b>Scheda 1</b> Come si determina l'epicentro di un terremoto?	224
<b>Scheda 2</b> Gli tsunami	225
9 Si può prevedere un terremoto?	226
9.1 La previsione deterministica	226
<b>Scheda 3</b> 1908: apocalisse sullo Stretto	227
<b>Scheda 4</b> Dalla California... all'Aquila, passando per l'Irpinia: la previsione si scontra con la realtà	228
9.2 La previsione statistica	230
10 Come difendersi dai terremoti	230
10.1 Edilizia antisismica	231
10.2 Cosa fare in caso di terremoto?	231
11 Distribuzione dei terremoti sulla Terra	232
■ <b>Sintesi</b>	233
■ <b>Verifiche</b>	234



## Unità 13 L'interno della Terra

1 L'importanza dello studio delle onde sismiche	236
2 Le principali discontinuità sismiche	236
<b>Scheda 1</b> Riflessioni e rifrazioni delle onde sismiche	237
3 Crosta oceanica e crosta continentale	238
4 Il mantello	239
5 Il nucleo	240
6 Litosfera, astenosfera e mesosfera	240
7 I movimenti verticali della crosta: la teoria isostatica	241
8 Il calore interno della Terra	243
8.1 Flusso di calore	243
8.2 Origine del calore interno	243
8.3 Correnti convettive nel mantello	244
<b>Scheda 2</b> Moderni metodi di indagine: la tomografia sismica	225
9 Campo magnetico terrestre	246
9.1 La misura del campo magnetico terrestre (c.m.t.)	246
9.2 Le ipotesi sull'origine del campo magnetico terrestre	247
■ <b>Sintesi</b>	248
■ <b>Verifiche</b>	249



## Unità 14 La dinamica della litosfera

1 Le teorie fissiste	251
2 La teoria della deriva dei continenti	252
2.1 Wegener aveva ragione?	254
3 La morfologia dei fondali oceanici	254
3.1 I sedimenti oceanici	254
4 Gli studi di paleomagnetismo	256
4.1 La migrazione apparente dei poli magnetici	256
4.2 Le inversioni di polarità	257
<b>Scheda 1</b> Una Pangea o più Pangee nella storia della Terra?	257
<b>Scheda 2</b> Le proprietà magnetiche dei minerali	258
5 Espansione dei fondali oceanici	259
6 Anomalie magnetiche	259
7 La struttura delle dorsali oceaniche	260
7.1 Faglie trasformi	261
8 Età delle rocce del fondale	261
<b>Scheda 3</b> C'è vita nelle profondità abissali?	263
■ <b>Sintesi</b>	264
■ <b>Verifiche</b>	265



## Unità 15 Tettonica a placche e orogenesi

1 La teoria della tettonica a placche	267
2 Fenomeni sismici e tettonica a placche	268
3 Margini di placca	268
4 Caratteristiche generali delle placche	269
5 I margini continentali	270
5.1 Come si formano gli oceani	270
5.2 I sistemi arco-fossa	272
<b>Scheda 1</b> Il sistema arco-fossa delle Isole Eolie	273
6 Punti caldi	274
6.1 L'esempio delle Isole Hawaii	275
7 Il meccanismo che muove le placche	276

8	Come si formano le montagne	276
9	Diversi tipi di orogenesi	278
9.1	Collisione crosta oceanica-crosta continentale	278
9.2	Collisione crosta continentale-crosta continentale	278
9.3	Orogenesi per accrescimento crostale	279
10	Un sistema in continua evoluzione	279
<b>Scheda 2 Vulcanismo e geodinamica</b>		280
11	Struttura dei continenti	282
<b>Scheda 3 Struttura ed evoluzione della catena alpina</b>		284
<b>Scheda 4 Migrazione continentale, biodiversità ed evoluzione</b>		286
■	<b>Sintesi</b>	287
■	<b>Verifiche</b>	288



## Il tempo geologico e la storia della Terra

1	I fossili	290
2	Processi di fossilizzazione	291
3	Il fattore tempo e l'importanza dei fossili: la datazione relativa	292
4	La datazione assoluta	293
4.1	Altri metodi di datazione assoluta	293
<b>Scheda 1 Il metodo di datazione basato sul carbonio radioattivo</b>		294
5	Il tempo geologico e la sua suddivisione	295
6	Il Precambriano	295
6.1	Le prime fasi della storia della Terra	295
6.2	L'origine dei continenti e i primi processi orogenetici	297
6.3	Origine ed evoluzione dell'atmosfera	297
6.4	Origine ed evoluzione dell'idrosfera	298
6.5	L'origine della vita	298
7	L'Eone Fanerozoico	300
7.1	Il Paleozoico (Primario), 570-245 milioni di anni fa	300
7.2	Il Mesozoico (Secondario), 245-65 milioni di anni fa	302
7.3	Il Cenozoico (Terziario), 65-1,8 milioni di anni fa	305
7.4	Il Neozoico (Quaternario), da 1,8 milioni di anni fa ad oggi	308

<b>Scheda 2 Estinzioni di massa: un mistero insolubile?</b>		311
8	Breve storia geologica dell'Italia	313
8.1	Quando l'Italia ancora non c'era: testimonianze dal Paleozoico	313
8.2	L'Italia sommersa del Mesozoico	314
8.3	Nel Cenozoico si formano le Alpi e gli Appennini	315
8.4	Il presente (Era Neozoica)	317
8.5	Il futuro	317
■	<b>Sintesi</b>	318
■	<b>Verifiche</b>	319

## GEOGRAFIA FISICA

### sezione E

## L'atmosfera



## L'atmosfera: composizione, struttura e dinamica

1	La composizione dell'atmosfera	322
2	La struttura a strati dell'atmosfera	323
2.1	Troposfera: la turbolenza	323
2.2	Stratosfera: la stabilità	324
<b>Scheda 1 Il "buco" nell'ozonofera</b>		324
2.3	Mesosfera: la transizione	325
2.4	Termosfera: la ionizzazione	325
<b>Scheda 2 L'inquinamento atmosferico</b>		326
2.5	Esosfera: il confine	327
3	Il bilancio radiativo della Terra	328
<b>Scheda 3 Il colore del cielo</b>		329
4	La temperatura dell'aria	329
<b>Scheda 4 L'inversione termica</b>		330
4.1	Misure e carte termometriche	331
5	La pressione atmosferica	332

5.1	Isobare, aree cicloniche e anticicloniche	333
6	I venti	334
6.1	Velocità e direzione del vento	334
6.2	La circolazione atmosferica generale: il modello "termico" e quello "dinamico"	335
6.3	I venti periodici: monsoni (regionali) e brezze (locali)	338
6.4	I venti variabili del Mediterraneo	340
	<b>Scheda 5 Gli strumenti della meteorologia (I)</b>	341
	■ Sintesi	342
	■ Verifiche	343

## unità 18

### I fenomeni meteorologici

1	L'umidità atmosferica	345
2	Condensazione e brinamento	346
3	I fenomeni al suolo: rugiada, brina e nebbia	346
4	Le nubi	347
4.1	La formazione delle nubi	348
5	Le precipitazioni	349
5.1	Pioggia e neve	349
5.2	Grandine	350
5.3	I regimi pluviometrici	350
	<b>Scheda 1 I temporali</b>	350
6	Il tempo meteorologico	352
6.1	I cicloni tropicali	352
6.2	I tornado	353
	<b>Scheda 2 Le piogge acide</b>	354
6.3	I cicloni extratropicali	355
	<b>Scheda 3 Le condizioni del tempo in Europa e in Italia</b>	356
7	Le previsioni del tempo	356
	<b>Scheda 4 Gli strumenti della meteorologia (II)</b>	358
	■ Sintesi	359
	■ Verifiche	360

## unità 19

### Il clima

1	Tempo e clima	362
2	Elementi e fattori del clima	362
3	Clima e forme di vita	363
	<b>Scheda 1 Il clima delle città: l'isola di calore</b>	364
4	La classificazione dei climi	365
5	I climi megatermici umidi (A)	366
5.1	Clima equatoriale umido	366
5.2	Clima della savana	367
5.3	Clima monsonico	367

6	I climi aridi (B)	368
6.1	Climi desertici caldi	368
6.2	Climi desertici freddi	368
6.3	Climi predesertici	369
7	I climi mesotermici (C)	369
7.1	Clima sinico	369
7.2	Clima mediterraneo	369
7.3	Clima temperato fresco-umido	370
8	I climi microtermici (D)	371
8.1	Clima temperato freddo-umido	371
8.2	Clima temperato freddo-secco	372
9	I climi nivali (o polari) (E)	372
9.1	Clima subpolare	372
9.2	Clima polare	373
10	I climi di montagna	373
	<b>Scheda 2 I climi dell'Italia</b>	375
11	Le variazioni climatiche	376
12	L'effetto serra: anche il clima è "inquinato"	377
	<b>Scheda 3 Il Protocollo di Kyoto</b>	379
	■ Sintesi	380
	■ Verifiche	381

## GEOGRAFIA FISICA

### sezione F

## Le acque e la geomorfologia

## unità 20

### La morfogenesi

1	Le forze e i processi che modellano la superficie terrestre	384
2	La degradazione meteorica delle rocce	385
2.1	La disgregazione fisica delle rocce	385
2.2	L'alterazione chimica delle rocce	387
3	Il suolo	388
3.1	La composizione dei suoli	389
3.2	Le caratteristiche dei suoli	390
3.3	Fattori che influenzano la pedogenesi (fattori pedogenetici)	391
3.4	I regimi pedogenetici	392
3.5	La classificazione dei suoli	393
	<b>Scheda 1 L'erosione accelerata del suolo</b>	394
4	Il modellamento dei versanti: le frane	395
	<b>Scheda 2 Le frane: una forma di dissesto idrogeologico</b>	398
	■ Sintesi	400
	■ Verifiche	401



## unità

### Acque continentali e morfogenesi

1	L'idrosfera	402
1.1	Le proprietà dell'acqua	402
1.2	Il ciclo dell'acqua	403
2	Le acque continentali	405
2.1	Ruscigliamento ed erosione superficiale	405
<b>Scheda 1 L'acqua: il problema del nuovo millennio</b>		407
3	I corsi d'acqua	408
3.1	Il bacino idrografico	408
3.2	Caratteristiche generali di un corso d'acqua	408
4	L'azione geomorfologica delle acque incanalate	410
4.1	Erosione e valli fluviali	410
4.2	Il trasporto dei sedimenti	413
4.3	Il deposito: conoidi di deiezione, pianure alluvionali, foci e altro	413
4.4	Forme miste di erosione e deposito: meandri e terrazzi fluviali	414
4.5	Il profilo longitudinale dei fiumi	416
4.6	Il ciclo di erosione	416
<b>Scheda 2 Le grandi dighe: un simbolo del progresso?</b>		418
<b>Scheda 3 Dissesto idrogeologico: le inondazioni</b>		419
5	I laghi	420
5.1	Origine dei laghi	420
5.2	Caratteristiche idrologiche dei laghi	421
5.3	L'estinzione dei laghi	422
<b>Scheda 4 Il Lago Aral</b>		423
6	Le acque sotterranee	424
6.1	Le falde acquifere	425
6.2	Le caratteristiche delle acque di falda	426
6.3	Le sorgenti	426
<b>Scheda 5 L'inquinamento delle acque superficiali e sotterranee</b>		428
7	Il carsismo	429
7.1	Il paesaggio carsico	429
7.2	Forme carsiche superficiali (epigee)	430
7.3	Forme carsiche sotterranee (ipogee)	431
■ Sintesi		432
■ Verifiche		433



## unità

### Oceani, mari e coste

1	Un mondo da esplorare	436
<b>Scheda 1 Le navi oceanografiche</b>		436
2	Oceani e mari	436
3	Proprietà fisico-chimiche delle acque marine	437
3.1	La temperatura	437

3.2	Composizione chimica e salinità	437
3.3	La densità	438
3.4	I gas disciolti	439
3.5	Colore e trasparenza	439
4	I movimenti del mare	440
4.1	Il moto ondoso	440
4.2	Le maree	442
4.3	Le correnti oceaniche	445
<b>Scheda 2 El Niño e La Niña: una terribile coppia</b>		448
5	I fondali oceanici	449
5.1	Le strutture	449
5.2	I sedimenti oceanici	450
5.3	I fenomeni di costruzione: le scogliere coralline	451
<b>Scheda 3 L'inquinamento delle acque marine</b>		452
6	Le coste (o litorali)	453
6.1	Le coste alte: archi, scogli, grotte e falesie	453
6.2	Le coste basse: spiagge, tomboli e lagune	454
6.3	La dinamica dei litorali	455
6.4	Tipi di coste	456
<b>Scheda 4 Il mare come risorsa</b>		457
<b>Scheda 5 Erosione delle spiagge e interventi di protezione</b>		458
■ Sintesi		459
■ Verifiche		460



## unità

### Gli ambienti estremi: glaciale e desertico

1	Ghiacciai e deserti	462
2	I ghiacciai	464
2.1	Il bilancio di massa	463
2.2	La classificazione	463
2.3	Il movimento	466
<b>Scheda 1 Il ritiro dei ghiacciai alpini</b>		467
3	La morfologia glaciale	468
3.1	L'erosione glaciale e le sue forme	468
3.2	Forme di deposito glaciale e fluvioglaciale	469
4	La morfologia periglaciale: le particolarità di un ambiente estremo	471
<b>Scheda 2 Le valanghe</b>		472
5	L'azione del vento	473
5.1	L'erosione e il trasporto eolico	473
5.2	I depositi eolici	475
6	I deserti	477
6.1	Le diverse morfologie dei deserti	477
6.2	Origine ed evoluzione delle regioni desertiche	478
<b>Scheda 3 La desertificazione</b>		478
■ Sintesi		480
■ Verifiche		481
■ Glossario		482
■ Indice analitico		486

# Sommario dei contenuti online

## Per la classe virtuale

 Scienza Viva:  
animazioni e attività interattive  
 video **e·xplor3D**

## Per esercitarsi

 flashcard  
 test interattivi

## ASTRONOMIA E ASTROFISICA

### sezione A

## L'universo

### Unità 1 Metodi e strumenti dell'indagine astronomica

-  I corpi celesti
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

### Unità 2 Stelle, galassie, universo

-  Le dimensioni dell'universo
-  Moto e luminosità dei corpi celesti
-  L'evoluzione stellare
-  I tipi di galassie
-  Le galassie
-  Il Big Bang
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

### Unità 3 Il sistema solare

-  Il sistema solare
-  Leggi di Keplero
-  Marte
-  Missione su Marte
-  Saturno
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

## ASTRONOMIA E ASTROFISICA

### sezione B

## La Terra nello spazio

### Unità 4 Geodesia

-  Il reticolato geografico

-  Le coordinate geografiche
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

### Unità 5 I moti della Terra

-  I moti della Terra
-  L'ombra
-  Le stagioni
-  Sintesi Flip\*-it
-  Verifiche E-Trainer

### Unità 6 La Luna

-  I moti della Luna
-  Le fasi lunari
-  Le eclissi
-  Eclissi di Sole
-  La Luna
-  La Terra vista dalla Luna
-  Il primo uomo sulla Luna
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

### Unità 7 L'orientamento e la misura del tempo

-  I punti cardinali e le ore
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

## GEOLOGIA

### sezione C

## Le rocce e i processi litogenetici

### Unità 8 I minerali

-  Riconoscere minerali e rocce
-  Sintesi Flip\*IT

-  Verifiche E-TRAINER

### Unità 9 Le rocce ignee o magmatiche

-  Il ciclo delle rocce
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

### Unità 10 Plutoni e vulcani

-  La struttura del vulcano
-  Eruzione dell'Etna
-  I vulcani
-  I geysers
-  Eruzioni e lava
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

### Unità 11 Rocce sedimentarie e metamorfiche. Elementi di stratigrafia

-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

## GEOLOGIA

### sezione D

## La dinamica terrestre

### Unità 12 Geologia strutturale e terremoti

-  Le faglie
-  Ipocentro ed epicentro
-  Le onde sismiche
-  Il terremoto di San Francisco del 1906
-  L'onda anomala
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 13 L'interno della Terra**

-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 14 La dinamica della litosfera**

-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 15 Tettonica a placche e orogenesi**

-  La struttura della Terra
-  La subduzione della litosfera oceanica sotto quella continentale
-  I margini attivi divergenti
-  La collisione tra continenti
-  Dentro la Terra
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 16 Il tempo geologico e la storia della Terra**

-  Le datazioni assolute
-  Il contatore geologico del tempo
-  La storia della Terra
-  La Pangea e la nascita dei continenti
-  L'orogenesi alpina
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**GEOGRAFIA FISICA**

## sezione E

**L'atmosfera****Unità 17 L'atmosfera: composizione, struttura e dinamica**

-  La composizione dell'atmosfera
-  Gli strati dell'atmosfera

-  La pressione atmosferica
-  Clima e vento
-  L'inquinamento atmosferico
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 18 I fenomeni meteorologici**

-  I tipi di nubi
-  Le masse d'aria e i fronti atmosferici
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 19 Il clima**

-  Planisfero dei climi
-  Foresta equatoriale
-  Savana
-  Foresta
-  Tundra
-  L'effetto serra
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**GEOGRAFIA FISICA**

## sezione F

**Le acque e la geomorfologia****Unità 20 La morfogenesi**

-  Termoclastismo e crioclastismo
-  Le frane
-  La struttura dei suoli
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 21 Acque continentali e morfogenesi**

-  Il ciclo dell'acqua

-  Le caratteristiche dei fiumi
-  I laghi
-  Falde freatiche e artesiane
-  L'inquinamento idrico
-  Carsismo
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 22 Oceani, mari e coste**

-  Le onde
-  Le maree
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**Unità 23 Gli ambienti estremi: glaciale e desertico**

-  I ghiacciai
-  Le dune
-  Deserto
-  Sintesi Flip\*IT
-  Verifiche E-TRAINER

**e.xplor3D**

1. Coordinate geografiche
2. La Terra nel sistema solare
3. Moto di rivoluzione della Terra
4. Moto di rotazione della Terra
5. La Luna e la Terra
6. Le fasi lunari
7. Eclissi
8. Esplorazione della Luna

**Unità online**

PDF La cartografia

PDF Popolazione, risorse e sviluppo

# unità

## Il sistema solare

*È vero che il sistema copernicano mette perturbazione nell'universo d'Aristotele; ma noi trattiamo dell'universo nostro, vero e reale. (...)  
(...) benché l'astronomia nel corso di molti secoli abbia fatto gran progressi, nell'investigar la costituzione e i movimenti de i corpi celesti, non però è ella sin qui arrivata a segno tale, che moltissime cose non restino indecise, e forse ancora molt'altre occulte.*  
(Galileo Galilei, *Dialogo sui due massimi sistemi*)

### 1 Il sistema solare

Il sistema solare è un insieme di corpi celesti che subiscono la reciproca attrazione gravitazionale e si muovono in uno spazio comune di circa 200 000 UA di diametro (circa 3 anni luce). Si trova in un braccio periferico della nostra galassia, alla distanza di 27 000 anni luce dal centro, ed è in perenne **moto di rivoluzione** lungo una traiettoria ellissoidale che impiega 200 milioni di anni a compiere.

Il sistema comprende una stella di medie dimensioni (il Sole), otto pianeti, cinque pianeti nani e almeno 54 satelliti principali, migliaia di asteroidi e una grande quantità di frammenti rocciosi e ammassi di ghiaccio (meteore e comete). Nel Sole è comunque concentrata quasi tutta la materia presente nel sistema.

### 1.1 Origine del sistema solare

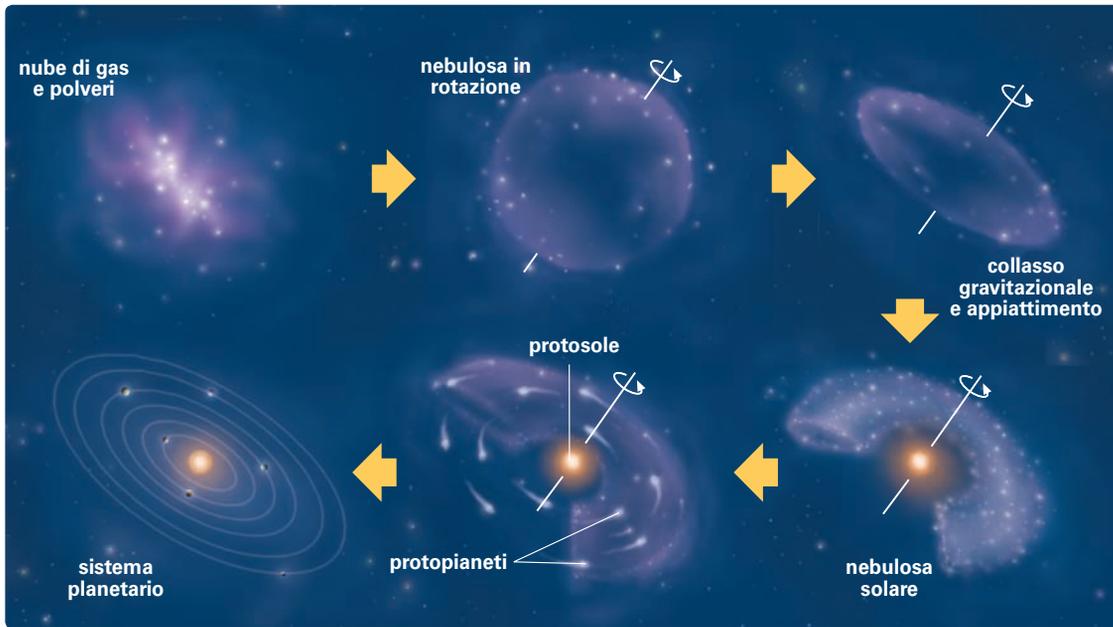
La teoria maggiormente accreditata per spiegare la formazione dei pianeti e del Sole ha la sua origine nell'*ipotesi nebulari* di Kant (1755) e Laplace (1796), secondo la quale tutto deriverebbe da una nebulosa rotante in contrazione. Nonostante alcuni punti non siano ancora completamente chiariti, questa teoria spiega diverse caratteristiche del sistema: il senso del moto di rivoluzione di tutti i pianeti, antiorario e concorde

con il verso della rotazione solare, i piani orbitali dei pianeti quasi coincidenti, la diversa densità e struttura dei pianeti, l'esistenza di una fascia di asteroidi, e altri aspetti più complessi (21).

Possiamo comprendere come si sia originato il sistema solare facendo riferimento al processo di formazione delle stelle (Unità 2, § 2). Come dimostra il caso, relativamente frequente, delle stelle doppie, può capitare che una nube primordiale in collasso gravitazionale si divida in più punti: in questo modo si possono formare più stelle oppure vari pianeti, secondo la quantità di materia coinvolta in ogni singolo evento.

Nel caso del sistema solare, si suppone che circa 4,5 miliardi di anni fa una nebulosa fredda in rotazione, costituita da idrogeno, elio e polveri cosmiche, abbia cominciato a contrarsi. Un evento esterno, forse l'esplosione di una supernova, favorì la formazione di un nucleo condensato, un **protosole**, in continuo accrescimento per la forte attrazione che esercitava sul materiale circostante.

L'aumento della massa centrale causò un'ulteriore contrazione, che ebbe due conseguenze: in primo luogo la temperatura del protosole raggiunse valori tali da permettere l'inizio del processo di fusione nucleare e la formazione di una vera stella, il Sole; inoltre, si ebbe un incremento della velocità di rotazione della nebulosa e, di conseguenza, della forza centrifuga del sistema, per cui la nube si appiattì formando un disco



1 Le fasi della formazione di un sistema planetario.

rotante (questo spiegherebbe la complanarietà e il senso di rotazione dei pianeti).

Nel frattempo si crearono centri di condensazione in due diverse regioni: nelle zone più vicino al Sole si condensarono gli elementi e i composti più pesanti (ferro e silicati), mentre gli elementi più volatili si dispersero per l'elevata temperatura; nelle zone più lontane dal Sole, dove la temperatura era molto bassa, si condensarono acqua, ammoniaca e metano. Ebbe così inizio la formazione dei pianeti rocciosi, come Venere o Marte, e di quelli gassosi, come Giove o Saturno. I frammenti iniziali (*protopianeti* o *planetesimi*) si accrebbero attraendo gravitazionalmente altri blocchi di materiale: nella zona interna e più calda, l'elevata energia cinetica dei singoli blocchi impedì la formazione di pianeti di grandi dimensioni, mentre nelle zone esterne, più fredde, l'effetto gravitazionale prevalse, permettendo la formazione dei pianeti giganti e dei loro satelliti. L'enorme massa di Giove avrebbe inoltre impedito la formazione di un pianeta nello spazio che lo separava da Marte.

Nel frattempo il Sole in formazione entrò in una fase di instabilità, caratterizzata da una notevole perdita di massa, che produsse un *vento solare* costituito da un flusso di protoni ed elettroni immensamente più forte di quello attuale (miliardi di tonnellate di materiale gassoso al secondo). Questo vento spazzò il sistema solare, ripulendolo dei gas e delle polveri residue.

In questa fase i pianeti furono soggetti a numerosissime collisioni con i materiali (meteoriti) che ancora si trovavano nello spazio: la maggior

parte dei crateri presenti nei pianeti rocciosi si è originata in questo periodo. Il riscaldamento della superficie prodotto dagli urti causò la fusione e la conseguente migrazione dei materiali pesanti (ferro e nichel) verso l'interno, a formare il nucleo metallico dei futuri pianeti.

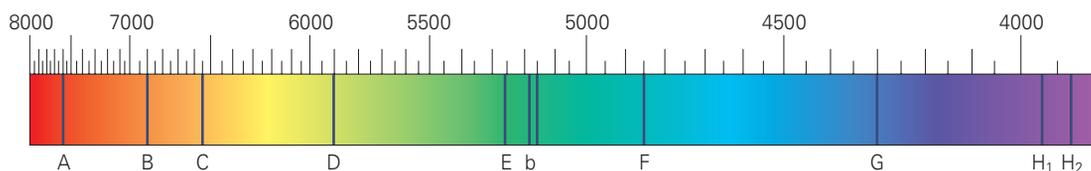
## 2 Il Sole

Il Sole è una stella di medie dimensioni e di media temperatura, situata al centro della sequenza principale del diagramma H-R (**Tabella 1**).

La sua bassa densità ci fa presumere che siano preponderanti, al suo interno, gli elementi chimici leggeri, e l'analisi dello spettro della luce solare (detto *spettro di Fraunhofer*) (2) conferma la presenza di idrogeno (94% degli atomi e 73% in peso) ed elio (5,9% degli atomi e 25% in peso). Sono però presenti, in percentuali molto ridotte, quasi tutti gli elementi chimici esistenti nell'universo. Poiché il Sole non è in grado di produrli per fusione nucleare, data la sua massa e il suo stadio evolutivo, è probabile che questi elementi siano stati originati, prima che esso si formasse, dall'esplosione di una supernova: la nostra stella è quindi costituita da materia "riciclata".

Il Sole possiede un moto rotatorio da Ovest verso Est, intorno a un asse quasi perpendicolare al piano orbitale della Terra. La sua velocità angolare di rotazione varia con la latitudine: l'equatore solare, infatti, impiega 25 giorni terrestri per compiere un giro completo, mentre in prossimità dei poli il periodo di rotazione aumenta sino a

2 Lo spettro solare: è un classico spettro di assorbimento con una serie di bande nere (di Fraunhofer) che interrompono lo spettro continuo della luce proveniente dal nucleo del Sole. Tali righe sono dovute all'assorbimento di quelle frequenze da parte dell'atmosfera solare e ne rivelano quindi la composizione. Poiché anche l'atmosfera terrestre assorbe alcune frequenze, è preferibile effettuare tali rilevamenti al di fuori dell'atmosfera, con satelliti artificiali. Grazie allo studio dello spettro solare, abbiamo scoperto che nel Sole sono presenti quasi tutti gli elementi chimici dell'universo.



**Tabella 1** Principali caratteristiche del Sole

<b>Raggio</b>	696 000 km (109 raggi terrestri)
<b>Massa</b>	$2 \cdot 10^{30}$ kg (333 400 masse terrestri)
<b>Densità media</b>	1,4 g/cm <sup>3</sup> (1/4 di quella terrestre)
<b>Temperatura superficiale</b>	5785 K
<b>Accelerazione di gravità</b>	274 m/s <sup>2</sup> (28 volte quella terrestre)
<b>Diametro angolare apparente</b>	Tra 31' 27" e 32' 30"
<b>Magnitudine apparente</b>	-26,8
<b>Periodo di rotazione equatoriale</b>	25,38 giorni terrestri

35 giorni. Questa è una conferma della fluidità, almeno esterna, della nostra stella.

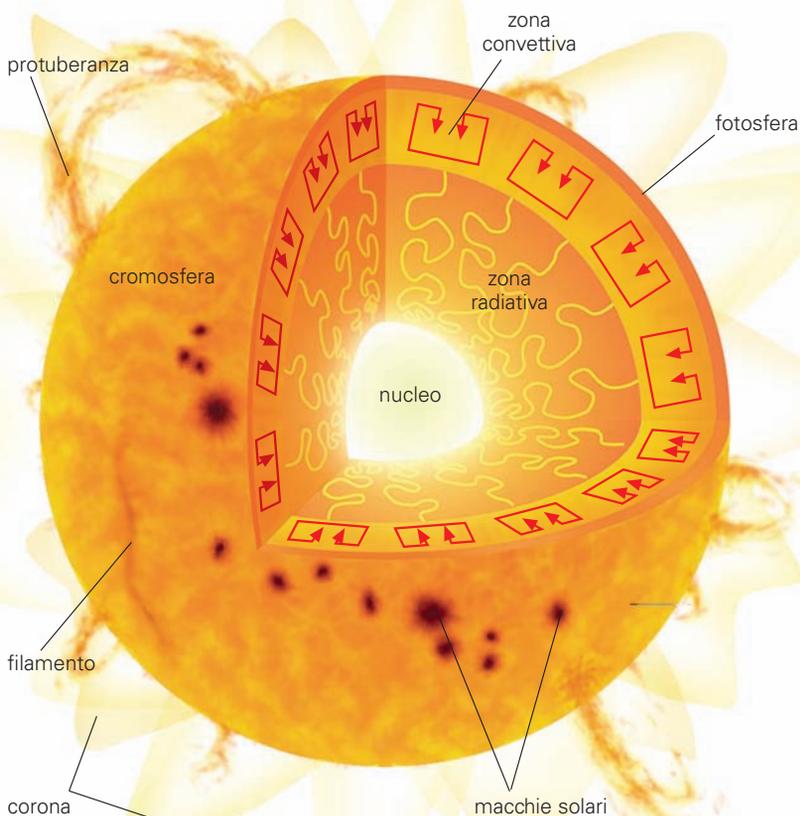
Il Sole emette un'enorme quantità di energia ( $3,9 \cdot 10^{26}$  J/s): è una macchina termica che esprime una potenza di  $3,86 \cdot 10^{26}$  W (l'equivalente di  $4 \cdot 10^{17}$  grandi centrali elettriche!). Solo in minima parte questa energia raggiunge, sotto forma di luce e calore, la Terra. Si tratta, comunque, di un flusso di circa 1 kW/m<sup>2</sup>.

## 2.1 La struttura interna del Sole

Il modello più plausibile della struttura del Sole, in base ai dati in nostro possesso, è quello di una sfera gassosa, formata da diversi strati concentrici caratterizzati da diverse condizioni fisiche e chimiche. La temperatura e la densità aumentano verso l'interno sino a valori elevatissimi, ma il collasso gravitazionale che ne potrebbe conseguire è impedito dall'altissima energia cinetica delle particelle, che tendono a espandersi. Questa situazione di equilibrio si protrae da 5 miliardi di anni e per altrettanti si protrarrà.

Distinguiamo quindi le seguenti parti (33).

3 Il modello a strati del Sole.



→ **Nucleo:** è la zona centrale, con un raggio di circa 150 000 km (solo il 5% del totale) e con una temperatura di circa 14-15 milioni di kelvin, sufficiente perché vi avvengano processi di fusione nucleare (reazione protone-protone). La materia è costituita in gran parte da idrogeno allo stato di *plasma* (in cui i nuclei e gli elettroni si separano e si comportano in modo indipendente). L'energia prodotta migra verso l'esterno.

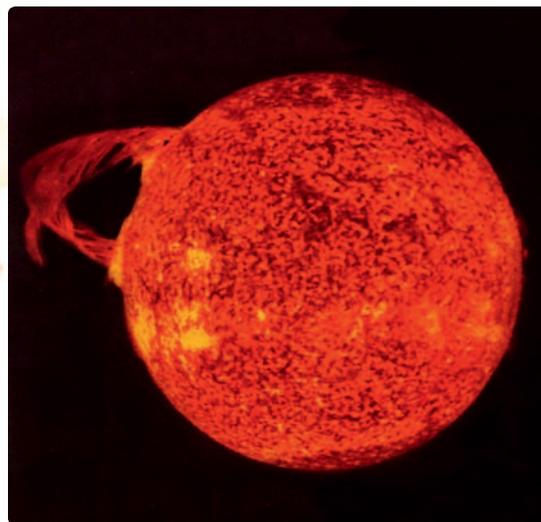
→ **Zona radiativa:** ha uno spessore di 350 000 km circa e assorbe l'energia prodotta dal nucleo, trasmettendola verso l'esterno per irraggiamento (in particolare raggi X e gamma). La materia si trova allo stato di plasma, ma la temperatura non è sufficiente per innescare reazioni di fusione nucleare.

→ **Zona convettiva:** in essa il trasporto di energia avviene per mezzo di moti convettivi, ossia movimenti circolatori di materia solare che si muove verso l'esterno quando è calda e ritorna verso l'interno quando è relativamente fredda. Ha uno spessore di circa 200 000 km.

## 2.2 La parte esterna del Sole

L'esterno del Sole è costituito, nell'ordine, dalla fotosfera, dalla cromosfera e dalla corona solare. Le ultime due formano l'atmosfera solare.

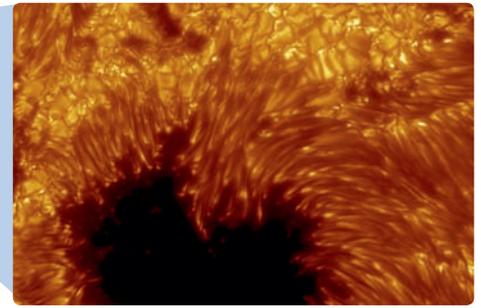
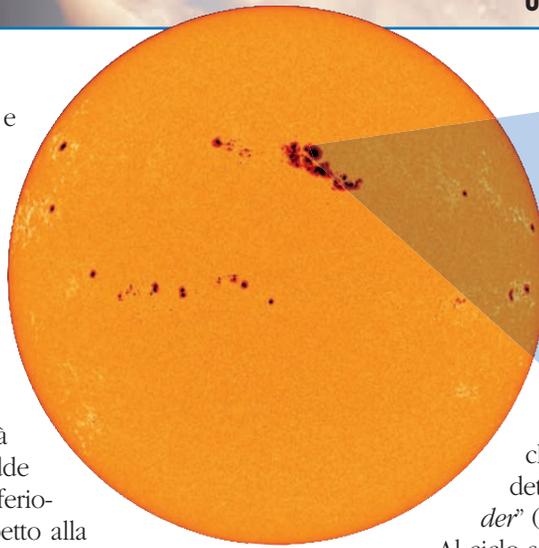
→ **Fotosfera (34):** è ciò che vediamo quando osserviamo il Sole. Costituita da gas a bassa pressione (1/10 di quella dell'atmosfera terrestre), ha uno spessore di poche centinaia di chilometri, una temperatura di circa 5800 kelvin e, di conseguenza, un colore giallo. L'aspetto della fotosfera non è, però, uniforme: sono visibili zone, dette **granuli**, più luminose e più calde di quelle circostanti, che sono l'apice ascendente delle celle convettive in cui avviene la circolazione di materia. I granuli hanno un diametro variabile (tra i 200 e gli 800 km) e una durata di pochi minuti: infatti i gas in risalita si raffreddano e tornano verso l'inter-



4 La struttura granulare della superficie solare.

no. La continua comparsa e scomparsa delle granulazioni (che non superano i 5 minuti di durata) produce un effetto di apparente ebollizione.

Un fenomeno altrettanto evidente è quello delle **macchie solari** (55): scoperte da Galileo, sono aree di ridotta luminosità poiché relativamente fredde (hanno una temperatura inferiore di circa 1500 kelvin rispetto alla normale fotosfera). In esse si distingue una zona centrale più scura e infossata, detta **ombra**, e un bordo più chiaro, la **penombra**. Non sono una presenza costante nella fotosfera: di solito compaiono a coppie o in gruppi alle medie latitudini, poi aumentano di dimensioni e di numero per un periodo variabile tra i pochi giorni e alcuni mesi e infine si esauriscono sino a scomparire, sostituite da altre. Anche se mediamente hanno un diametro di 13000 km, le maggiori possono raggiungere un diametro di 100000 km e sono visibili a occhio nudo. Il numero e le dimensioni delle macchie variano periodicamente: in media, negli ultimi 300 anni, l'intervallo tra due massimi di attività, in cui possono essere presenti sino a 100 macchie, è stato di undici anni (**ciclo solare**), ma vi sono stati periodi di assoluta inattività lunghi sino a 70 anni (detti *minimi di Maunder*). All'inizio del ciclo undecennale le macchie compaiono tra i 30° e i 40° di latitudine, si spostano gradualmente verso l'equatore e alla fine scompaiono. Il diagramma



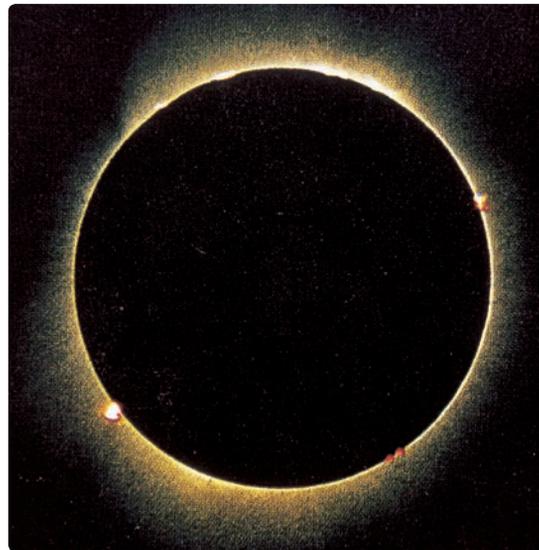
che se ne può ricavare è detto "*a farfalla di Maunder*" (56).

Al ciclo solare è associata la modificazione (anch'essa ciclica) del debole campo magnetico solare, la cui polarità si inverte al termine di ogni ciclo: il motivo di ciò è probabilmente da ricercare nel fatto che i materiali superficiali, alle diverse latitudini, ruotano a velocità differente.

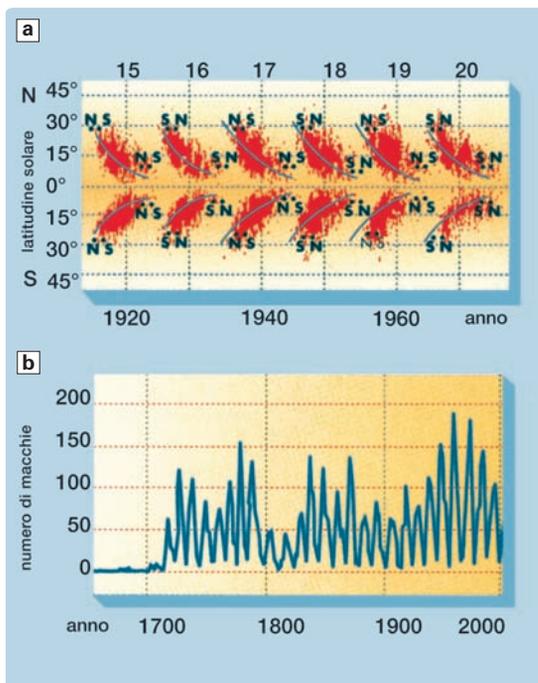
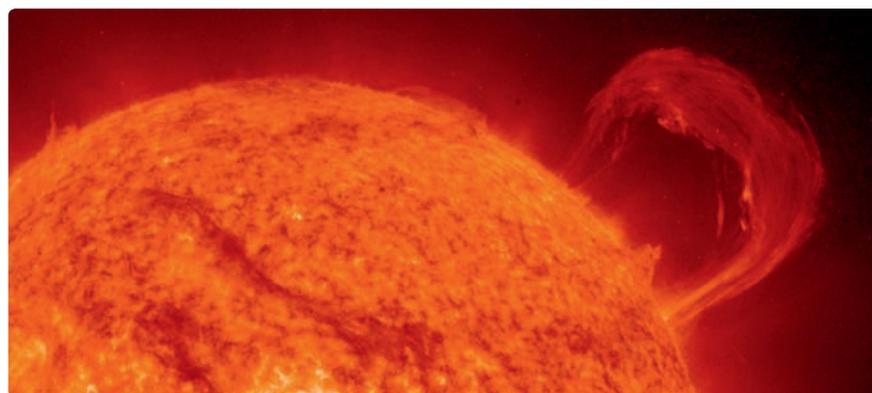
→ **Cromosfera** (57): involucro trasparente e incandescente, dal colore rosso vivo per la presenza preponderante di idrogeno gassoso a bassa pressione, è visibile unicamente durante le eclissi di Sole. Ha uno spessore di circa 10000 km, ma i suoi margini sono irregolari per la presenza di grandiosi fenomeni di turbolenza superficiale, come le **protuberanze** (58) e i **brillamenti** (o flares).

5 Macchie solari a diverso ingrandimento: appaiono scure perché più fredde rispetto alle zone circostanti.

7 La cromosfera solare, durante un'eclissi totale di Sole.



8 Protuberanza solare.



6 a) Diagramma "a farfalla di Maunder" che evidenzia lo spostamento delle macchie solari nel tempo. b) Ciclicità dell'attività solare.

## Scheda 1 Il Sole e i neutrini

I processi di fusione nucleare che avvengono nel nucleo del Sole (e nelle stelle in generale) producono neutrini. Si è quindi cercato di trovare il sistema adatto per verificare se la nostra stella genera effettivamente la quantità di neutrini prevista teoricamente. Ma queste particelle, che presumibilmente raggiungono il nostro pianeta, sono assai difficili da rilevare, poiché attraversano la materia senza interagire con essa: sono stati messi in atto tentativi per intrappolarle, utilizzando vasche contenenti composti organici del cloro (atomo che interagisce con i neutrini

trasformandosi in argo radioattivo) o composti del gallio (che si trasforma in germanio). Le vasche sono state collocate a grandi profondità (in una miniera nel Dakota, USA, e sotto il Gran Sasso, in Italia - nella figura) per evitare l'interferenza dei raggi cosmici.

I conteggi rivelano però un numero di neutrini pari a solo 1/3 del previsto; questa discrepanza con le previsioni teoriche potrebbe indicare che il modello proposto per i meccanismi di fusione nucleare nel Sole è errato, o che, in alternativa, i metodi di misurazione non sono abbastanza precisi.

Esiste però una terza possibilità: sappiamo che i neutrini possono essere di tre tipi, elettronici, muonici o tauonici; recenti esperimenti sembrano dimostrare che queste particelle sono più instabili del previsto e si trasformano da un tipo all'altro. I processi di fusione producono neutrini elettronici (quelli che noi conteggiamo), ma questi potrebbero non giungere in questa forma sulla Terra. L'instabilità dei neutrini implica però che queste particelle siano dotate di una massa: sarebbero così piccole da non risolvere il problema della materia oscura (Unità 2, § 6.1).

scheda



Le protuberanze sono getti di gas che penetrano nella corona solare sino a un'altezza di 150 000 km, producendo archi di enormi dimensioni (sino a 300 000 km di lunghezza) che ricadono secondo le linee del campo magnetico. I brillamenti sono esplosioni di luce (della durata di pochi minuti), che liberano una notevole quantità di energia sotto forma di radiazioni di varia lunghezza d'onda (dai raggi X alle onde radio) e di particelle elementari a elevatissima velocità.

Altre zone molto attive sono le **facole**, di notevole luminosità ed elevato magnetismo, spesso in corrispondenza delle macchie solari, e le **spicole**, getti di gas a elevata temperatura (circa 15 000 K) che si innalzano sino a 10 000 km dalla cromosfera, suggerendo l'idea di una prateria in fiamme.

→ **Corona solare** (☉9): si estende per decine di milioni di chilometri ed è costituita da gas

fortemente ionizzati e sempre più rarefatti al crescere della distanza dalla cromosfera. La sua luminosità è tenue ed è perciò visibile solo durante le eclissi di Sole.

Rispetto alla cromosfera, la temperatura della corona è estremamente elevata, intorno ai 2 milioni di kelvin: ciò sembra in contrasto con le leggi della termodinamica, che prevedono il passaggio di calore solo dai corpi caldi a quelli freddi. Occorre però precisare che, in questa situazione, il termine temperatura va inteso unicamente come la misura dell'energia cinetica, effettivamente elevatissima, di cui sono dotate le singole particelle dell'atmosfera solare: i gas della corona però sono estremamente rarefatti e quindi il loro contenuto energetico globale è relativamente basso.

Le particelle della zona più esterna possiedono comunque sufficiente energia cinetica per sfuggire all'attrazione gravitazionale del Sole e disperdersi, come **vento solare**, per tutto il sistema solare. Il vento solare che raggiunge il nostro pianeta è assai rarefatto (poche particelle per centimetro quadrato), ma interagisce con lo strato esterno dell'atmosfera provocando disturbi nelle trasmissioni radio a grande distanza e dando origine alle **aurore polari**, spettacolari fenomeni luminosi che si possono osservare solo a latitudini elevate.

Altre conseguenze dell'attività solare sono le **tempeste magnetiche**, alterazioni significative del campo magnetico terrestre che hanno l'effetto di far impazzire gli aghi magnetici delle bussole e di interferire con i segnali in radiofrequenza: si pensa siano collegate alle macchie solari e ai brillamenti.

9 Elaborazione elettronica di un'immagine della corona solare: a ogni colore corrisponde una precisa densità gassosa (il rosso indica le zone con maggiore densità, il giallo quelle con minore densità).



### 3 I pianeti del sistema solare

All'osservazione astronomica, i pianeti (dal greco *planetes*, "errante") sono facilmente distinguibili, in quanto mutano nel tempo la loro posizione rispetto allo sfondo costituito dalle stelle fisse, in modo indipendente l'uno dall'altro. Se paragonati alle stelle, sono corpi celesti di piccole dimensioni, relativamente freddi, che non splendono di luce propria, anche se possono apparire molto luminosi. Nel sistema solare sono noti 8 pianeti: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno (in ordine di distanza crescente dal Sole) **(10)**.

#### 3.1 Le leggi che regolano il moto dei pianeti

Il moto dei pianeti intorno al Sole è regolato dalle tre **leggi di Keplero** **(11)** a pagina seg.).

**I legge.** *I pianeti descrivono intorno al Sole orbite ellittiche, di cui il Sole occupa uno dei fuochi:* ne consegue che la distanza tra il Sole e un qualsiasi pianeta cambia di continuo.

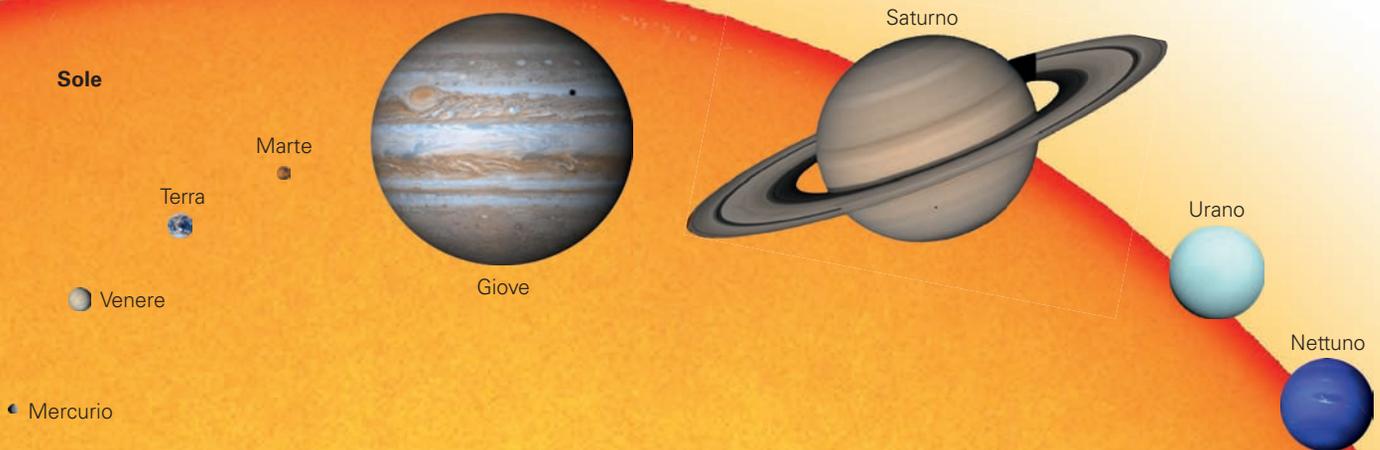
**II legge.** *Il raggio vettore di un pianeta (che unisce il centro del pianeta al centro del Sole) descrive aree uguali in tempi uguali:* ne consegue che la velocità di rivoluzione di un pianeta non è costante. Se il pianeta percorre il tratto di orbita in prossimità del punto più vicino al Sole (*perielio*), si muove più velocemente; se si trova nella parte di orbita prossima al punto più lontano dal Sole (*afelio*), si muove più lentamente.

**III legge.** *I quadrati dei tempi di rivoluzione dei pianeti intorno al Sole sono proporzionali al cubo della distanza media dal Sole ( $P^2 = ka^3$ ;  $k$  è uguale a 1, se i tempi sono espressi in anni terrestri e le distanze in UA).*

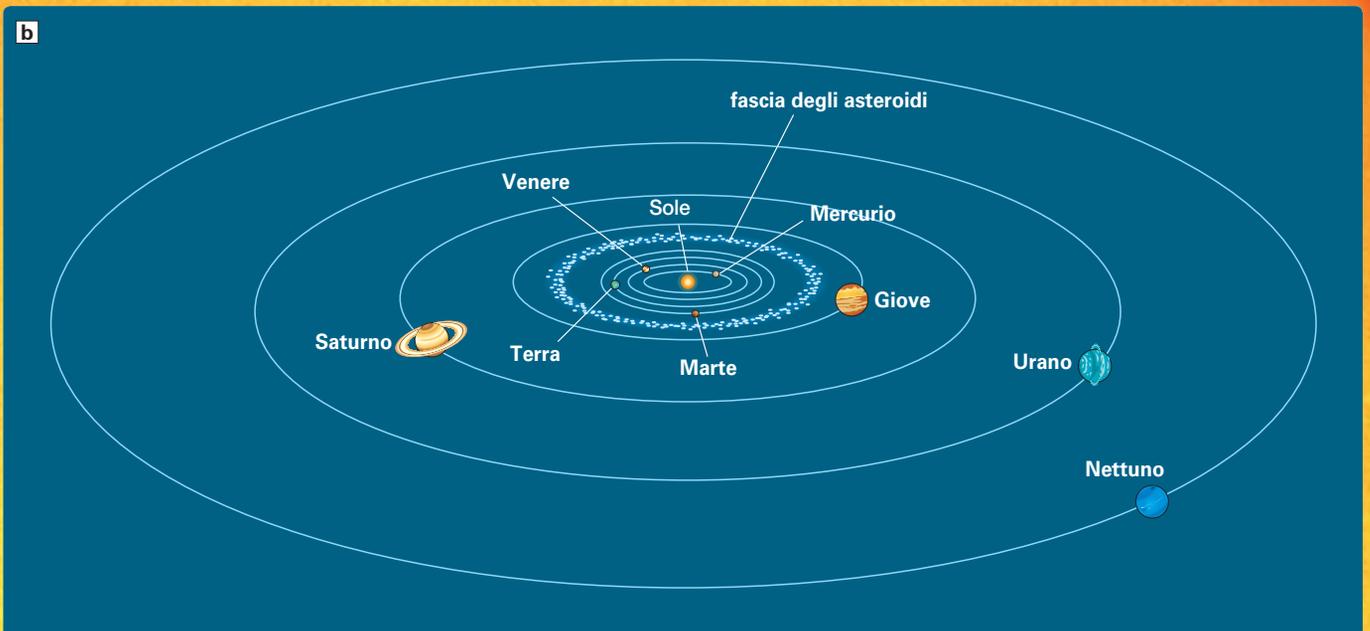
Le leggi di Keplero si limitano a descrivere il

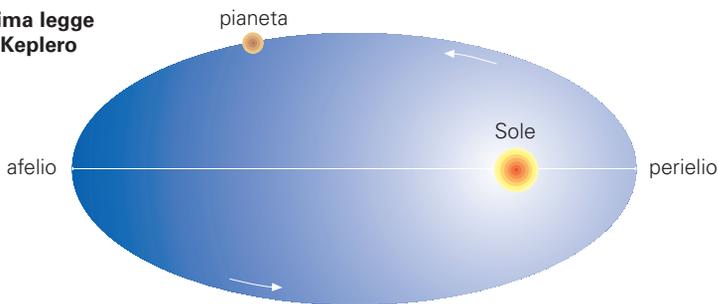
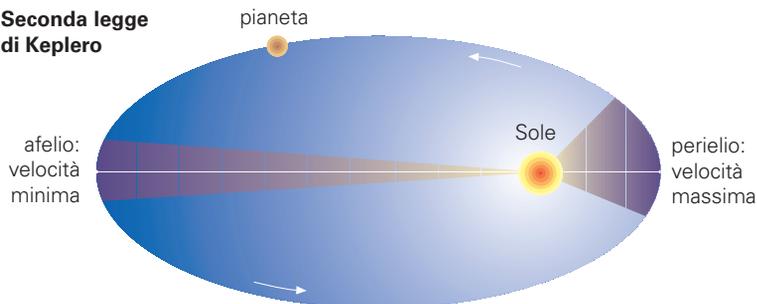
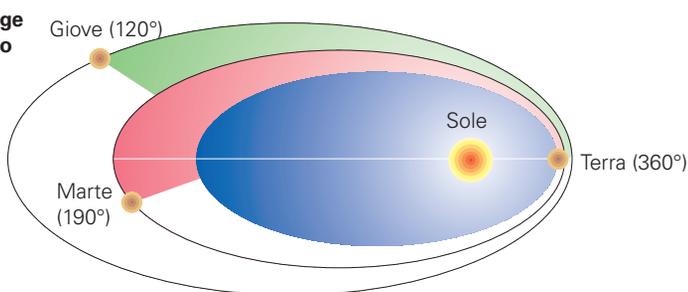
**10** a) Rappresentazione delle dimensioni relative dei pianeti e del Sole.  
b) Le orbite dei pianeti del sistema solare sono quasi complanari.

a



b



**Prima legge di Keplero****Seconda legge di Keplero****Terza legge di Keplero**

**11** Le tre leggi di Keplero.

moto dei pianeti, senza risalire alle sue cause. La soluzione del problema fu individuata da Newton nella forza di gravità. Applicando la **legge di gravitazione universale**

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

al Sole ( $m_1$ ) e a un pianeta qualsiasi del sistema solare ( $m_2$ ), scopriamo che esiste un'attrazione

reciproca: di conseguenza, sia il Sole sia il pianeta si muovono intorno a un baricentro comune che, a causa dell'enorme differenza di massa tra i due corpi celesti, si trova all'interno del Sole, a una certa distanza dal centro.

### 3.2 Le caratteristiche dei pianeti

I pianeti sono diversi tra loro per dimensioni, orbita, densità, composizione e atmosfera. In prima analisi si possono dividere in due gruppi: Mercurio, Venere, Terra e Marte sono pianeti di *tipo terrestre*, mentre Giove, Saturno, Urano e Nettuno sono pianeti di *tipo gioviano*.

I pianeti terrestri, più vicini al Sole, hanno caratteristiche simili: elevata densità, piccole dimensioni, una superficie solida rocciosa relativamente calda e, a eccezione di Venere, un'atmosfera rarefatta o assente. La Terra si distingue dagli altri tre pianeti per la presenza di un'atmosfera ricca di ossigeno e l'esistenza di abbondante acqua liquida in superficie.

I pianeti gioviani, più lontani dal Sole, sono di grandi dimensioni, molto freddi, con una parte esterna fluida (costituita prevalentemente da idrogeno, elio e metano liquidi o gassosi) e una parte interna solida composta da materiali rocciosi, acqua, ammoniaca, metano e idrogeno solidi: è sempre presente una densa atmosfera poiché i gas sono trattenuti dalla notevole massa.

Tra i due gruppi vi è una fascia di asteroidi.

Tutti i pianeti attuano un moto di rivoluzione intorno al Sole lungo orbite ellittiche e uno di rotazione intorno al proprio asse, ma con notevoli differenze nella loro durata.

Esistono alcune caratteristiche comuni dei moti dei pianeti, probabilmente non casuali, come il fatto che le loro orbite sono quasi complanari e che il verso dei moti di rivoluzione e di rotazione è quasi sempre antiorario (con l'eccezione, per la

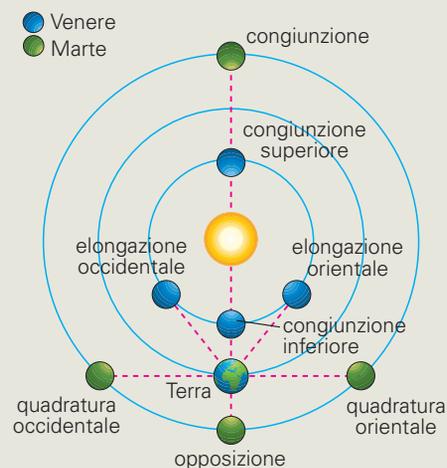
## Scheda 2 Le posizioni dei pianeti

Ogni pianeta, durante il suo moto intorno al Sole, occupa posizioni diverse rispetto alla Terra (1). Si definiscono **pianeti interni** Mercurio e Venere, la cui orbita si trova all'interno di quella terrestre, **pianeti esterni** tutti gli altri.

I pianeti esterni si dicono in **congiunzione** quando, allineati con Sole e Terra, si trovano dalla stessa parte del Sole, quindi alla massima distanza possibile dal nostro pianeta; si definiscono in **opposizione** quando, sempre in allineamento, si trovano alla minima distanza da noi. I pianeti interni sono sempre in congiunzione (*superiore* se si trovano alla massima distanza possibile dalla Terra, *inferiore* se si trovano alla minima distanza).

Se il Sole, la Terra e un pianeta interno non sono allineati, si parla *elongazione* (occidentale o orientale) quando il pianeta si trova alla massima distanza angolare possibile dal Sole. Se infine il Sole, la Terra e un pianeta esterno (o la Luna) formano un triangolo rettangolo con l'angolo retto nella Terra, si dicono in **quadratura**. Mercurio, Venere e la Luna presentano, inoltre, il fenomeno delle **fasi**: appaiono completamente illuminati quando sono al di là del Sole, in ombra totalmente o parzialmente (a falce) quando sono tra noi e il Sole.

**1** Le possibili posizioni di un pianeta rispetto alla Terra.



rotazione, di Venere e Urano). Anche l'inclinazione dell'asse di rotazione rispetto al piano orbitale è simile a quella dell'asse terrestre, con l'eccezione di Urano che ha l'asse rivolto verso il Sole.

Le distanze dei pianeti dal Sole si possono calcolare, in modo approssimato, per mezzo della *legge di Titius-Bode*, secondo la quale:

$$d = (n + 4)/10$$

dove  $d$  è la distanza media del pianeta espressa in Unità Astronomiche e  $n$  è un numero che appartiene alla sequenza numerica 0, 3, 6, 12, 24, 48... (si possono controllare i risultati con i valori indicati dalla **Tabella 2**, tenendo conto che a 24 corrisponde la fascia degli asteroidi).

**Tabella 2** Principali caratteristiche dei pianeti del sistema solare

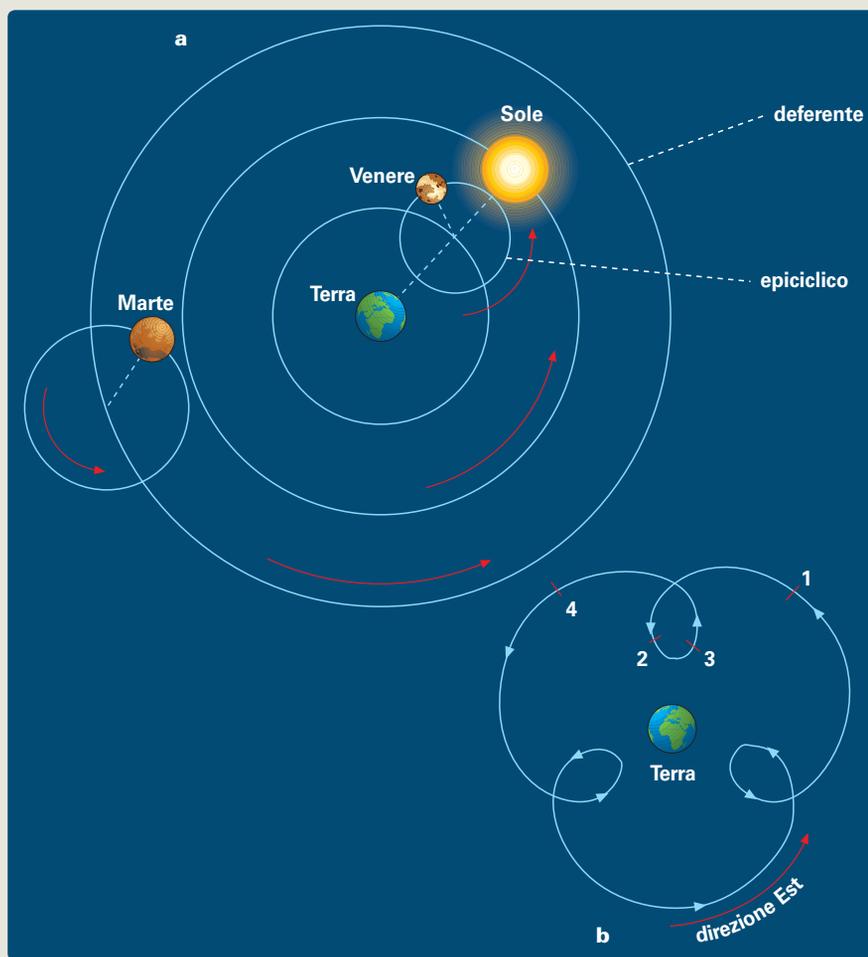
	Mercurio	Venere	Terra	Marte	Giove	Saturno	Urano	Nettuno
massa (Terra = 1)	0,056	0,817	1	0,108	318	95,2	14,6	17,2
Volume (Terra = 1)	0,06	0,88	1	0,15	1316	755	67	57
densità (g/cm <sup>3</sup> )	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,2	1,7
raggio equatoriale (km)	2440	6052	6378	3393	71 500	60 000	25 600	24 750
afelio (milioni di km)	69,8	109	152,1	249,1	815,7	1507	3004	4537
perielio (milioni di km)	45,9	107,4	147,1	206,7	740,9	1347	2735	4456
distanza media dal Sole (UA)	0,387	0,723	1	1,524	5,203	9,540	19,18	30,07
periodo di rivoluzione	88,97 giorni	224,70 giorni	365,26 giorni	686,98 giorni	11,86 anni	29,46 anni	84,02 anni	164,8 anni
periodo di rotazione	59 giorni	-243 giorni di rotazione retrograda	23 h 56 min 4 s	24 h 37 min 23 s	9 h 50 min 30 s	10 h 14 min	-16 h rotazione retrograda	15 h 48 min
velocità orbitale media (km/s)	47,9	35	29,8	24,1	13	9,6	6,8	5,4
inclinazione equatoriale / orbita	0°	177° 3'	23° 27'	23° 59'	3° 0,5'	26° 44'	82° 5'	28° 48'
inclinazione dell'orbita rispetto all'eclittica	7°	3,4°	-	1,8°	1,3°	2,5°	0,8°	1,8°
eccentricità dell'orbita	0,206	0,007	0,017	0,093	0,048	0,056	0,047	0,008
temperatura media (K)								
diurna	683	720	295	300	313	223	123	123
notturna	130	239	275	170	123	103	103	103
accelerazione di gravità alla superficie (m/s <sup>2</sup> )	3,58	8,87	9,8	3,74	26,01	11,17	10,49	13,25
atmosfera (componenti principali)	nessuno	CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> Ar	H <sub>2</sub> He	H <sub>2</sub> He CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> He CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> He CH <sub>4</sub>
numero di satelliti	0	0	1	2	16 + anelli	22 + anelli	15 + anelli	8 + anelli

## Scheda3 Il modello geocentrico

Quando si parla di sistema geocentrico, si fa riferimento all'*Almagesto*, opera dell'astronomo alessandrino Claudio Tolomeo (II secolo d.C.), conosciuta in Occidente grazie alla traduzione e alla diffusione operata dagli Arabi. In esso, Tolomeo elaborò un complesso sistema "ad orologeria", costituito da 55 sfere in movimento. In base al principio platonico, dominante nel pensiero greco, di "subordinare le leggi a principi trascendenti o divini, salvando però i fatti", egli cercò di conciliare le evidenti irregolarità osservate nei moti dei pianeti con il fatto che tali moti *dovevano* essere circolari e uniformi, in quanto perfetti. Riprese, perciò, le teorie di Ipparco su **epicicli** e **deferenti** e in questo modo spiegò i moti retrogradi dei pianeti (ossia l'apparente inversione della loro direzione di moto). Secondo Tolomeo, i pianeti si muovevano di moto uniforme su circonferenze, gli *epicicli*, il cui centro a sua volta si muoveva su circonferenze di diametro maggiore, i *deferenti*, con al centro la Terra (1). La composizione di questi due moti giustificava il fatto che Marte o Venere, osservati dalla Terra, sembrano a un certo punto fermarsi e invertire il loro moto; vi erano tuttavia altre irregolarità da spiegare: per esempio, la Luna e il Sole non avevano moti retrogradi (quindi non si muovevano su epicicli), ma variavano la loro velocità angolare durante il moto mensile (la prima) e annuale (il secondo). Tolomeo introdusse allora l'**eccentrico** (2), per mezzo del quale il centro del deferente del Sole non verrebbe più a coincidere con la posizione della Terra e il moto uniforme del Sole non apparirebbe uniforme se osservato dal nostro pianeta. Un accorgimento simile, l'**equante**, permise di spiegare le variazioni della velocità dei pianeti e della loro distanza dalla Terra: secondo Tolomeo il loro moto era uniforme rispetto a un punto, l'equante, che era simmetrico alla posizione della Terra rispetto al centro del deferente. Ogni pianeta fu dotato di epiciclo e deferente specifici: Mercurio e Venere furono collocati tra la Luna e il Sole, mentre Marte, Giove e Saturno si trovavano oltre il Sole.

I successori di Tolomeo complicarono maggiormente il modello geocentrico, sovrapponendo epicicli su epicicli nel tentativo di conciliare teoria e osservazioni astronomiche, e riducendo l'astronomia a un problema geometrico.

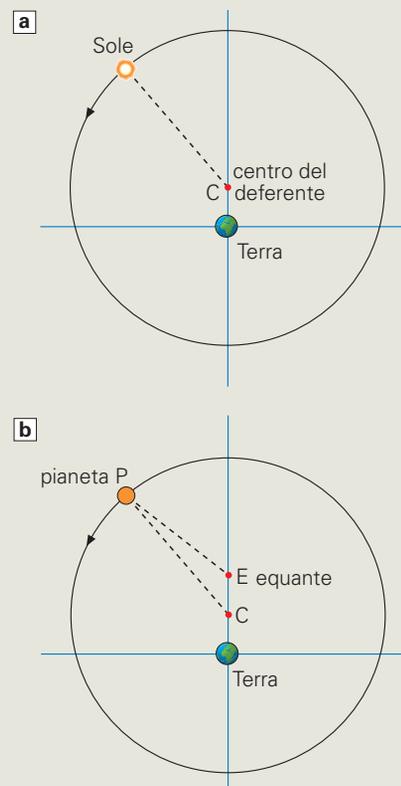
Il successo innegabile di questo modello, che dominò il pensiero scientifico per quattordici secoli nonostante l'evidente complessità, ha molte cause: in primo luogo è una visione della realtà vicina al



1 Epicicli e deferenti (a). La loro composizione spiega il moto retrogrado dei pianeti (b).

senso comune (non vi sono prove evidenti dei movimenti della Terra). Inoltre gli astronomi medievali non erano in grado di effettuare misurazioni precise del tempo (essenziale per avere dati confrontabili) e nemmeno, a occhio nudo, di percepire gli spostamenti apparenti di una stella rispetto ad un'altra (aberrazione stellare, parallasse), che avrebbero dimostrato l'esistenza dei moti della Terra (Unità 5, § 5). Non dimentichiamo, infine, che la teologia cristiana adottò totalmente il pensiero aristotelico e creò un connubio tra scienza e religione, che impedì per molto tempo che si potesse mettere in dubbio il geocentrismo senza correre il rischio di essere considerati eretici.

Ma nel XVI secolo questo modello cosmologico entrò in crisi, malgrado spiegasse con sufficiente precisione (per l'epoca) i moti dei corpi celesti, perché lo faceva in modo evidentemente farraginoso e artificioso, come dimostra il seguente aneddoto. Alfonso X di Castiglia, dopo aver studiato i segreti dell'astronomia, disse: "Se l'Onnipotente avesse chiesto il mio parere prima di imbarcarsi nella creazione, gli avrei consigliato qualcosa di più semplice!"



2 Eccentrico (a) ed equante (b).

### 3.3 Mercurio: un pianeta dal moto anomalo

Mercurio (♿12) è il più piccolo dei pianeti interni e anche il più vicino al Sole. Il moto di rivoluzione ha un periodo di circa 88 giorni terrestri e quello di rotazione di circa 58 giorni terrestri, con un rapporto 3:2 (ogni tre rotazioni, due rivoluzioni). Per questo motivo il pianeta rivolge, per molto tempo, la medesima faccia verso il Sole e di conseguenza la temperatura superficiale raggiunge valori elevati nelle zone illuminate (intorno ai 420 °C) e valori molto bassi (intorno a -180 °C) nelle zone al buio. L'escursione termica è molto forte anche a causa dell'assenza di acqua e atmosfera.

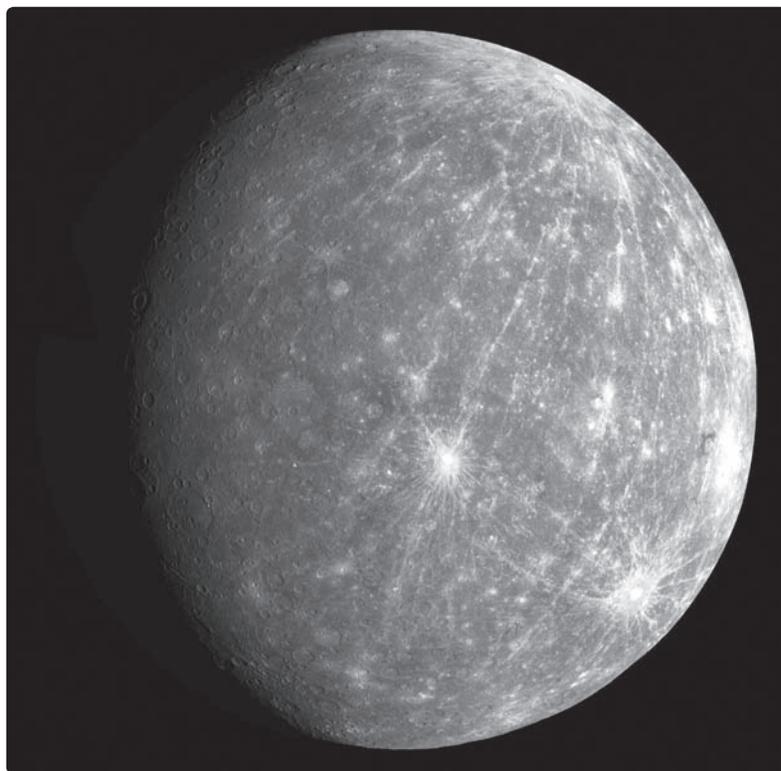
La maggior parte dei dati sulle caratteristiche superficiali del pianeta è stata fornita dalla sonda Mariner 10 che, tra il 1974 e il 1975, lo ha sorvolato e fotografato dalla distanza di soli 800 km. La superficie appare simile a quella lunare, costellata da crateri da impatto, prodotti dalla caduta di meteoriti. Mercurio ha una densità simile a quella terrestre e possiede un campo magnetico che fa supporre l'esistenza di un nucleo di ferro a elevata densità, analogamente alla Terra.

L'orbita di Mercurio è un'ellissi con notevole schiacciamento, e presenta anomalie che non si conciliano con le leggi di Newton: in particolare, la precessione del perielio (spostamento in senso contrario alla rivoluzione) ha trovato la sua spiegazione solo nella teoria della relatività di Einstein (il fenomeno non è così evidente per gli altri pianeti perché sono più lenti nella rivoluzione attorno al Sole).

### 3.4 Venere: il pianeta più luminoso

Venere è l'oggetto più luminoso del cielo notturno (dopo la Luna) ed è il pianeta più vicino alla Terra. È visibile con facilità a occhio nudo, soprattutto all'alba e al tramonto (per questo nel passato fu chiamato *Lucifero*, "portatore di luce", e *Vespero*, "stella della sera"). Galileo osservò le fasi di Venere (simili a quelle lunari) al cannocchiale e si rese conto della variazione, nel tempo, della distanza tra il pianeta e la Terra.

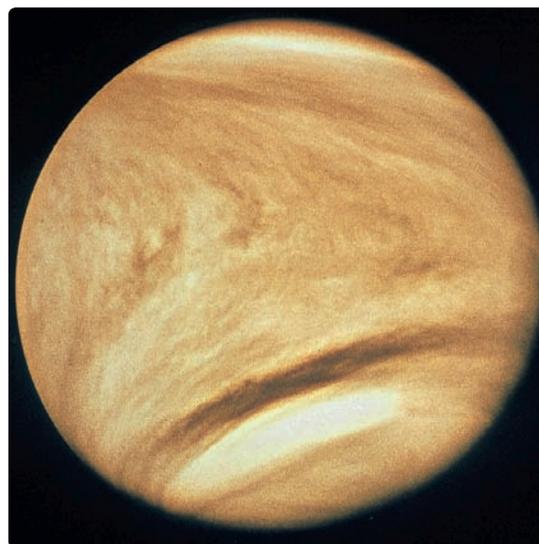
L'osservazione con il telescopio della superficie di Venere è impedita da una spessa coltre di nubi giallognole, di elevato potere riflettente (da cui l'elevata luminosità del pianeta). Per questo motivo, nella seconda metà del secolo scorso, furono inviate numerose sonde (le russe Venera e le americane Mariner, Pioneer Venus e Magellano): queste hanno tracciato una mappa dettagliata della superficie del pianeta, attraversando con onde radar lo strato di nubi (♿13). Si è scoperta l'esistenza di pianure e di imponenti catene montuose, di vulcani forse ancora attivi e di crateri da impatto, tipici dei pianeti terrestri.



12 Mercurio.

La temperatura superficiale, sia diurna sia notturna, è molto elevata (intorno ai 480 °C), più di quanto farebbe prevedere la distanza dal Sole: si pensa quindi a un notevole "effetto serra", causato dalla presenza preponderante di CO<sub>2</sub> (diossido di carbonio) nell'atmosfera (97%), che contiene anche SO<sub>2</sub> (diossido di zolfo) e piccole quantità di vapore acqueo e azoto. L'elevata densità di questi gas produce una pressione notevolissima (circa 90 atm). Le nubi, costituite da acido solforico e cloridrico a elevata concentrazione, sono in continuo e rapido movimento, trascinate dalla circolazione atmosferica originata da celle convettive presenti tra i poli e l'equatore.

Il moto di rotazione di Venere è retrogrado e ha un periodo di 243 giorni terrestri, mentre il moto di rivoluzione è di 224: il giorno di Venere è quindi più lungo dell'anno!



13 Venere in fase "piena" fotografato dalla sonda Pioneer Venus con un filtro ultravioletto, per mettere in evidenza lo strato nuvoloso.

## Scheda 4 Il modello eliocentrico

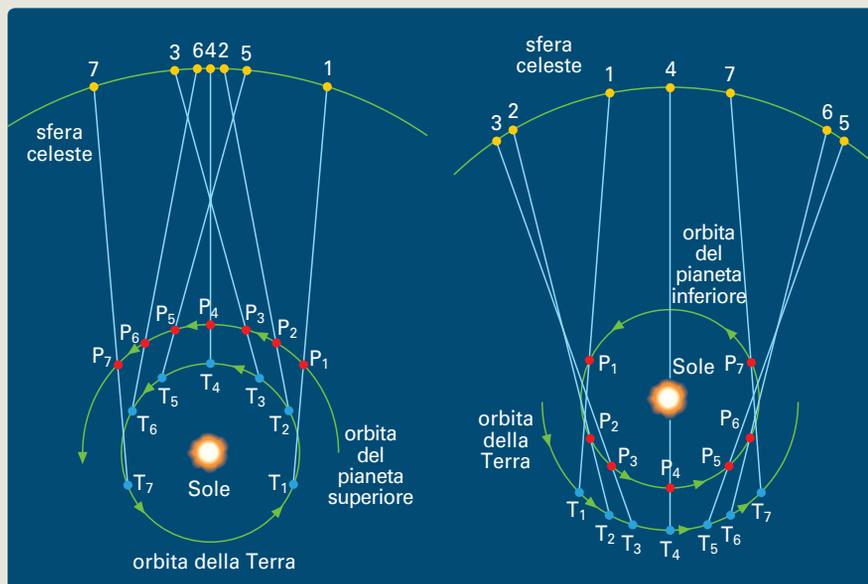
Lo studioso che fece crollare il modello geocentrico fu, paradossalmente, un seguace di Tolomeo, **Niccolò Copernico** (1473-1543) con l'opera *De revolutionibus orbium coelestium*. Egli si proponeva soltanto di semplificare il modello geocentrico, rimanendo del tutto fedele all'idea che i pianeti attuassero moti circolari e uniformi, e senza negare l'esistenza di epicicli ed eccentrici. Venne però a conoscenza delle idee di Aristarco di Samo (310-250 a.C.), il quale aveva ipotizzato che fosse la Terra a ruotare intorno al Sole e non viceversa, e quindi collocò il Sole al centro del sistema, con tutti i pianeti in rotazione attorno a esso. Spiegò così in modo più semplice i moti retrogradi dei pianeti (➡1) e la variazione, nel tempo, della loro distanza dalla Terra.

Tale visione della realtà incontrò feroci opposizioni per motivi teologici e filosofici, poiché contrastava con asserzioni presenti nella Bibbia e soprattutto toglieva la Terra (e quindi l'uomo) dal centro dell'universo. Ma anche dal punto di vista scientifico, il modello di Copernico non aveva prove a suo favore (non riuscì a misurare alcuno spostamento parallattico delle stelle vicine rispetto a quelle lontane, per mancanza di strumentazione adeguata) e non spiegava i moti dei pianeti con maggiore precisione del modello geocentrico. Solo l'opera di grandi scienziati come Keplero, Galileo e Newton renderà questo modello aderente alla realtà e lo farà accettare universalmente.

Non mancarono tentativi di conciliare i due sistemi: l'astronomo danese **Tycho Brahe** (1546-1601) elaborò un modello dei moti planetari che vedeva la Terra immobile al centro, il Sole e la Luna ruotare intorno ad essa, i pianeti e le stelle ruotare intorno al Sole (➡2).

**Giovanni Keplero** (1571-1630), assistente di Tycho Brahe a Praga, proseguì lo studio del moto di Marte iniziato dal suo maestro: si trattava di un moto molto irregolare, difficilmente spiegabile tanto con il geocentrismo tolemaico quanto con l'eliocentrismo copernicano. Falliti vari tentativi di conciliare i dati con l'ipotesi tradizionale di un moto circolare uniforme del pianeta, giunse a una conclusione: l'orbita di Marte non era circolare e il suo moto non era uniforme, ma presentava accelerazioni e rallentamenti. Nacquero in questo modo le tre leggi di Keplero (*Astronomia Nova*, 1601).

**Galileo Galilei** (1564-1642) può essere definito il padre dell'astronomia moderna: non solo utilizzò il cannocchiale per le sue osservazioni, ma teorizzò i principi



1 Il sistema copernicano: Copernico spiega così il moto di recessione dei pianeti esterni (a) e dei pianeti interni (b). La Terra si sposta da T1 a T7 e il pianeta si sposta da P1 a P7. Le posizioni apparenti del pianeta sulla sfera celeste variano da 1 a 7. Quando la Terra sorpassa (a) o viene sorpassata (b) dal pianeta, questo sembra "tornare indietro" (da 3 a 5).

fondamentali del metodo scientifico, insistendo sulla necessità che le teorie, per essere tali, dovessero essere confortate da prove sperimentali («i discorsi nostri hanno ad essere intorno al mondo sensibile e non sopra al mondo di carta»). Le sue osservazioni lo portarono a scoperte eccezionali: la presenza di avvallamenti, altipiani e montagne sulla superficie lunare; le macchie solari come prove del moto rotatorio del Sole; i satelliti di Giove come esempio di sistema solare; le fasi di Venere come prova del fatto che questo pianeta ruota intorno al Sole. Le osservazioni al cannocchiale permisero, inoltre, di comprendere come la Via Lattea fosse un insieme di stelle molto più distanti di quelle visibili a occhio nudo e di stabilire che i pianeti dovevano essere molto più vicini a noi rispetto alle stelle, poiché a forte ingrandimento i primi apparivano come oggetti sferici, mentre le seconde rimanevano puntiformi. In ogni modo, il maggiore merito di Galileo fu quello di avere sostenuto e propagandato il modello copernicano: nella sua opera più importante, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632), mise a confronto il modello tolemaico e quello copernicano, dimostrando la fondatezza del secondo. Benché la pubblicazione dell'opera fosse autorizzata dall'autorità ecclesiastica ed egli sostenesse che la visione eliocentrica non fosse in contrasto con la

Bibbia, fu processato dall'Inquisizione (1633) e condannato all'isolamento, che durò sino alla sua morte.

**Isaac Newton** (1642-1727), con la teoria della gravitazione universale, diede una spiegazione fisica del moto dei pianeti. La teoria permise di giustificare le traiettorie dei pianeti del sistema solare con l'attrazione gravitazionale del Sole, e le loro perturbazioni con l'attrazione degli altri pianeti. In questo modo si spiegavano le leggi empiriche di Keplero e si dava loro una base teorica, unificandole in un'unica teoria.

2 Il modello planetario misto di Tycho Brahe: i pianeti ruotano intorno al Sole, ma il Sole ruota intorno alla Terra.



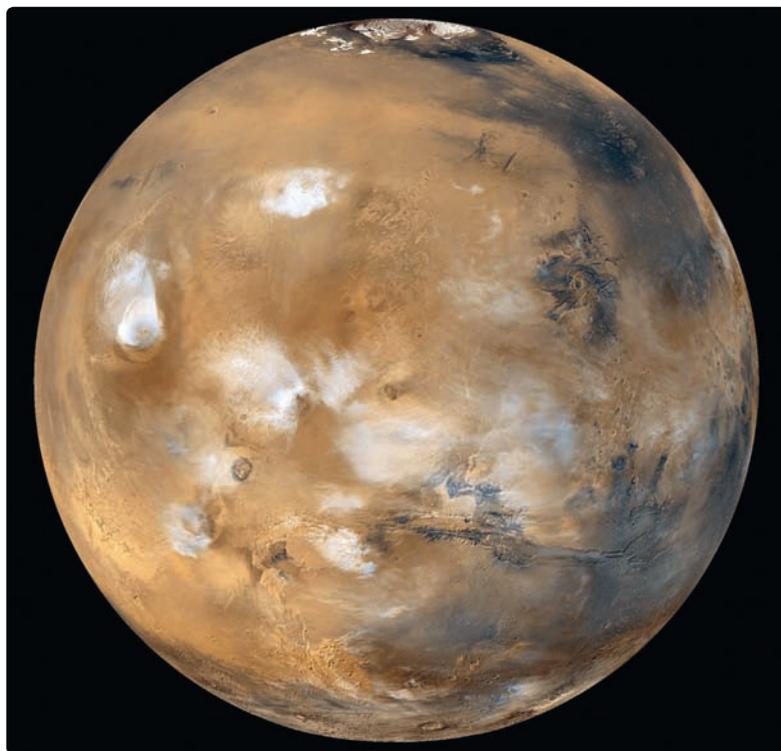
### 3.5 Marte: il pianeta rosso

Marte (☿14) è facilmente riconoscibile al telescopio per il colore rossastro e le calotte polari bianche, la cui estensione presenta variazioni stagionali. Ha un diametro dimezzato rispetto alla Terra, ma la durata del giorno è identica al giorno terrestre (mentre quella dell'anno è di 687 giorni) e l'asse di rotazione ha la stessa inclinazione di quello della Terra, con conseguente alternanza delle stagioni: se a questo aggiungiamo che la temperatura media è sotto gli 0 °C, ma che all'equatore l'escursione termica va da -70 °C di notte a +15 °C durante il dì (non molto diversamente da quanto accade in Siberia), si può capire perché si è ipotizzata la possibile esistenza di forme di vita su Marte. Nell'800 l'astronomo Schiaparelli arrivò addirittura a immaginare la presenza di esseri intelligenti, poiché aveva creduto di distinguere canali artificiali sulla superficie del pianeta (ma si trattava di un'illusione ottica).

L'esplorazione di Marte iniziò negli anni '60 del '900 con le sonde Mariner, che inviarono migliaia di immagini fotografiche della superficie del pianeta. Nel 1975 le sonde Viking 1 e 2, costituite da una parte orbitante (*orbiter*) e da un modulo adatto all'atterraggio e all'analisi del suolo (*lander*), ricercarono i segni della presenza di forme di vita microscopica su Marte: i risultati ottenuti furono contraddittori, ma tra gli scienziati ha prevalso l'idea che l'attività del suolo sia chimica e non biologica. In ogni modo, queste missioni hanno migliorato la nostra conoscenza del pianeta rosso. Negli anni '90 e all'inizio del nuovo millennio, l'esplorazione di Marte è ripresa con rinnovata energia, grazie al successo di missioni come Mars Global Surveyor, Mars Pathfinder e Mars Exploration Rover della NASA e Mars Express dell'ESA (Scheda 6). I dati raccolti ci permettono di affermare che Marte ha una superficie simile a quella lunare, ricca di crateri, sia da impatto, sia di origine vulcanica. Vi sono anche altipiani, mari simili a quelli lunari e montagne vulcaniche di notevoli dimensioni: la maggiore è il monte Olimpo, il più grande vulcano del sistema solare (27 km di altezza). I vulcani di Marte sono probabilmente inattivi e anche l'attività sismica è ridotta, ma la superficie del pianeta mostra i segni di queste attività passate ed è attualmente sottoposta all'azione di vari agenti: caduta di meteoriti, erosione e deposito eolici (dovuti al vento).

L'atmosfera è molto rarefatta e costituita prevalentemente da diossido di carbonio, ma è sufficiente a produrre correnti aeree, sollevando polveri e causando erosione. Le rocce presenti al suolo sono simili ai basalti terrestri; le polveri sono ricoperte di ossido di ferro rossastro, che dà il tipico colore al pianeta.

Sono stati inoltre osservati i segni dell'azione di acque fluviali (valli, meandri, canali), a dimostrare che un tempo l'acqua allo stato liquido era ab-



bondante su Marte: per giustificare la fusione dei ghiacci a temperature medie così basse si è pensato all'attività vulcanica o all'impatto con meteoriti, ma il problema per ora è irrisolto. Attualmente, almeno in superficie, l'acqua allo stato liquido è praticamente assente: nelle calotte polari esiste acqua allo stato solido, ricoperta da uno strato di ghiaccio secco (anidride carbonica solida) e altra acqua potrebbe essere imprigionata nel sottosuolo. Probabilmente, però, la maggior parte dell'acqua è evaporata disperdendosi nello spazio, a causa della bassa attrazione gravitazionale.

Marte ha due piccoli satelliti: Phobos ("spavento") e Deimos ("terrore"), forse asteroidi catturati dal campo gravitazionale del pianeta.

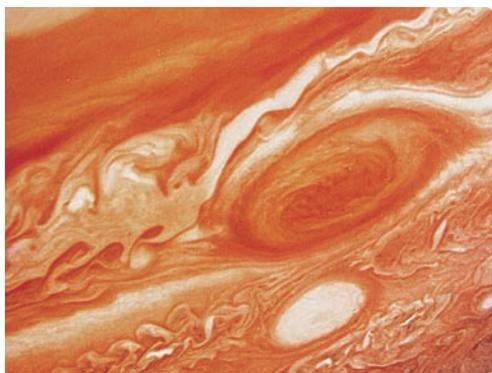
### 3.6 Giove: il gigante

Giove (☿15 a pagina seguente) è ben distinguibile nel cielo notturno, a causa della notevole luminosità e del colore giallo. È il primo dei pianeti gassosi, il più grande del sistema solare: il suo diametro è 11 volte quello terrestre e il suo volume 1300 volte maggiore. Se la massa di Giove fosse stata 10 volte più elevata, la sua composizione gli avrebbe permesso di innescare reazioni termonucleari e di trasformarsi in una stella.

Il suo periodo di rivoluzione è di dodici anni terrestri, ma il periodo di rotazione è breve (meno di dieci ore). L'elevata velocità di rotazione produce un forte schiacciamento polare, anche perché la parte esterna del pianeta, fluida, si muove a velocità angolare maggiore all'equatore. L'osservazione al telescopio rivela la presenza di una densa atmosfera, costituita principalmente di elio e idrogeno (come nel Sole), con tracce di vapor d'acqua, me-

**14** Marte fotografato nel giugno del 2003, quando era a una distanza minima dalla Terra (56 milioni di chilometri).

**15** Giove fotografato da Voyager 1 alla distanza di solo 22 milioni di km (un ventesimo della distanza Terra-Giove). Appare evidente l'aspetto a strisce di diversi colori.



**16** La Grande Macchia Rossa di Giove, situata a 22° di latitudine Sud.

**17** Saturno e i suoi anelli ripresi dal telescopio spaziale Hubble.

tano, ammoniaca e solfuro di idrogeno. Nubi di ammoniaca e solfuro condensati, trascinati da forti venti, conferiscono a Giove il caratteristico aspetto a bande chiare e scure che scorrono parallele all'equatore. Le sonde Pioneer e Voyager inviate sul pianeta negli anni '70, per mezzo di analisi delle emissioni nei campi del visibile e dell'infrarosso, hanno dimostrato che le zone chiare sono più fredde di quelle scure. Si potrebbe trattare di nubi in risalita

(alta pressione) e in discesa (bassa pressione). La regolare disposizione delle bande a volte si interrompe per la presenza di intensi moti convettivi: questi formano macchie come la Grande Macchia Rossa (☞16), più grande della Terra intera, che ruota vorticosamente in senso orario. La causa di questi movimenti di enormi masse di gas è in parte l'irradiazione solare, ma soprattutto l'emissione di calore dall'interno del pianeta che si sta raffreddando (emette infatti energia sotto forma di radiazioni infrarosse 2,5 volte quanta ne riceve dal Sole). La temperatura media è in ogni modo molto bassa, intorno a -140 °C.

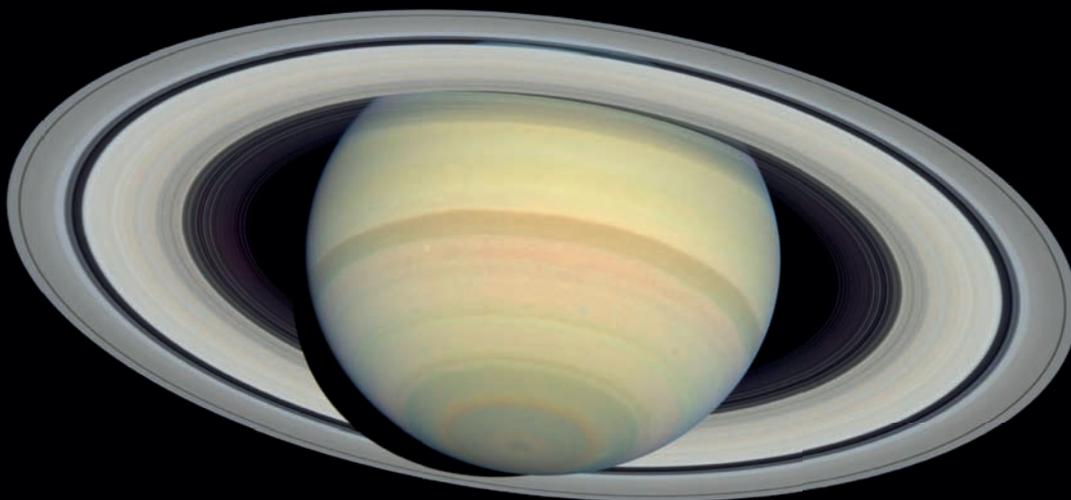
La struttura di Giove è stratificata: esternamente si trova uno strato di atmosfera di circa 1000 km; quindi l'idrogeno passa allo stato liquido per l'elevata pressione e forma uno strato spesso circa 24 000 km. Successivamente si trova uno strato di idrogeno metallico, liquido ultracompresso di idrogeno molecolare, con elettroni liberi di muoversi e quindi buon conduttore di elettricità e calore (è uno stato fisico previsto teoricamente, ma mai sperimentato sulla Terra). Alla profondità di circa 60 000 km (su un totale di 70 000 km) si trova un nucleo costituito da metalli pesanti.

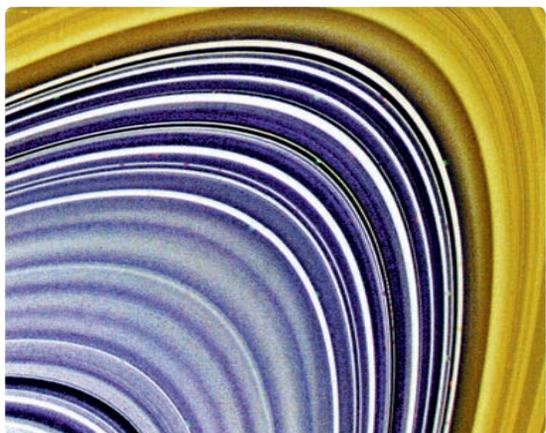
Giove ha un forte campo magnetico, di cui sono responsabili i moti convettivi nello strato di idrogeno metallico.

Attorno a Giove orbitano un sottile anello di particelle solide e 16 satelliti: i quattro maggiori, Io, Europa, Ganimede e Callisto (in ordine di distanza da Giove), sono detti galileiani, perché scoperti dallo scienziato italiano nel 1610. Le sonde Voyager e Galileo (negli anni '90) hanno rivelato che sono tutti privi di atmosfera, ma diversi tra loro: Io è sede di un'intensa attività vulcanica; Europa ha una superficie coperta da uno spesso e liscio strato di ghiaccio d'acqua, sotto il quale esiste acqua liquida e fangosa e quindi un nucleo roccioso; Ganimede, il più grande satellite del sistema solare, e Callisto sono un miscuglio di ghiaccio e rocce, con la superficie segnata da molti crateri da impatto; entrambi possiedono acqua liquida al loro interno.

### 3.7 Saturno: il pianeta degli anelli

Saturno (☞17) si trova a una distanza dal Sole più che doppia rispetto a Giove e ha dimensioni lievemente inferiori a esso, ma gli assomiglia notevolmente nella struttura: uno strato di idrogeno gassoso forma l'atmosfera, che sfuma in uno strato di idrogeno liquido; all'interno un nucleo di roccia e ghiaccio. Ruota molto velocemente (periodo di 10 ore circa) e ha un notevole schiacciamento polare.





**18** Particolare degli anelli di Saturno in falsi colori.

Le nubi formano strisce chiare e scure, parallele all'equatore, e le turbolenze atmosferiche producono vortici.

È anche dotato di un intenso campo magnetico ed emette energia in quantità superiore a quella ricevuta dal Sole. La temperatura superficiale si aggira intorno a  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Caratteristica particolare è la densità media del pianeta (0,7), la più bassa del sistema solare. Saturno è circondato da una ventina di satelliti di ghiaccio e roccia (il maggiore è Titano), ma la curiosità degli astronomi si è rivolta soprattutto agli anelli, da quando, nel '600, sono stati scoperti al cannocchiale dagli astronomi C. Huygens e G.D. Cassini. Sono costituiti da polvere e frammenti rocciosi di piccole dimensioni ricoperti di ghiaccio: le osservazioni al telescopio avevano permesso di individuare tre anelli principali (indicati con A, il più esterno, B e C), ma le immagini inviate dalle sonde Voyager hanno consentito di individuare sette anelli principali, a loro volta formati da migliaia di anelli minori.

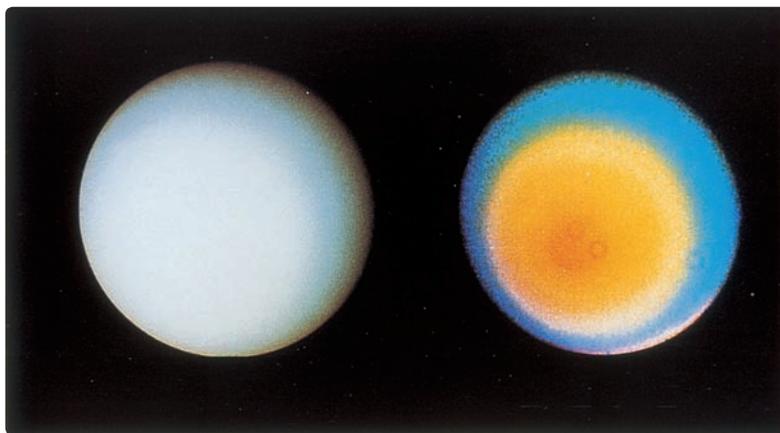
Lo spessore del sistema di anelli è di poche centinaia di metri, ma la larghezza è di 200 000 km. Si ritiene che gli anelli derivino dai resti di un satellite distrutto dall'attrazione gravitazionale del pianeta (E18).

### 3.8 Urano: un pianeta perturbato

Urano (E19), scoperto nel 1781 dai fratelli Herschel, è un pianeta gigante di tipo gioviano, con un'atmosfera di idrogeno, elio e metano (responsabile della colorazione turchese del pianeta), uno strato intermedio liquido con gli stessi componenti e un nucleo roccioso.

Ha una temperatura media di  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La sua maggiore particolarità consiste nell'aver l'asse di rotazione quasi giacente sul piano orbitale. Poiché l'asse si mantiene parallelo a se stesso durante il moto di rivoluzione (periodo di 84 anni), il pianeta rivolge ogni polo verso il Sole per 40 anni circa. La rotazione è di tipo retrogrado (come Venere).



Grazie alla sonda Voyager 2 (1986), sono stati individuati altri 12 piccoli satelliti, oltre ai 5 visibili dalla Terra (in ordine di grandezza: Oberon, Titania, Umbriel, Ariel, Miranda) e un sistema di dieci anelli molto sottili, costituiti da frammenti di circa un metro di dimensione.

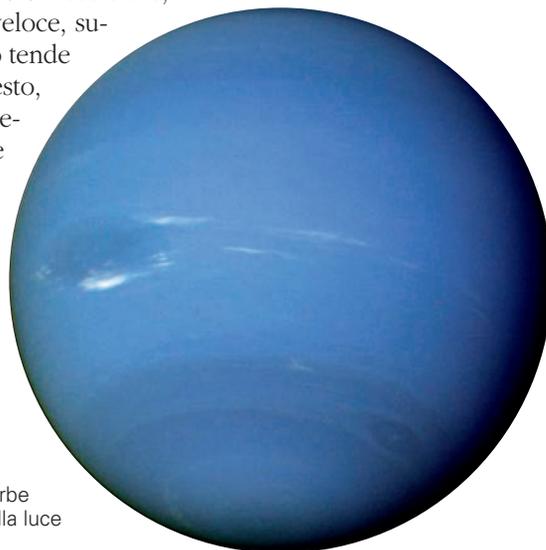
Il moto di rivoluzione di Urano presenta anomalie rispetto a quanto prevede la meccanica di Newton: fu quindi ipotizzata l'esistenza di un altro pianeta più esterno, responsabile di queste perturbazioni. Nel 1846 fu effettivamente scoperto Nettuno.

### 3.9 Nettuno: il pianeta gemello

Nettuno (E20), di dimensioni simili a Urano, è costituito da un nucleo di roccia e ghiaccio, circondato da un oceano di ammoniaca e metano liquidi, con un'atmosfera di idrogeno, elio e metano gassosi (a quest'ultimo si deve il colore blu del pianeta). La temperatura media è di circa  $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Il periodo di rivoluzione è di 165 anni terrestri e quello di rotazione di solo 14 ore. La sonda Voyager 2, che lo ha raggiunto nel 1989, ha rivelato l'esistenza di 3 anelli e almeno 8 satelliti (i maggiori sono Tritone e Nereide).

Il motivo per cui Nettuno influisce sul moto di Urano è la differente velocità di rivoluzione: quando Nettuno si trova davanti a Urano, tende a trascinarlo, facendolo accelerare; quando Urano, più veloce, supera Nettuno, questo tende a rallentarlo. Per questo, il moto di Urano presenta accelerazioni e rallentamenti anomali.

**20** Nettuno ripreso da Voyager 2. Le macchie ruotano a diversa velocità poiché il pianeta è fluido. Il colore azzurro è causato dal metano presente nell'atmosfera, che assorbe la componente rossa della luce solare.



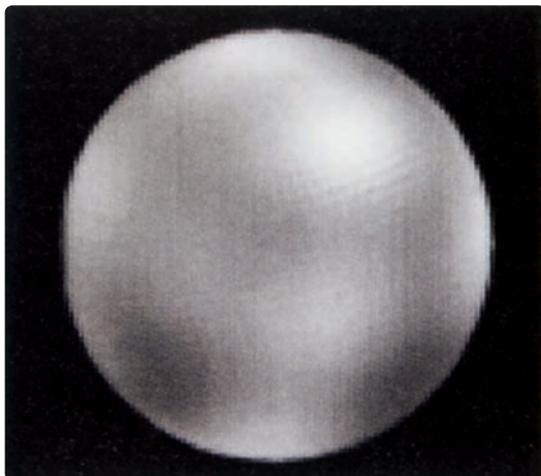
**19** Urano ripreso da Voyager 2. Il colore bluastrò è causato dal metano presente nell'atmosfera, che assorbe la componente rossa della luce solare. A destra, la fotografia è stata elaborata al computer e rivela una notevole foschia verso il polo.

## 4 Pianeti nani, asteroidi e comete

Il termine **pianeta nano** è stato introdotto ufficialmente nella nomenclatura astronomica nel 2006, da un'assemblea dell'Unione Astronomica Internazionale (U.A.I.), fra molte discussioni. Si definisce pianeta nano un corpo celeste di tipo planetario orbitante intorno al Sole (quindi si escludono i satelliti) caratterizzato da una massa sufficiente a conferirgli una forma sferoidale, ma che non è stato in grado di "ripulire" la propria fascia orbitale da altri oggetti di dimensioni confrontabili. L'U.A.I. riconosce attualmente cinque pianeti nani: **Plutone**, **Cerere**, **Eris**, **Haumea** e **Makemake**.

### 4.1 Plutone: da pianeta a pianeta nano

Si è preferito retrocedere Plutone dal rango di pianeta a quello di pianeta nano, per non essere costretti a inserire tra i pianeti corpi celesti (come Eris e Sedna) di dimensioni e caratteristiche simili. L'esistenza di Plutone (♇21), già prevista in base alla presenza di alcune anomalie del moto di Nettuno, venne confermata nel 1930. È l'unico pianeta la cui osservazione è stata effettuata solo al telescopio (in particolare con il telescopio spaziale Hubble). Nel 1978 la scoperta di un satellite, denominato Caronte, ha permesso la determinazione della massa, 5 volte minore di quella della Luna, e del diametro del pianeta (2300 km). Ha una temperatura di circa  $-210$  °C e una densità simile a quella di Giove, ma è privo di atmosfera. All'interno è costituito da polveri e ghiaccio, all'esterno da metano e ammoniaca solidi. Situato a circa 39 UA dal Sole presenta movimenti del tutto particolari: il piano orbitale è notevolmente inclinato rispetto a quello dei pianeti, l'asse di rotazione è disposto sul piano stesso e il moto di rotazione è retrogrado. Inoltre, poiché la massa di Caronte è insolitamente grande rispetto a quella di Plutone, essi ruotano intorno a un baricentro comune, rivolgendosi sempre la stessa faccia uno all'altro.



21 Plutone ripreso dal telescopio Hubble.

Il forte schiacciamento dell'orbita di Plutone lo porta ad occupare in certi periodi (per esempio tra il 1979 e il 1999) una posizione più interna rispetto a Nettuno. Nonostante ciò, Plutone è stato assunto quale elemento di riferimento della classe dei *pianeti nani trans-nettuniani*, denominati ufficialmente **plutoidi** dall'Unione Astronomica Internazionale.

### 4.2 Gli altri pianeti nani

Con i suoi 995 km di diametro, **Cerere** è stato considerato sino al 2006 l'oggetto celeste di maggiori dimensioni nella fascia **principale degli asteroidi** situata tra Marte e Giove (§ 4.3). La sua massa è pari al 40% di quella di tutti gli altri asteroidi della fascia messi insieme, per cui per ora è l'unico ad essere stato promosso a pianeta nano. Cerere venne individuato per la prima volta nel 1801 dall'astronomo italiano Giuseppe Piazzi, che pensò si trattasse del "pianeta mancante" previsto dalla legge di Titius-Bode. Nella fascia principale anche gli asteroidi **Vesta** e **Igea** sono candidati alla categoria dei pianeti nani.

La **fascia di Kuiper** è una regione del sistema solare, esterna rispetto all'orbita dei pianeti, che si estende dall'orbita di Nettuno (30 UA) sino a 50 UA di distanza dal Sole. Nella fascia sono stati scoperti, oltre a Plutone, più di 800 oggetti orbitanti (*Kuiper belt objects*, o **KBO**). Di questi per ora solo **Haumea** e **Makemake** sono stati inseriti nella categoria dei pianeti nani. Il primo, scoperto nel 2005, ha un diametro di 1500 km ed è il più luminoso della fascia di Kuiper dopo Plutone; il secondo, scoperto nel 2004, ha un diametro di circa 1600 km. Si trovano a 43,3 e 45,7 UA dal Sole. Il più grande pianeta nano è però **Eris**, scoperto nel 2005, con i suoi 2400 km di diametro. Si trova a una distanza media dal Sole di 67,7 UA, oltre la fascia di Kuiper, ma viaggia su di un'orbita molto ellittica compiendo una rivoluzione in 556,7 anni. Si ritiene che altri 40 corpi trans-nettuniani (il maggiore è **Sedna**) siano candidabili al ruolo di pianeti nani.

### 4.3 I corpi minori: asteroidi, comete, meteore e meteoriti

Si tratta di oggetti di piccole dimensioni, ma di natura diversa, presenti in quantità considerevole nel sistema solare. I principali sono: asteroidi, comete, meteore e meteoriti.

Gli **asteroidi** (♁22): sono corpi rocciosi di forma spesso irregolare (poiché la forza di gravità non è sufficiente a renderli sferici) e con un diametro che raramente supera i 600 km. La maggior parte di essi si trova concentrata nella zona compresa tra Marte e Giove, detta *fascia degli asteroidi*. In realtà, l'eccentricità dell'orbita di alcuni di essi è tale che si vengono a trovare ben oltre l'orbita di



**22** L'asteroide Gaspra, fotografato dalla sonda Galileo.

Giove nel momento di massima distanza dal Sole. Il primo a essere scoperto, nel 1801, fu Cerere, ora catalogato come pianeta nano; successivamente ne sono stati identificati circa 4000, di cui è stata ricostruita con precisione l'orbita: tra questi citiamo Vesta, Igea, Mathilde, Gaspra e Ida, con un diametro che varia da 500 km a poche decine di chilometri. Si ritiene però che quelli di diametro superiore a 1 km siano più di 40 000.

Non tutti gli asteroidi si trovano nella fascia omonima: due famiglie particolari (i "satelliti troiani") ruotano sull'orbita di Giove, posizionati in due punti "fissi" definiti *lagrangiani*: il *gruppo di Achille* precede Giove a una distanza di circa 60°, il *gruppo di Patroclo* segue il pianeta alla stessa distanza angolare. Esiste infine il *gruppo di Apollo*, che si muove con orbita molto eccentrica tra Mercurio e Marte.

Gli asteroidi, che hanno una massa totale inferiore a quella della Luna, potrebbero essersi originati per frantumazione di piccoli pianeti o, più probabilmente, essere materiale risalente alla formazione del sistema solare, che non si è aggregato a causa di perturbazioni gravitazionali dovute alla vicinanza di Giove e ha quindi mantenuto intatte

le caratteristiche originarie (a differenza dei pianeti): da qui l'interesse degli astronomi. Per tutto l'anno 2000 la sonda NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) è stata in orbita intorno all'asteroide 433-Eros, dando una descrizione particolareggiata della sua superficie.

Gli asteroidi che intersecano l'orbita della Terra (detti NEO, Near Earth Objects) sono tenuti sotto osservazione dagli astronomi, poiché, se dovessero deviare dalla loro orbita, esiste una remota possibilità che collidano con il nostro pianeta. Quest'opera di controllo è però difficoltosa, a causa del loro elevato numero: si stima esistano circa 6000 NEO con diametro fino a 1 km e una decina con diametro di qualche chilometro (come Eros, Castalia e Toutatis).

Le **comete**: sono costituite da una massa solida di poche decine di km di diametro (il nucleo), contenente acqua e anidride carbonica congelate, frammenti rocciosi e metano ("una palla di neve sporca"). Quando si trovano abbastanza vicine al Sole diventano visibili: l'elevata temperatura causa infatti l'evaporazione di una parte dei materiali che le costituiscono, con la formazione di un *chioma* luminosa intorno al nucleo e di una *coda* lunga milioni di chilometri disposta sempre dalla parte opposta rispetto al Sole (per l'influenza del vento solare).

Le comete provengono dalla **nube di Oort**, costituita da miliardi di frammenti di questo tipo e situata agli estremi limiti del sistema solare, tra le 30 000 e le 100 000 Unità Astronomiche dal Sole. Di tanto in tanto una perturbazione gravitazionale provocata da una stella limitrofa fa sì che una cometa si metta in movimento verso il Sole, ma il "viaggio" non è sempre "diretto": a volte uno dei pianeti giganti cattura una cometa im-

## Scheda 5 Apophis: impatto letale?

Scoperto nel 2004, **Apophis** ("Il distruttore") è un asteroide NEO del diametro di circa 300 m che ruota attorno al Sole con un periodo orbitale di circa 323 giorni. A ogni rivoluzione la sua orbita attraversa per due volte quella della Terra. Nel 2029 passerà a soli 36 350 km dal nostro pianeta, una quota di poco superiore a quella dei satelliti artificiali, e per il 13 aprile 2036 si parla di un possibile impatto. Per questo motivo è stato classificato al livello 1 di pericolo di collisione sulla **Scala Torino** (che va da 0, nessuna

probabilità di collisione, a 10, collisione certa e disastro globale) con una probabilità d'impatto stimata pari a 1 su 6250. Occorre aggiungere però che l'incontro ravvicinato del 2029, in cui l'asteroide si troverà a una distanza così ridotta da poter essere individuato a occhio nudo, ne altererà l'orbita, rendendo più incerte le previsioni. Nel dicembre 2009 l'agenzia spaziale russa ha dichiarato l'intenzione di convocare un vertice internazionale per proporre il varo di una missione che

abbia lo scopo di deviare la traiettoria dell'asteroide. Si utilizzerebbe la tecnica del "trattore gravitazionale": un'astronave lanciata molto vicino all'asteroide lo "aggancerebbe" gravitazionalmente e lo devierebbe usando i suoi razzi propulsori. Se Apophis colpisse la Terra sprigionerebbe, secondo alcune stime, un'energia pari a circa 800 megatoni (milioni di tonnellate di tritolo), equivalente a circa 40 000 bombe di Hiroshima. Se cadesse su zone abitate produrrebbe milioni di vittime.

**23** Cometa Hale-Bopp (1997).



mettendola su un'orbita più breve; nella fascia di Kuiper, stazionano sia asteroidi sia comete, forse discese dalla nube di Oort.

Il passaggio delle comete in prossimità del Sole è un fenomeno periodico: per questo motivo si distingue tra *comete a lungo periodo*, che provengono direttamente dalla nube di Oort e possono impiegare anche milioni di anni a compiere il loro tragitto, e *comete a breve periodo*, che derivano dalle prime ma sono ormai interne al sistema solare e perciò si ripresentano all'osservazione ogni 200 anni al massimo. Le comete a breve periodo (se ne conoscono circa 150) ripetono il loro tragitto più volte, sino a esaurirsi (per la perdita di materiale in prossimità del Sole).

Il passaggio di una cometa nel nostro cielo è un fenomeno piuttosto frequente, ma solo ogni 30-40 anni ne appare una molto luminosa. La più famosa tra le comete a breve periodo è la *Cometa di Halley*, con un periodo di 76 anni, le cui apparizioni sono state registrate sin dall'antichità. L'ultimo passaggio in vicinanza della Terra, nel 1986, ha permesso il lancio di diverse sonde spaziali: la sonda Giotto, lanciata dall'ESA (European Space Agency), è passata a soli 600 km dal nucleo, riuscendo a raccogliere dati ed immagini di grande valore scientifico: da questi risulta che il nucleo ha la forma irregolare di una "patata" e dimensioni di 7 km di larghezza e 14 km di lunghezza.

La *Cometa di Encke* è quella con il periodo

più breve (3,3 anni), ma è poco visibile; l'ultima cometa passata vicino alla Terra (a 197 milioni di km) ben visibile a occhio nudo è stata la *Hale-Bopp*, nella primavera del 1997; ha un periodo di 2000 anni (**23**). La prossima sarà Luliu, scoperta nel 2007.

Rimane di incerta classificazione invece *Chiron*: troppo grande per essere una cometa, troppo ricco di ghiaccio per essere un asteroide, forse è il nucleo di una supercometa di dimensioni enormi (centinaia di chilometri di diametro).

**Meteorite e meteoriti:** le meteorite o "stelle cadenti" sono fenomeni luminosi provocati dall'impatto con l'atmosfera di frammenti di comete o asteroidi che si incendiano per l'attrito, consumandosi completamente. In certi periodi dell'anno la Terra entra in zone dello spazio in cui sono presenti sciame di queste particelle, con effetti spettacolari: nella notte di San Lorenzo, il 10 agosto, è visibile lo sciame delle *Perseidi*; tra il 13 e il 16 novembre quello delle *Leonidi*.

Le meteorite hanno la medesima origine ma non bruciano completamente e quindi raggiungono il suolo. Generalmente, per fortuna, arrivano sulla superficie terrestre solo frammenti piccolissimi (che, in ogni caso, assommano globalmente a migliaia di tonnellate di materiale al giorno!), ma le dimensioni possono essere maggiori. La meteorite più grande caduta sulla Terra è probabilmente quella che ha prodotto, in tempi remoti, il Meteor Crater in Arizona (1200 m di diametro e 200 m di profondità) (**24**), ma molto più di recente un asteroide di circa 30 m di diametro è precipitato in Siberia con effetti devastanti (nel 1908, a Tunguska).

In base alla loro composizione, le meteorite si suddividono in *sideriti*, che contengono principalmente ferro e nickel, *lititi*, che contengono silicati, e *litosideriti*, miste.

Le lititi più comuni sono le **condriti**, contenenti sferette di minerali vetrosi (condrule) che non esistono sulla Terra. Sono infatti antichissime (soprattutto le condriti carbonacee) e si suppone che contengano i medesimi materiali che hanno dato origine al sistema solare.

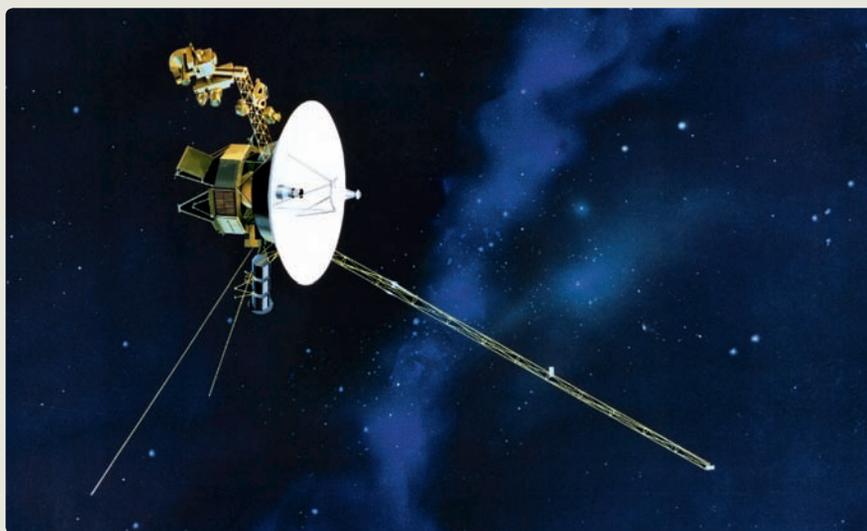
**24** Meteor Crater, in Arizona (USA).



## Scheda 6 L'esplorazione del sistema solare

L'esplorazione spaziale è nata nella seconda metà del XX secolo: le sonde lanciate dalla Terra hanno raggiunto tutti i pianeti del sistema solare. Ciò non significa che queste imprese siano prive di difficoltà: in primo luogo occorre una forza di propulsione notevole per raggiungere la velocità di fuga (per la Terra, 11,2 km/s) che permetta a un pesante veicolo spaziale di staccarsi dal nostro pianeta. Per motivi pratici ed economici si sfrutta la forza centrifuga prodotta dal moto di rivoluzione della Terra, preferendo una fuoriuscita tangenziale dal campo gravitazionale terrestre e una traiettoria curva che non punta direttamente al pianeta di arrivo. Si cerca inoltre di sfruttare, per risparmiare carburante, il campo gravitazionale del Sole o di un pianeta per dare alla navicella spaziale una "spinta" propulsiva.

La lunga durata delle missioni, la permanenza prolungata dell'uomo nello spazio, l'usura dei materiali in ambienti proibitivi, le difficoltà tecniche nelle comunicazioni radio a grandi distanze sono altrettanti problemi per i progetti di esplorazione spaziale. La scelta che sino a ora ha dato maggiori successi è stata quella delle sonde prive di equipaggio: le missioni **Mariner**, **Venera**, **Viking**, **Pioneer** e **Voyager** (➡1) negli anni '60 e '70 del secolo scorso hanno dato un grande impulso alla conoscenza dei pianeti del sistema solare. Dopo un periodo di relativa stasi, negli anni '90 la ricerca spaziale ha preso



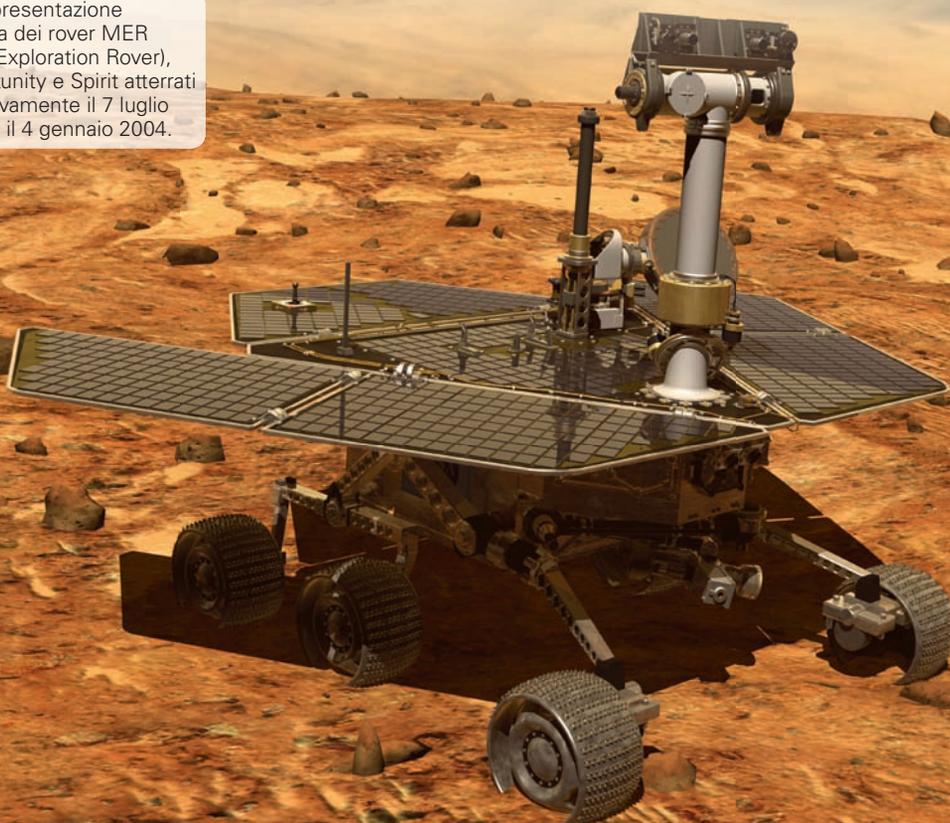
1 Rappresentazione artistica della sonda interplanetaria Voyager.

nuovo impulso. Nel 1995 la sonda **Galileo**, dotata di un modulo di discesa, ha raggiunto Giove con tre obiettivi: lo studio dell'atmosfera, dei satelliti e del magnetismo del pianeta. Ha ripreso, inoltre, un avvenimento eccezionale: la caduta di una cometa su Giove.

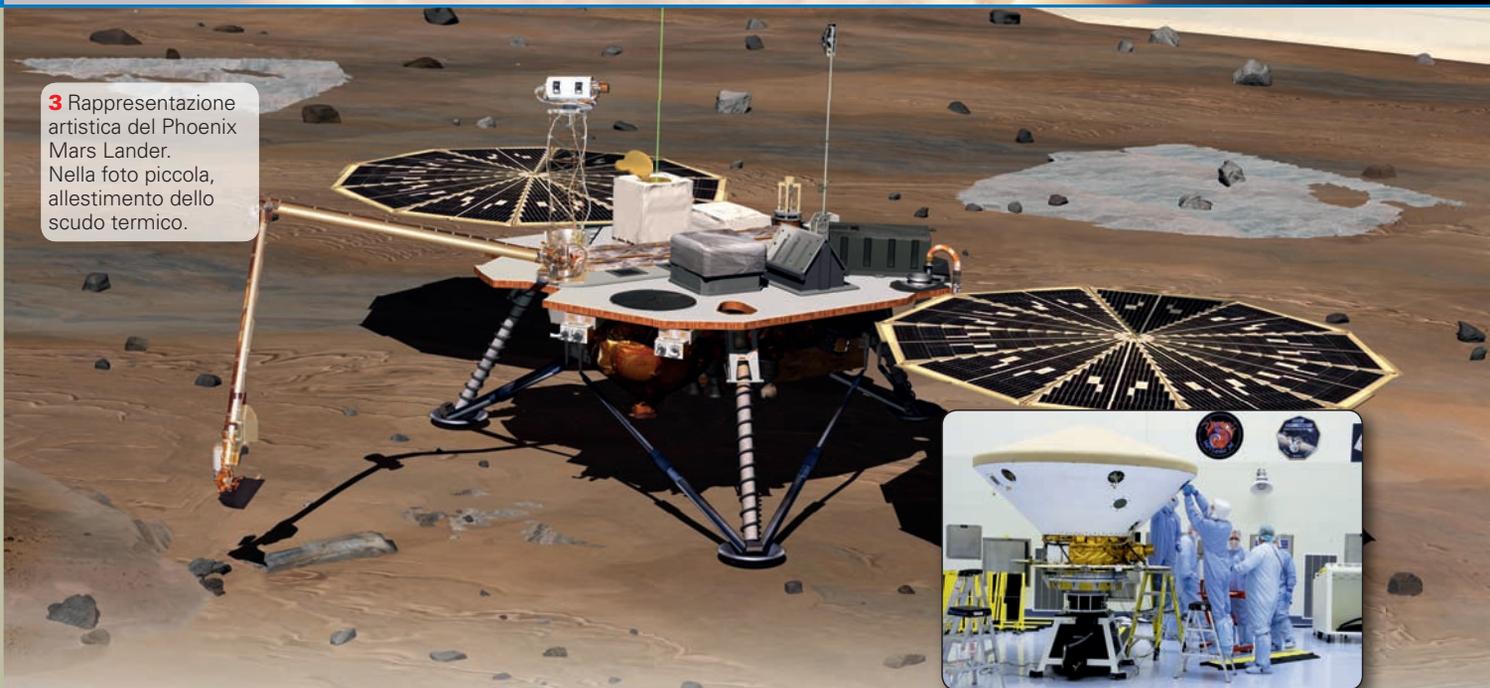
Nel 1998 la sonda **Mars Global Surveyor** è entrata in orbita intorno a Marte e ha attuato la mappatura di una parte della sua superficie; grazie a essa sono state trovate, nel giugno del 2000, tracce di acqua liquida in fondo della profondissima Valles Marineris, dove la pressione atmosferica, maggiore che in ogni

altra parte del pianeta, ne impedirebbe l'evaporazione. Potrebbe essere la prova che in profondità esistono grandi quantità di acqua, che a volte filtra verso la superficie. Sinora il maggiore successo nell'esplorazione di Marte è stato quello della sonda **Mars Pathfinder** (1997) che ha inviato a terra migliaia di immagini e ha sganciato sul suolo marziano il modulo a sei ruote **Sojourner**; quest'ultimo ha analizzato centinaia di metri quadrati di suolo marziano. Dopo alcuni clamorosi fallimenti, tra la fine del 2003 e gli inizi del 2004, le missioni Mars Exploration Rovers (NASA) (➡2) e Mars Express

2 Rappresentazione artistica dei rover MER (Mars Exploration Rover), Opportunity e Spirit atterrati rispettivamente il 7 luglio 2003 e il 4 gennaio 2004.



**3** Rappresentazione artistica del Phoenix Mars Lander. Nella foto piccola, allestimento dello scudo termico.



(ESA) sono state almeno in parte coronate dal successo: i moduli Spirit e Opportunity, depositati dalla sonda della NASA in zone ritenute laghi disseccati, hanno cominciato a inviare immagini e dati ambientali, che hanno definitivamente confermato la presenza, nel passato, di abbondante acqua sul pianeta.

L'obiettivo di queste missioni è duplice: la ricostruzione della storia climatica di Marte, per risolvere definitivamente il dubbio sulla possibile esistenza, presente o passata, di forme di vita sul pianeta (dato ancora incerto), e l'individuazione di zone adatte per la missione di cui si discute da tempo, l'installazione di una base spaziale sul pianeta rosso.

L'ultima missione in ordine di tempo è stata quella del **Phoenix Mars Lander** **(E3)**, atterrato con successo in prossimità del polo Nord marziano nel maggio 2008. Le immagini del terreno trasmesse hanno rivelato un aspetto del suolo simile a quello del permafrost presente sul nostro pianeta. La sonda ha fornito chiari indizi dell'evaporazione di ghiaccio d'acqua sul sito di atterraggio ed ha eseguito analisi chimiche del terreno.

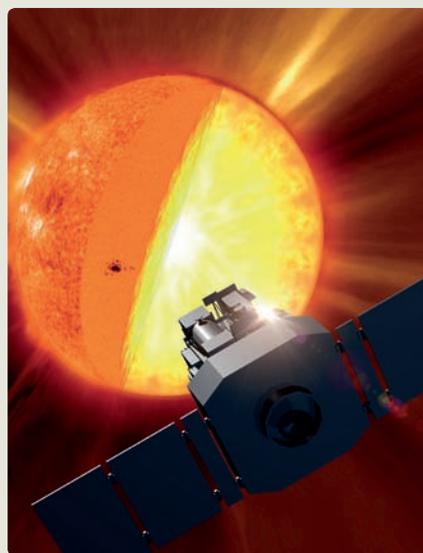
Un'altra missione in atto è quella della navicella **Cassini**, che esplorerà il sistema dei satelliti di Saturno; nel gennaio del 2005 ha sganciato su Titano la sonda europea **Huygens**, che ha inviato immagini della superficie del satellite. L'interesse degli astronomi per Titano nasce dal fatto che viene ritenuto simile alla Terra primordiale (con un'atmosfera ricca d'azoto e di composti organici). Anche il Sole è stato oggetto di studio. Attualmente sono operative la sonda **SOHO** (Solar & Heliospheric Observatory) **(E4)**, le sonde gemelle **STEREO** e, dal 2010, la sonda **SDO** (Solar Dynamics Observatory), tutte con lo scopo di analizzare ogni aspetto dell'attività solare.

Infine alcune missioni hanno fornito informazioni essenziali sulla composizione delle comete. Negli anni '80 del secolo scorso la sonda **Giotto** ha fotografato da distanza ravvicinata il nucleo della cometa di Halley, mentre negli anni '90 la **Stardust** ha raccolto campioni della chioma della cometa Wild-2 e li ha inviati, in una capsula, sulla Terra. Infine, il 4 luglio 2005 una parte della sonda **Deep Impact** della NASA (il proiettile "Smart Impactor", di 370 kg) ha impattato con successo il nucleo della cometa Tempel 1, portando alla luce detriti provenienti dall'interno. La parte superstite della sonda, dopo aver fotografato il cratere d'impatto, la materia fuoriuscita e il nucleo della cometa, è stata reimpiegata per l'osservazione di pianeti extrasolari.

Nel frattempo, la tecnologia spaziale ha fatto grandi passi in avanti. La sonda Ga-

lileo, per esempio, è stata dotata di strumenti molto sofisticati per analizzare le caratteristiche del sistema di Giove: uno spettrometro di massa, un nefelometro per la localizzazione delle nubi e per l'osservazione delle particelle che le compongono, un gruppo di sensori per la misura di temperatura e pressione, un radiometro di flusso per misurare i flussi d'energia, un rilevatore di fulmini e di emissioni radio, strumenti per la misura del campo magnetico e antenne per le telecomunicazioni.

Anche i problemi di comunicazione tra la Terra e le sonde lontane sono in via di risoluzione: il **Deep Space Network** **(E5)** è costituito da tre potenti radiorecettori disposti a 120° di longitudine uno dall'altro (il primo in California, il secondo in Spagna e il terzo in Australia) per ottenere una superficie ricevente paragonabile alla Terra intera.



**4** Rappresentazione artistica della sonda SOHO destinata allo studio dell'attività solare.



**5** Una delle antenne del Deep Space Network che consente la comunicazione bidirezionale tra le sonde e la Terra.



## sintesi Concetti, definizioni, termini e dati fondamentali

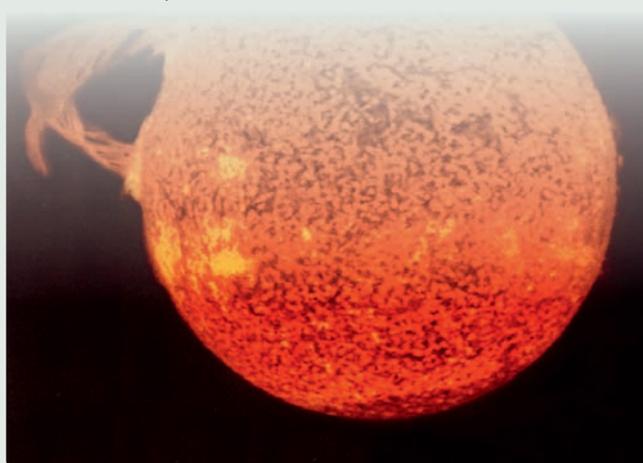
► **Il sistema solare** è un insieme di corpi celesti che subiscono la reciproca attrazione gravitazionale: comprende una stella (il Sole) di medie dimensioni, otto pianeti e almeno 54 satelliti principali, migliaia di asteroidi e una grande quantità di frammenti rocciosi e ammassi di ghiaccio (meteore e comete).

► **Origine del sistema solare:** una nebulosa fredda in rotazione, costituita da idrogeno, elio e polveri cosmiche, cominciò a contrarsi, dividendosi in più punti. L'esplosione di una supernova favorì la formazione di un nucleo condensato, un **protosole**. Quando la temperatura al centro del sistema raggiunse valori tali da permettere l'inizio del processo di fusione nucleare, si formò il Sole. La forza centrifuga, dovuta alla rotazione, fece assumere alla nebulosa la forma di un disco rotante. Nelle zone più vicine al Sole si condensarono gli elementi e i composti più pesanti (silicati e ferro), nelle zone più lontane dal Sole si condensarono acqua, ammoniaca e metano. Si formarono così i pianeti interni rocciosi e quelli esterni gassosi. Le collisioni con i materiali ancora presenti nello spazio hanno prodotto i crateri presenti nei pianeti rocciosi, oltre alla fusione e alla conseguente migrazione dei materiali pesanti verso l'interno, a formare il nucleo metallico dei pianeti. I pianeti di massa maggiore hanno trattenuto grandi quantità di gas leggeri, con la conseguente formazione di dense atmosfere di idrogeno, elio e metano.



► **Il Sole:** è una stella di media dimensione e di media temperatura, formata da idrogeno ed elio. Sono però presenti elementi chimici derivati dall'esplosione di una supernova. Il Sole possiede un moto rotatorio e una velocità angolare di rotazione variabile con la latitudine. Il Sole emette un'enorme quantità di energia, di cui una piccola frazione raggiunge il nostro pianeta. **La struttura interna:** il **nucleo** è la zona centrale con una temperatura di circa 1-15 milioni di kelvin: qui avvengono processi di fusione nucleare. La materia è costituita in gran parte da idrogeno allo stato di plasma. La **zona radiativa** assorbe l'energia prodotta dal nucleo trasmettendola verso l'esterno per irraggiamento; nella **zona convettiva** il trasporto di energia avviene per mezzo di moti convettivi.

**La parte esterna:** la **fotosfera** è costituita da gas a bassa pressione e la temperatura è di circa 5800 kelvin. In essa sono



presenti i **granuli** (zone più luminose e più calde, dove il gas è in risalita) e le **macchie solari** (aree "fredde" il cui numero varia periodicamente). La **cromosfera** è visibile unicamente durante le eclissi di Sole ed è caratterizzata dalla presenza di grandiosi fenomeni di turbolenza: le **protuberanze** (getti di gas caldi) e i **brillamenti** (esplosioni di luce con grandissima liberazione di energia). La **corona solare** è costituita da gas fortemente ionizzati e rarefatti, a una temperatura estremamente elevata. In parte si disperde nello spazio come **vento solare**, che raggiunge il nostro pianeta e interagisce con l'atmosfera producendo fenomeni come aurore polari e tempeste magnetiche



► **I pianeti:** Mercurio, Venere, Terra e Marte sono detti **pianeti di tipo terrestre**, mentre Giove, Saturno, Urano e Nettuno sono **pianeti di tipo gioviano**. I primi, più vicini al Sole, hanno elevata densità, piccole dimensioni, una superficie solida rocciosa relativamente calda. I secondi, più lontani dal Sole, sono fluidi, di grandi dimensioni, molto freddi e con una densa atmosfera.

Tutti i pianeti sono dotati di moto di rivoluzione intorno al Sole lungo orbite ellittiche quasi complanari e di rotazione in senso antiorario intorno al proprio asse, ma con notevoli differenze nella loro durata.

La legge di Titius-Bode permette di determinare la distanza dei pianeti dal Sole in unità astronomiche. Le tre **leggi di Keplero** descrivono i moti dei pianeti.

► **I corpi minori:** si tratta di oggetti di piccole dimensioni e piccola massa: **asteroidi** (in rotazione intorno al Sole nella fascia degli asteroidi), **comete** (si originano dalla nube di Oort e percorrono orbite ellittiche molto eccentriche o paraboliche), **meteore** (frammenti che si incendiano al contatto con l'atmosfera) e meteoriti (metalliche o rocciose).



### Per chi vuole APPROFONDIRE

- Briggs G. e Taylor F., *Atlante Cambridge dei pianeti*, Zanichelli
- Braccesi A., Caprara G., *Alla scoperta del sistema solare*, Mondadori



Allenati anche online  
con i test interattivi

E-TRAINER

# verifiche

Testo articolato, testo sintetico e quesiti

## Con un testo articolato tratta i seguenti argomenti

- 1 Descrivi i processi che hanno portato alla formazione del sistema solare.
- 2 Descrivi le caratteristiche dei pianeti del sistema solare.
- 3 Descrivi la struttura a strati del Sole e le diverse forme di attività solare.

## Con un testo sintetico rispondi alle seguenti domande

- 4 Quali caratteristiche del sistema solare sono spiegate dall'attuale teoria sulla sua formazione?
- 5 Come si spiega la presenza di elementi chimici pesanti nel Sole?
- 6 Perché si interrompe il collasso gravitazionale del materiale solare?
- 7 Quali sono le parti in cui possiamo suddividere l'interno del Sole?
- 8 Quali caratteristiche hanno le zone esterne e visibili del Sole?
- 9 Quali sono i principali tipi di attività solare?
- 10 Che cosa affermano le tre leggi di Keplero?
- 11 A che cosa serve la legge di Titius-Bode?
- 12 Quali sono le principali differenze tra pianeti terrestri e gioviani?
- 13 Quali sono le affinità e le differenze tra Mercurio, Venere e Terra?
- 14 Quali caratteristiche peculiari di Marte rendono questo pianeta il più simile alla Terra?
- 15 Quali sono le caratteristiche comuni a Giove e Saturno?
- 16 Perché la scoperta di Nettuno è legata a Urano?
- 17 Da che cosa sono costituiti e come si sono originati gli anelli di Saturno?
- 18 Che cosa sono e da dove si originano le comete?
- 19 Che cosa sono gli asteroidi?
- 20 Come si classificano le meteoriti?

## Quesiti

- 21 Nel Sole è sede di fenomeni come le macchie solari:
 

<input type="checkbox"/> a Cromosfera.	<input type="checkbox"/> c Zona radiativa.
<input type="checkbox"/> b Fotosfera.	<input type="checkbox"/> d Corona solare.
- 22 Dai suoi margini irregolari emergono brillanti e protuberanze:
 

<input type="checkbox"/> a Cromosfera.	<input type="checkbox"/> c Zona radiativa.
<input type="checkbox"/> b Fotosfera.	<input type="checkbox"/> d Corona solare.
- 23 Quali sono i pianeti che hanno piani orbitali quasi complanari?
 

<input type="checkbox"/> a Tutti.
<input type="checkbox"/> b Tutti ad eccezione della Terra.
<input type="checkbox"/> c Tutti ad eccezione di Plutone.
<input type="checkbox"/> d Tutti ad eccezione di Saturno e Urano.

- 24 La fascia di asteroidi è situata:

- |  |
|--|
| <input type="checkbox"/> a Tra la Terra e Marte.   |
| <input type="checkbox"/> b Tra Giove e Saturno.    |
| <input type="checkbox"/> c Tra il Sole e Mercurio. |
| <input type="checkbox"/> d Tra Marte e Giove.      |

- 25 Quali pianeti possiedono un moto di rotazione retrogrado?

- |   |
|---|
| <input type="checkbox"/> a La Terra e Venere. |
| <input type="checkbox"/> b Urano.             |
| <input type="checkbox"/> c Venere e Urano.    |
| <input type="checkbox"/> d Saturno e Giove.   |

- 26 Quale pianeta ha l'asse di rotazione rivolto verso il Sole?

- |   |
|---|
| <input type="checkbox"/> a La Terra.        |
| <input type="checkbox"/> b Venere.          |
| <input type="checkbox"/> c Giove e Saturno. |
| <input type="checkbox"/> d Urano.           |

- 27 Quando un pianeta interno, visto dalla Terra, si trova alla massima distanza angolare dal Sole:

- |  |
|--|
| <input type="checkbox"/> a È in posizione di congiunzione inferiore. |
| <input type="checkbox"/> b È in posizione di elongazione.            |
| <input type="checkbox"/> c È in posizione di opposizione.            |
| <input type="checkbox"/> d È in posizione di congiunzione superiore. |

- 28 La pressione atmosferica su Venere è:

- |  |
|--|
| <input type="checkbox"/> a 90 volte quella terrestre.            |
| <input type="checkbox"/> b 0,1 volte quella terrestre.           |
| <input type="checkbox"/> c Nulla, poiché non esiste l'atmosfera. |
| <input type="checkbox"/> d Uguale a quella terrestre.            |

- 29 Il pianeta Nettuno è stato scoperto:

- |   |
|---|
| <input type="checkbox"/> a Nel 1930, in seguito alle perturbazioni del moto di Giove. |
| <input type="checkbox"/> b Nel 1901, casualmente al telescopio.                       |
| <input type="checkbox"/> c Nel 1846, in seguito alle perturbazioni del moto di Urano. |
| <input type="checkbox"/> d Nel 1986, per mezzo della sonda Voyager 2.                 |

- 30 Io, Europa, Ganimede e Callisto sono i principali satelliti di:

- |                                     |
|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> a Venere.  |
| <input type="checkbox"/> b Giove.   |
| <input type="checkbox"/> c Saturno. |
| <input type="checkbox"/> d Urano.   |

## Problemi

- 31 Confronta i valori delle distanze dei pianeti dal Sole indicati nella tabella 2 con quelli ricavabili per mezzo della legge di Titius-Bode.

- 32 Verifica la terza legge di Keplero ( $P^2 = k a^3$ ) per almeno tre pianeti, sapendo che se esprimi la distanza dal Sole in Unità Astronomiche e il periodo in anni,  $k$  vale 1.

