CAPITOLO

8

L'Universo, le stelle e le galassie

Ogni volta che alzi gli occhi verso il cielo notturno guardi indietro nel tempo: la luce che ti raggiunge stanotte è partita prima che tu nascessi, e a volte prima che esistesse la Terra.

OBIETTIVI

1. Descrivere la sfera celeste, le costellazioni e il moto apparente diurno delle stelle; trovare la Stella Polare.
2. Usare l'unità astronomica, l'anno luce e il parsec; ricavare la distanza di una stella dalla sua parallasse.
3. Spiegare che cosa ci dicono lo spettro e il colore di una stella, e da che cosa dipende la sua brillantezza apparente.
4. Descrivere a grandi linee la vita di una stella e l'origine degli elementi chimici.
5. Classificare le galassie e spiegare perché diciamo che l'Universo si espande e ha avuto un inizio.

INDICE DEL CAPITOLO

8.1 Osservare il cielo 2
8.2 Le distanze astronomiche 5
8.3 La luce e la vita delle stelle 8
8.4 Le galassie 16
8.5 L'Universo in espansione 19

Scienze naturali 1 · Parte II · La Terra nello spazio · versione 1.0
Capitolo 8: L'Universo, le stelle e le galassie · pagine 187–212 del volume completo · estratto per lo studio

Nei primi sette capitoli abbiamo studiato la materia guardandola da vicino: l'abbiamo pesata, scaldata, separata, fino ad arrivare agli atomi. Ora cambiamo scala e alziamo lo sguardo. In una notte limpida, lontano dalle luci della città, si vedono a occhio nudo alcune migliaia di stelle e, d'estate, la striscia lattiginosa della Via Lattea che attraversa il cielo. Nessuno le ha mai raggiunte, eppure sappiamo quanto sono lontane, quanto sono calde, di che cosa sono fatte, come nascono e come muoiono. Lo sappiamo perché abbiamo imparato a leggere l'unico messaggero che ci arriva da loro: la luce.

Partiremo dall'osservazione del cielo a occhio nudo, impareremo a misurare le distanze astronomiche e a interpretare la luce delle stelle con gli strumenti della fisica e della chimica. Infine usciremo dalla nostra galassia per arrivare alla scoperta più sorprendente del Novecento: l'Universo si espande e ha avuto un inizio, circa 13,8 miliardi di anni fa.

8.1 Osservare il cielo

8.1.1 La sfera celeste

Guardando il cielo non percepiamo la profondità: le stelle sembrano fissate all'interno di un'enorme cupola, che gli antichi credevano reale. Oggi sappiamo che si trovano a distanze molto diverse, ma la rappresentazione resta comoda per indicare le direzioni. La **sfera celeste** è una sfera immaginaria, di raggio grandissimo e centrata sull'osservatore, sulla quale proiettiamo la posizione apparente di tutti gli astri (Figura 8.1).

Sulla sfera celeste si individuano alcuni punti e circoli di riferimento. Il punto esattamente sopra la nostra testa è lo **zenit**. Il piano tangente alla Terra nel punto in cui ci troviamo taglia la sfera lungo l'**orizzonte** astronomico, che divide il cielo visibile da quello nascosto sotto i nostri piedi. Se prolunghiamo l'asse di rotazione terrestre, esso incontra la sfera celeste in due punti, il **polo nord celeste** e il polo sud celeste. Prolungando allo stesso modo il piano dell'equatore terrestre si ottiene l'**equatore celeste**, un cerchio massimo che divide il cielo in due emisferi. Sono le stesse idee del reticolato geografico che userai nel Capitolo 12, «proiettate» sul cielo.

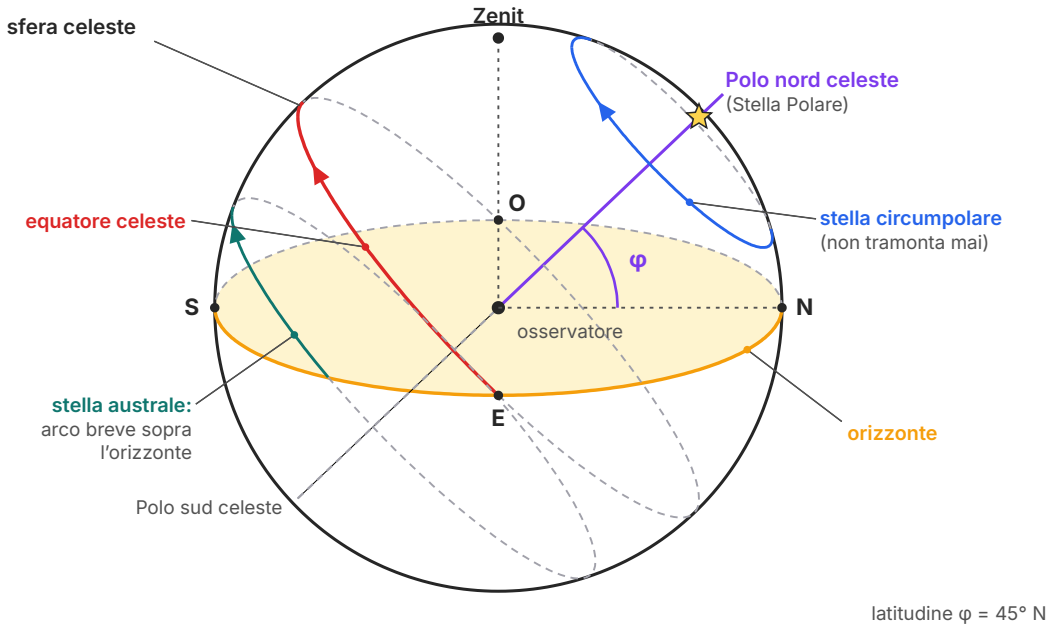


Figura 8.1 La sfera celeste vista da un osservatore alla latitudine di 45° N. L'asse del mondo punta verso il polo nord celeste, vicinissimo alla Stella Polare, alto sull'orizzonte quanto la latitudine (φ). Le frecce indicano il moto apparente diurno da est verso ovest: una stella dell'equatore celeste sorge esattamente a est e resta sopra l'orizzonte per metà del suo giro; una stella circumpolare non tramonta mai; una stella australe percorre solo un breve arco a sud. Le parti tratteggiate sono nascoste dietro la sfera o sotto l'orizzonte.

8.1.2 Le costellazioni

Fin dall'antichità le stelle più brillanti sono state raggruppate in figure, le **costellazioni**; molte di quelle che usiamo derivano dalla tradizione greca, con nomi latini come *Ursa Maior* e *Orion*. Nel 1922 l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ha fissato l'elenco ufficiale di **88 costellazioni** e, pochi anni dopo, i loro confini, in modo che ogni punto del cielo appartenga a una e una sola costellazione. Oggi una costellazione è soprattutto una «regione» del cielo. Le figure più note che non sono costellazioni ufficiali, come il Grande Carro (sette stelle dell'Orsa Maggiore), si chiamano *asterismi*.

Poiché la Terra gira intorno al Sole, il cielo notturno cambia con le stagioni: Orione domina le notti d'inverno, lo Scorpione e il Cigno quelle d'estate.

ERRORE FREQUENTE

Le stelle di una costellazione non sono «vicine» fra loro. Sembrano raggruppate solo perché le vediamo nella stessa direzione. Nella costellazione di Orione, per esempio, Betelgeuse dista da noi circa 550 anni luce e Rigel circa 860: le due stelle sono separate da centinaia di anni luce, molto più di quanto ciascuna disti da altre stelle di costellazioni diverse. Se osservassimo il cielo da un altro punto della Galassia, le figure delle costellazioni sarebbero irriconoscibili.

8.1.3 Il moto apparente diurno e la Stella Polare

Una fotografia del cielo a lunga esposizione mostra le stelle come archi di cerchio, tutti centrati su un punto: durante la notte l'intera sfera celeste sembra ruotare intorno all'asse che passa per i poli celesti, compiendo un giro completo in circa 23 ore e 56 minuti: è il **moto apparente diurno**. Le stelle sorgono dalla parte di est, salgono nel cielo, raggiungono l'altezza massima quando passano a sud e tramontano a ovest, proprio come il Sole. Si tratta di un moto *apparente*: a ruotare davvero è la Terra, da ovest verso est, e noi con lei (lo studierai nel Capitolo 10).

Nell'emisfero boreale il polo nord celeste si trova, per una fortunata coincidenza, a meno di un grado da una stella di discreta luminosità: la **Stella Polare**, l'ultima stella del «timone» dell'Orsa Minore. Poiché è quasi esattamente sul prolungamento dell'asse terrestre, la Polare resta praticamente immobile mentre tutte le altre stelle le ruotano intorno, in verso antiorario per chi guarda verso nord. Indica quindi il Nord, e la sua altezza sull'orizzonte è circa uguale alla latitudine del luogo: a Roma, a circa 42° di latitudine nord, la Polare è alta circa 42° (Capitolo 12).

Le stelle abbastanza vicine al polo celeste descrivono cerchi che non scendono mai sotto l'orizzonte: sono le **stelle circumpolari**, visibili in tutte le notti dell'anno. Alle latitudini dell'Italia centro-settentrionale sono circumpolari, per esempio, le stelle del Grande Carro e di Cassiopea. Le stelle vicine al polo sud celeste, invece, per noi non sorgono mai.

DA RICORDARE

Come trovare la Stella Polare. Individua il Grande Carro, ben riconoscibile in ogni stagione. Le due stelle che formano il lato posteriore del «carro», Merak e Dubhe, sono chiamate *puntatori*: prolunga di circa cinque volte la loro distanza, dalla parte di Dubhe, e arriverai alla Polare. Attenzione: la Polare non è la stella più luminosa del cielo (lo è Sirio); è una stella di luminosità media, importante solo per la sua posizione.

8.1.4 Il cielo che stiamo perdendo

Per vedere le stelle più deboli e la Via Lattea serve un cielo davvero buio. L'illuminazione artificiale delle città, quando è eccessiva o mal orientata verso l'alto, diffonde luce nell'atmosfera e rende il cielo notturno chiaro: è l'**inquinamento luminoso**. In una grande città si vedono a oc-

chio nudo solo poche decine di stelle; in una zona di montagna lontana dai centri abitati se ne vedono migliaia.

COLLEGAMENTI

Educazione civica · Un problema ambientale poco conosciuto. Secondo un atlante mondiale della luminosità artificiale del cielo, pubblicato nel 2016 da un gruppo di ricerca guidato da studiosi italiani, la Via Lattea è ormai invisibile per più di un terzo dell'umanità e per circa il 60 % degli europei. L'inquinamento luminoso non danneggia solo l'astronomia: spreca energia, altera i ritmi di attività degli animali notturni (per esempio gli uccelli migratori e gli insetti) e può disturbare il sonno delle persone. Le soluzioni sono semplici: lampade schermate che illuminano solo verso il basso, intensità e colori adeguati, spegnimento quando non servono. Molte regioni italiane hanno leggi specifiche contro l'inquinamento luminoso.

8.2 Le distanze astronomiche

8.2.1 Unità astronomica e anno luce

Nello spazio i chilometri sono scomodi come lo sarebbero i millimetri per misurare la distanza fra Milano e Palermo. All'interno del Sistema solare si usa l'**unità astronomica** (simbolo **UA**, in inglese *au*), che corrisponde alla distanza media fra la Terra e il Sole. Dal 2012 la IAU l'ha definita come esattamente 149 597 870 700 m, cioè circa $1{,}496 \times 10^8$ km. Giove dista dal Sole circa 5,2 UA, Nettuno circa 30 UA.

Per le stelle anche l'unità astronomica è troppo piccola. Si usa allora una distanza legata alla velocità della luce, che nel vuoto è di 299 792 458 m/s, circa 300 000 km/s: nulla di ciò che conosciamo viaggia più veloce. L'**anno luce** (simbolo **a.l.**) è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno. Moltiplicando la velocità per la durata dell'anno (365,25 giorni, cioè circa $3{,}156 \times 10^7$ s) si ottiene:

$$1 \text{ a.l.} = 299\,792 \text{ km/s} \times 3{,}156 \times 10^7 \text{ s} \approx 9{,}46 \times 10^{12} \text{ km} \approx 63\,200 \text{ UA}$$

La stella più vicina al Sole, Proxima Centauri, dista circa 4,2 anni luce, cioè circa 4×10^{13} km.

ERRORE FREQUENTE

L'anno luce è una distanza, non un tempo. Frasi come «ci vorranno anni luce» confondono le idee: l'anno luce si misura in chilometri, non in anni. Ciò che misura un tempo è il «tempo di viaggio» della luce: la luce impiega 4,2 anni ad arrivare da Proxima Centauri, che quindi dista 4,2 anni luce. Allo stesso modo si parla di «minuti luce» e «secondi luce»: il Sole dista circa 8,3 minuti luce, la Luna circa 1,3 secondi luce.

8.2.2 La parallasse annua e il parsec

Tieni un dito alzato a braccio teso e guardalo alternando l'occhio destro e il sinistro: il dito sembra «saltare» rispetto agli oggetti lontani. Questo spostamento apparente, dovuto al cambiamento del punto di osservazione, si chiama **parallasse**. Più l'oggetto è vicino, più la parallasse è grande.

Per le stelle, i due «occhi» sono le posizioni della Terra a sei mesi di distanza, ai lati opposti dell'orbita (Figura 8.2). Osservata a gennaio e poi a luglio, una stella vicina sembra spostarsi leggermente rispetto alle stelle molto più lontane dello sfondo. La **parallasse annua** p è definita come l'angolo sotto cui, dalla stella, si vedrebbe il raggio dell'orbita terrestre, cioè 1 UA: è la metà dello spostamento angolare totale osservato in sei mesi.

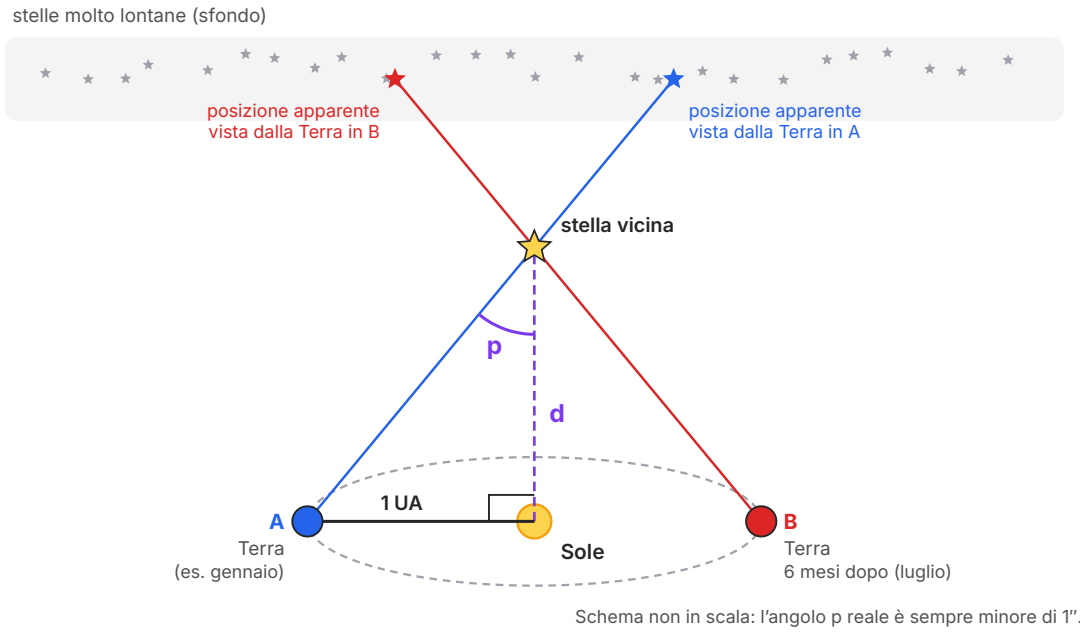


Figura 8.2 La parallasse annua. Osservata da due posizioni opposte dell'orbita terrestre (A e B, a sei mesi di distanza), una stella vicina sembra spostarsi rispetto alle stelle lontane dello sfondo. La parallasse p è l'angolo sotto cui, dalla stella, si vedrebbe il raggio dell'orbita (1 UA). Più la stella è lontana, più p è piccolo.

Gli angoli sono minuscoli e si misurano in *secondi d'arco* (″): un grado si divide in 60 primi (′) e un primo in 60 secondi, quindi 1″ = 1/3600 di grado. Tutte le stelle hanno una parallasse minore di 1″: quella di Proxima Centauri, la più grande, è di 0,768″, l'angolo sotto cui si vedrebbe una moneta da un euro a più di 6 km.

Da queste misure nasce l'unità di distanza preferita dagli astronomi professionisti, il **parsec** (simbolo **pc**, da «*par*allasse di un *sec*ondo»): è la distanza alla quale una stella avrebbe una parallasse annua di 1″. Un parsec corrisponde a circa 206 265 UA, 3,26 anni luce, $3{,}09 \times 10^{13}$ km. La

geometria del triangolo Sole–Terra–stella mostra che, per angoli così piccoli, la distanza è inversamente proporzionale alla parallasse: se la parallasse si dimezza, la distanza raddoppia. Misurando p in secondi d'arco, la distanza in parsec si ottiene con una semplice divisione:

$$d\,(\mathrm{pc}) = \frac{1}{p\,('')}$$

ESEMPIO SVOLTO

Quanto dista Proxima Centauri?

La parallasse annua di Proxima Centauri è $p = 0{,}768''$. Calcola la distanza in parsec, in anni luce e in chilometri.

Distanza in parsec. $d = 1/p = 1/0{,}768 = 1{,}30$ pc.

In anni luce. 1 pc = 3,26 a.l., quindi $d = 1{,}30 \times 3{,}26$ a.l. = 4,24 a.l.

In chilometri. 1 pc = $3{,}09 \times 10^{13}$ km, quindi $d = 1{,}30 \times 3{,}09 \times 10^{13}$ km = $4{,}02 \times 10^{13}$ km.

Controllo. Con 1 a.l. = $9{,}46 \times 10^{12}$ km: $4{,}24 \times 9{,}46 \times 10^{12}$ km = $4{,}01 \times 10^{13}$ km. I due risultati coincidono entro l'arrotondamento.

Tabella 8.1 Le unità di distanza dell'astronomia e le loro equivalenze (valori arrotondati).

Unità	Definizione	km	UA	a.l.
unità astronomica (UA)	distanza media Terra–Sole	$1{,}496 \times 10^{8}$	1	$1{,}58 \times 10^{-5}$
anno luce (a.l.)	distanza percorsa dalla luce in un anno	$9{,}46 \times 10^{12}$	63 241	1
parsec (pc)	distanza di una stella con parallasse 1″	$3{,}09 \times 10^{13}$	206 265	3,26
megaparsec (Mpc)	un milione di parsec	$3{,}09 \times 10^{19}$	$2{,}06 \times 10^{11}$	$3{,}26 \times 10^{6}$

APPROFONDIMENTO

Una caccia durata duemila anni. Già gli astronomi greci avevano capito che, se la Terra girasse intorno al Sole, le stelle avrebbero dovuto mostrare una parallasse. Poiché nessuno riusciva a vederla, molti ne conclusero che la Terra fosse immobile. In realtà la parallasse esiste, ma è così piccola che per misurarla servivano strumenti molto più precisi. Ci riuscì per primo il tedesco Friedrich Wilhelm Bessel nel 1838, misurando per la stella 61 Cygni una parallasse di circa un terzo di secondo d'arco: era la prima distanza stellare mai misurata, e una prova diretta del moto di rivoluzione della Terra. Oggi le parallassi si misurano dallo spazio, sopra la turbolenza dell'atmosfera: il satellite europeo Hipparcos (1989–1993) ne misurò circa centomila; il suo successore Gaia, lanciato nel 2013, ha misurato le parallassi di oltre un miliardo di stelle della nostra galassia.

8.2.3 Guardare lontano è guardare nel passato

La luce è velocissima, ma non istantanea. Questo ha una conseguenza affascinante: quando osserviamo un oggetto lontano, lo vediamo com'era nel momento in cui la luce lo ha lasciato. La Luna che vediamo è quella di 1,3 secondi fa, il Sole quello di circa 8 minuti e 19 secondi fa. Proxima Centauri ci appare com'era più di quattro anni fa. La galassia di Andromeda, l'oggetto più lontano che si riesce a vedere facilmente a occhio nudo, dista circa 2,5 milioni di anni luce: la luce che oggi raggiunge i nostri occhi è partita più o meno quando sulla Terra comparivano i primi rappresentanti del genere *Homo*.

Per questo i telescopi sono, in un certo senso, macchine del tempo. Osservando le galassie più remote gli astronomi studiano l'Universo com'era quando aveva meno di un miliardo di anni.

8.3 La luce e la vita delle stelle

8.3.1 Lo spettro e lo spettroscopio

Se fai passare la luce bianca del Sole attraverso un prisma di vetro, essa si scompone in una striscia di colori, dal violetto al rosso, come in un arcobaleno. Questa striscia è lo **spettro** della luce. Ogni colore corrisponde a una diversa *lunghezza d'onda*, che per la luce visibile va da circa 380 nm (violetto) a circa 750 nm (rosso); 1 nm (nanometro) è un miliardesimo di metro. Lo strumento che scompone la luce e permette di misurare con precisione le lunghezze d'onda si chiama **spettroscopio**.

Esistono tre tipi di spettro (Figura 8.3).

- Un corpo caldo e denso (un solido, un liquido o un gas ad alta pressione), come il filamento di una lampadina a incandescenza, emette uno **spettro continuo**, che contiene tutti i colori senza interruzioni.
- Un gas caldo e rarefatto, come quello di un'insegna luminosa o di una lampada a vapori di sodio, emette solo alcune lunghezze d'onda ben precise: il suo è uno **spettro di emissione**, formato da righe colorate su fondo scuro.
- Se la luce di una sorgente continua attraversa un gas più freddo, il gas assorbe proprio le lunghezze d'onda che sarebbe capace di emettere: si ottiene uno **spettro di assorbimento**, cioè uno spettro continuo solcato da righe scure.

La scoperta decisiva è che ogni elemento chimico ha il proprio insieme di righe, sempre alle stesse lunghezze d'onda, diverso da quello di ogni altro elemento: le righe sono una specie di **impronta digitale** degli atomi. L'idrogeno, per esempio, nel visibile produce quattro righe caratteristiche, a 656 nm (rossa), 486 nm (azzurra), 434 nm e 410 nm (violette); il sodio una doppia

riga gialla a circa 589 nm, la stessa che colora di giallo la fiamma del gas quando vi cade un po' di sale da cucina.

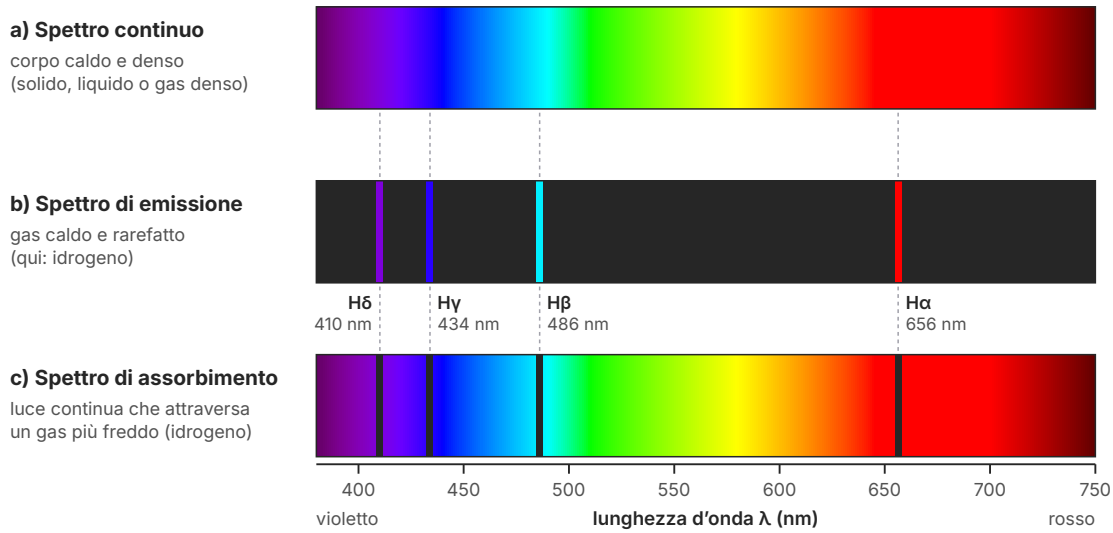


Figura 8.3 I tre tipi di spettro. a) Un corpo caldo e denso emette tutti i colori. b) L'idrogeno caldo e rarefatto emette solo alcune righe; nel visibile sono le quattro righe di Balmer, a 656, 486, 434 e 410 nm. c) Se la luce continua attraversa idrogeno più freddo, mancano proprio quelle lunghezze d'onda: compaiono righe scure nella stessa posizione delle righe di emissione. I colori dello spettro sono approssimati.

Lo spettro del Sole e delle altre stelle è uno spettro di assorbimento: la luce continua prodotta negli strati più profondi e densi attraversa l'atmosfera stellare, più fredda e rarefatta, i cui atomi assorbono le loro righe caratteristiche. Confrontando le righe scure con quelle degli elementi misurate in laboratorio, possiamo dunque sapere di che cosa è fatta una stella senza andarci. Le stelle sono composte soprattutto da idrogeno ed elio, con piccole quantità degli altri elementi: la stessa materia che studiamo sulla Terra.

APPROFONDIMENTO

Un elemento scoperto sul Sole. Nel 1814 l'ottico tedesco Joseph von Fraunhofer osservò e catalogò centinaia di righe scure nello spettro solare, senza sapere che cosa fossero. La spiegazione arrivò intorno al 1860, quando il fisico Gustav Kirchhoff e il chimico Robert Bunsen (quello del becco Bunsen) mostrarono in laboratorio che ogni elemento produce righe proprie e che le righe scure solari coincidono con quelle di elementi noti, come sodio e ferro. Pochi anni dopo, durante l'eclissi totale di Sole del 1868, gli astronomi osservarono nella luce dell'atmosfera solare una riga gialla che non corrispondeva a nessun elemento conosciuto. Il nuovo elemento fu chiamato **elio**, dal greco *hélios*, «Sole» (Capitolo 5); sulla Terra fu isolato solo nel 1895 da William Ramsay. Una sostanza era stata riconosciuta a 150 milioni di chilometri di distanza prima di essere trovata in laboratorio.

8.3.2 Colore e brillantezza

Osserva la costellazione di Orione in una notte d'inverno: Betelgeuse, in alto a sinistra, è nettamente arancione-rossastra, mentre Rigel, in basso a destra, è bianco-azzurra. Il colore di una stella dipende dalla temperatura della sua superficie. Un ferro scaldato nella fucina diventa prima rosso scuro, poi arancione, giallo e quasi bianco: più un corpo è caldo, più la sua luce si sposta verso le lunghezze d'onda corte, cioè verso l'azzurro. Le stelle rosse sono le più fredde (circa 3000 K in superficie), quelle azzurre le più calde (oltre 20 000 K). Il Sole, con una temperatura superficiale di circa 5800 K, emette il massimo della sua luce nel verde, ma la somma di tutti i colori ci appare bianca.

Le stelle non appaiono tutte ugualmente brillanti, e quanto una stella appare brillante dipende da due cose: dall'energia che emette davvero e dalla sua distanza. Un lampione vicino può sembrare più brillante di un faro lontano. Per descrivere la brillantezza apparente gli astronomi usano ancora una scala che risale a Ipparco (II secolo a.C.): le stelle più brillanti erano dette «di prima grandezza», le più deboli visibili a occhio nudo «di sesta». Da questa tradizione deriva la **magnitudine apparente**: più il numero è piccolo, più la stella appare brillante. Vega ha magnitudine circa 0, Sirio −1,5, il Sole −26,7.

8.3.3 Nascita, vita e morte delle stelle

Le stelle nascono nelle **nebulose**, nubi di gas (soprattutto idrogeno ed elio) e polvere larghe decine di anni luce, come la Nebulosa di Orione, visibile con un binocolo sotto la «cintura» della costellazione. Una parte della nube, contraendosi per effetto della propria gravità, si scalda; quando al centro la temperatura raggiunge circa 10 milioni di kelvin, i nuclei di idrogeno cominciano a fondersi formando elio. Questa **fusione nucleare** libera un'enorme quantità di energia: è nata una stella, che brillerà fondendo idrogeno per la maggior parte della sua vita.

È la **massa** a decidere quanto vivrà una stella e come finirà (Figura 8.4). Le stelle più massicce sono le più calde e luminose, ma consumano il loro combustibile molto più in fretta: il Sole

ha una vita di circa 10 miliardi di anni ed è più o meno a metà, una stella di 10 masse solari dura solo qualche decina di milioni di anni. Esaurito l'idrogeno, una stella come il Sole si gonfia in una **gigante rossa**, espelle gli strati esterni e lascia al centro una **nana bianca**, grande più o meno come la Terra. Una stella di oltre circa 8 masse solari, invece, finisce in un'esplosione colossale, una **supernova**, che lascia una stella di neutroni o un buco nero. Nel 1054 gli astronomi cinesi registrarono una «stella ospite» visibile anche di giorno: i resti di quella supernova formano oggi la Nebulosa del Granchio.

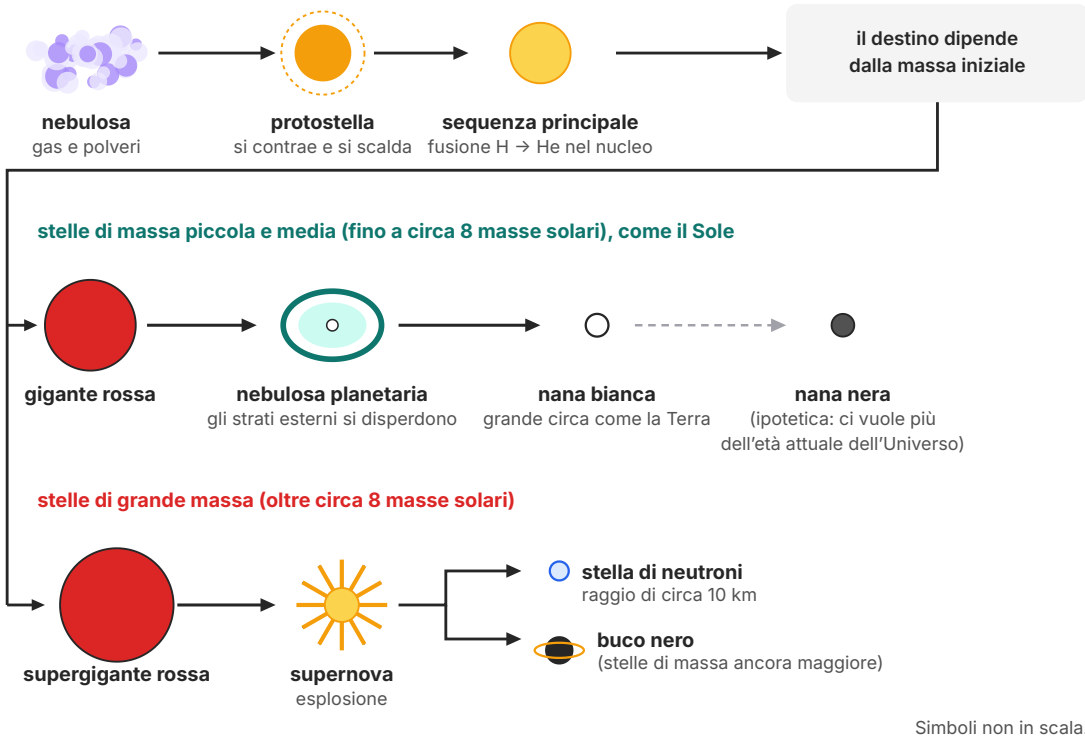


Figura 8.4 Il ciclo vitale delle stelle. Tutte nascono da una nebulosa e passano la maggior parte della vita sulla sequenza principale; la massa iniziale decide la loro fine. Le soglie di massa sono indicative. Il Sole seguirà il percorso superiore.

La storia delle stelle risponde a una domanda che la chimica da sola non può risolvere: da dove vengono gli elementi della tavola periodica? Nei primi minuti dopo il Big Bang (paragrafo 8.5) si formarono quasi soltanto idrogeno ed elio, con tracce di litio. Tutti gli altri elementi sono stati prodotti in seguito dalle stelle, con un processo chiamato **nucleosintesi stellare**: il carbonio e l'azoto soprattutto nelle giganti rosse; l'ossigeno e gli altri elementi fino al ferro soprattutto nei nuclei delle supergiganti; molti elementi più pesanti del ferro, come l'oro, il platino e l'uranio,

nelle esplosioni di supernova e negli scontri fra stelle di neutroni. Le stelle morenti restituiscono questa materia alle nebulose, da cui nasceranno nuove stelle e pianeti.

COLLEGAMENTI

Chimica · Gli atomi del tuo corpo. Nel Capitolo 5 hai visto che il corpo umano è fatto soprattutto di ossigeno, carbonio, idrogeno e azoto, con calcio, fosforo, ferro e molti altri elementi in quantità minori. Con l'eccezione dell'idrogeno, che risale ai primi minuti dell'Universo, tutti questi atomi sono stati fabbricati all'interno di stelle vissute e morte prima che si formasse il Sole, circa 4,6 miliardi di anni fa. Il calcio delle tue ossa e il ferro del tuo sangue sono stati prodotti dentro le stelle: non è una metafora poetica, ma una conclusione della fisica nucleare e della spettroscopia.

APPROFONDIMENTO · CLASSI SPETTRALI E MAGNITUDINI

Lo spettro rivela la temperatura in modo ancora più preciso, perché le righe presenti cambiano con la temperatura. All'inizio del Novecento, all'osservatorio di Harvard, un gruppo di astronome, fra cui soprattutto Annie Jump Cannon, classificò gli spettri di centinaia di migliaia di stelle e le ordinò in **classi spettrali** indicate da lettere. In ordine di temperatura decrescente, le classi principali sono **O B A F G K M** (Tabella 8.2). Ogni classe è divisa in dieci sottoclassi, da 0 (la più calda) a 9: il Sole è una stella G2. Per ricordare la sequenza puoi inventare una frase con quelle iniziali, come «**O**ggi **B**evo **A**cqua **F**resca, **G**ustando **K**iwi e **M**ele».

Tabella 8.2 Le classi spettrali delle stelle. Le temperature sono indicative e si riferiscono alla superficie.

Classe	Temperatura superficiale	Colore	Esempi
O	oltre 30 000 K	azzurro	Mintaka (cintura di Orione)
B	10 000–30 000 K	bianco-azzurro	Rigel, Spica
A	7500–10 000 K	bianco	Sirio, Vega
F	6000–7500 K	bianco-giallo	Procione
G	5200–6000 K	giallo	Sole, Alfa Centauri A
K	3700–5200 K	arancione	Arturo, Aldebaran
M	meno di 3700 K	rosso	Betelgeuse, Antares, Proxima Centauri

Nel 1856 l'astronomo inglese Norman Pogson rese precisa la scala delle magnitudini, fissando che una differenza di 5 magnitudini corrisponde esattamente a un fattore 100 nella luminosità apparente. La scala è quindi **logaritmica**: a ogni passo di una magnitudine la luminosità apparente cambia sempre dello stesso *fattore*, circa 2,512 (perché $2{,}512^5 \approx 100$); due magnitudini corrispondono a un fattore $2{,}512 \times 2{,}512 \approx 6{,}3$, dieci magnitudini a $100 \times 100 = 10\,000$. La luce si distribuisce su sfere sempre più grandi, la cui superficie cresce con il quadrato del raggio: a distanza doppia la luminosità apparente diventa un quarto, a distanza 10 volte maggiore 100 volte minore (*legge dell'inverso del quadrato*).

Per confrontare le stelle «alla pari» si usa allora la **magnitudine assoluta** (simbolo M): è la magnitudine apparente che una stella avrebbe se si trovasse alla distanza standard di 10 parsec (32,6 anni luce). Il Sole a 10 pc avrebbe magnitudine +4,8: sarebbe una stellina appena visibile a occhio nudo. Sirio ha magnitudine assoluta +1,4, mentre una supergigante come Rigel arriva a circa −7.

La grandezza fisica corrispondente è la **luminosità** (simbolo L): l'energia totale emessa dalla stella in ogni secondo, cioè la sua potenza, che si misura in watt. Quella del Sole è di circa $3{,}8 \times 10^{26}$ W. Per comodità le luminosità delle stelle si esprimono spesso in rapporto a quella del

Sole: Sirio è circa 25 volte più luminosa del Sole, Rigel oltre centomila volte, Proxima Centauri meno di un cinquecentesimo.

Confrontare le magnitudini

a) Una stella ha magnitudine apparente 1, un'altra magnitudine 6. Quale appare più brillante, e quante volte?

Appare più brillante quella di magnitudine 1 (numero più piccolo). La differenza è $6 - 1 = 5$ magnitudini, che corrisponde a un fattore **100**.

b) Di quante magnitudini differiscono il Sole (−26,7) e Sirio (−1,5)? Quanto è più brillante, in apparenza, il Sole?

Differenza: $-1{,}5 - (-26{,}7) = 25{,}2$ magnitudini, cioè circa $25 = 5 \times 5$. Ogni gruppo di 5 magnitudini vale un fattore 100, quindi il fattore è circa $100 \times 100 \times 100 \times 100 \times 100 = 10^{10}$: il Sole ci appare circa dieci miliardi di volte più brillante di Sirio.

c) Una stella viene portata a una distanza 10 volte maggiore. Come cambia la sua magnitudine apparente?

Per la legge dell'inverso del quadrato la luminosità apparente diventa $10 \times 10 = 100$ volte minore, cioè la magnitudine aumenta di **5**.

APPROFONDIMENTO · IL DIAGRAMMA H-R

Intorno al 1911–1913 il danese Ejnar Hertzsprung e lo statunitense Henry Norris Russell ebbero, indipendentemente, un'idea semplice e potente: riportare le stelle su un grafico che ha in ascissa la temperatura superficiale (o la classe spettrale) e in ordinata la luminosità (o la magnitudine assoluta). Nasce così il **diagramma H-R** (Figura 8.5), lo strumento più importante dell'astrofisica stellare. Per tradizione l'asse delle temperature è rovesciato: le stelle calde stanno a sinistra e quelle fredde a destra. Le scale sono logaritmiche (ogni tacca vale dieci volte la precedente), perché le luminosità vanno da meno di un decimillesimo a un milione di volte quella del Sole.

Le stelle non sono distribuite a caso, ma si raccolgono in poche regioni.

- Circa il 90 % delle stelle si dispone lungo una fascia diagonale, dalle stelle calde e luminose (in alto a sinistra) a quelle fredde e deboli (in basso a destra): è la **sequenza principale**, che comprende il Sole, Sirio e Proxima Centauri.
- In alto a destra ci sono stelle fredde ma molto luminose. Una stella fredda emette poca energia per metro quadrato: se è molto luminosa, deve essere enorme. Sono le **giganti** (decine di volte il raggio del Sole), come Arturo e Aldebaran, e, ancora più in alto, le **supergiganti** come Betelgeuse, che al posto del Sole inghiottirebbe l'orbita di Marte.
- In basso a sinistra ci sono stelle calde ma poco luminose, quindi piccolissime: le **nane bianche**, grandi più o meno come la Terra. Un esempio è Sirio B, la compagna di Sirio.

Il Sole è una stella di sequenza principale di classe spettrale G2; nella classificazione completa si scrive **G2 V**, dove il numero romano V indica proprio la sequenza principale (le giganti sono di classe III, le supergiganti di classe I). È una stella del tutto ordinaria, che studierai nel Capitolo 9.

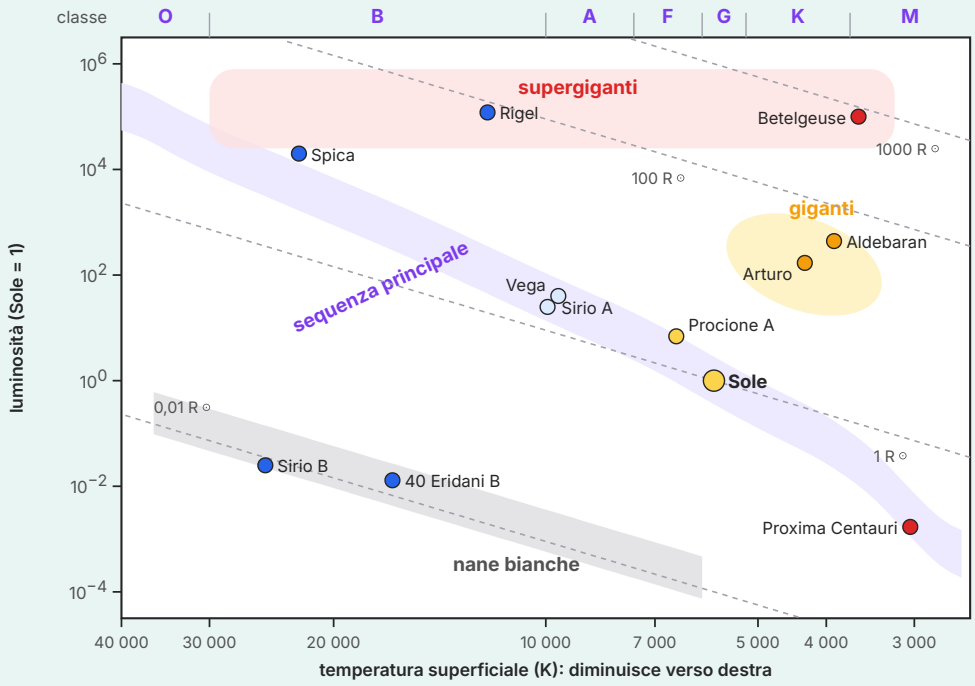


Figura 8.5 Diagramma H-R con alcune stelle note (valori approssimati). La temperatura superficiale decresce verso destra, la luminosità (rispetto al Sole) cresce verso l'alto; entrambe le scale sono logaritmiche. In alto sono indicate le classi spettrali. Le linee tratteggiate uniscono stelle con lo stesso raggio, da 0,01 a 1000 volte il raggio del Sole ($R_\odot$), calcolate dalla relazione fra luminosità, raggio e temperatura.

Il diagramma H-R non è la fotografia di stelle diverse per natura, ma di stelle in fasi diverse della loro vita: sulla sequenza principale stanno le stelle che fondono idrogeno nel nucleo, fra le giganti e le supergiganti quelle che lo hanno esaurito, fra le nane bianche i resti di stelle come il Sole.

8.4 Le galassie

8.4.1 La Via Lattea

Le stelle non sono distribuite uniformemente nell'Universo, ma raccolte in immensi sistemi tenuti insieme dalla gravità, le **galassie**, che contengono da qualche milione a migliaia di miliardi di stelle, oltre a gas e polveri. Quella a cui appartiene il Sole è la **Via Lattea**, detta anche semplicemente «la Galassia», con la G maiuscola. La striscia chiara che attraversa il cielo estivo è il

disco della nostra galassia visto dall'interno: miriadi di stelle troppo deboli per essere distinte, come mostrò Galileo con il cannocchiale nel 1610.

La Via Lattea è una galassia a spirale con una barra centrale (Figura 8.6). Contiene fra 100 e 400 miliardi di stelle. Il suo **disco**, sottile e appiattito, ha un diametro di circa 100 000 anni luce e uno spessore di circa 1000 anni luce: in proporzione, è sottile come un CD. Nel disco si avvolgono i bracci, ricchi di gas e di stelle giovani. Al centro c'è un **rigonfiamento** (in inglese *bulge*) di stelle più vecchie, e al centro di questo un buco nero di circa 4 milioni di masse solari, chiamato Sagittarius A*. Intorno al disco si estende un **alone** sferico, povero di gas, dove si trovano stelle antiche e circa 150 *ammassi globulari*, gruppi compatti di centinaia di migliaia di stelle.

Il Sole si trova nel disco, in un braccio minore chiamato Braccio di Orione, a circa 26 000 anni luce dal centro. Ruota intorno al centro della Galassia a circa 230 km/s e impiega più di 200 milioni di anni per compiere un giro completo.

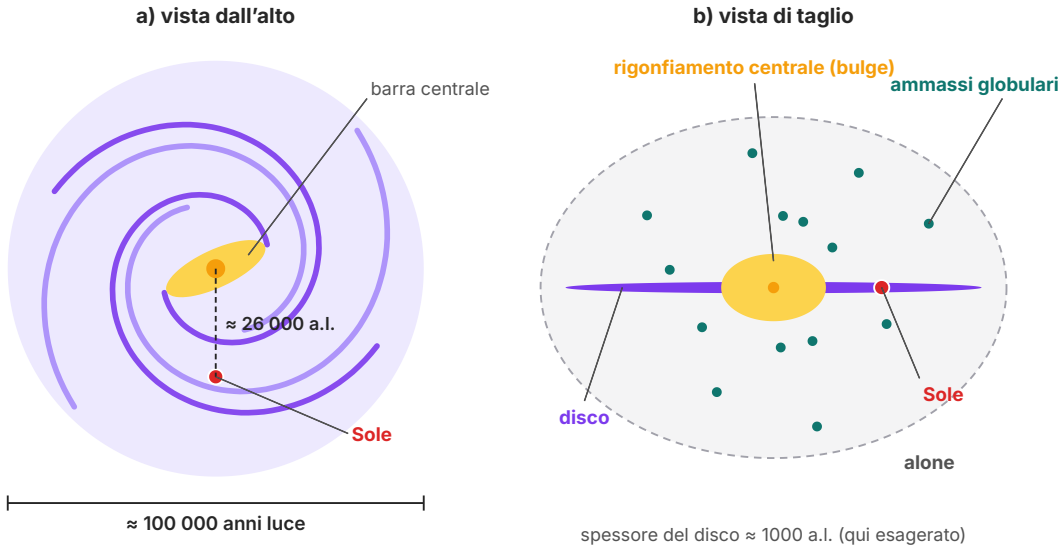


Figura 8.6 Schema della Via Lattea (proporzioni approssimate). a) Vista dall'alto: una spirale barrata di circa 100 000 anni luce di diametro, con il Sole a circa 26 000 anni luce dal centro. b) Vista di taglio: un disco sottile con un rigonfiamento centrale, circondato da un alone sferico in cui si trovano gli ammassi globulari.

8.4.2 La classificazione di Hubble

Fino agli anni Venti del Novecento molti astronomi pensavano che la Via Lattea fosse l'intero Universo e che le «nebulose a spirale» fossero nubi di gas al suo interno. Nel 1924–1925 lo statunitense Edwin Hubble trovò nella «nebulosa» di Andromeda alcune *cefeidi*, stelle variabili la cui luminosità, come aveva scoperto Henrietta Swan Leavitt nel 1912, si ricava dal periodo delle pulsazioni; confrontandola con la luminosità apparente calcolò la distanza e dimostrò che Andromeda si trova ben fuori dalla nostra galassia: era un'altra galassia.

Hubble osservò centinaia di galassie e nel 1926 propose di classificarle in base alla forma; il suo schema, rappresentato spesso «a diapason», è usato ancora oggi (Figura 8.7).

- **Galassie ellittiche** (E): hanno forma ellissoidale, senza bracci né disco, e contengono soprattutto stelle vecchie e pochissimo gas. Sono indicate con E0 (quasi sferiche) fino a E7 (molto allungate).
- **Galassie lenticolari** (S0): hanno un disco e un rigonfiamento centrale, ma non bracci a spirale; sono un tipo intermedio.
- **Galassie a spirale** (S): hanno un disco con bracci avvolti intorno a un nucleo luminoso; nelle Sa i bracci sono stretti e il nucleo grande, nelle Sc i bracci sono aperti e il nucleo piccolo. Sono ricche di gas e vi nascono continuamente nuove stelle.
- **Galassie a spirale barrata** (SB): i bracci partono dalle estremità di una barra di stelle che attraversa il centro. La Via Lattea appartiene a questo tipo.
- **Galassie irregolari** (Irr): non hanno una forma definita; spesso sono piccole e ricche di gas, come le due Nubi di Magellano, visibili a occhio nudo dall'emisfero australe.

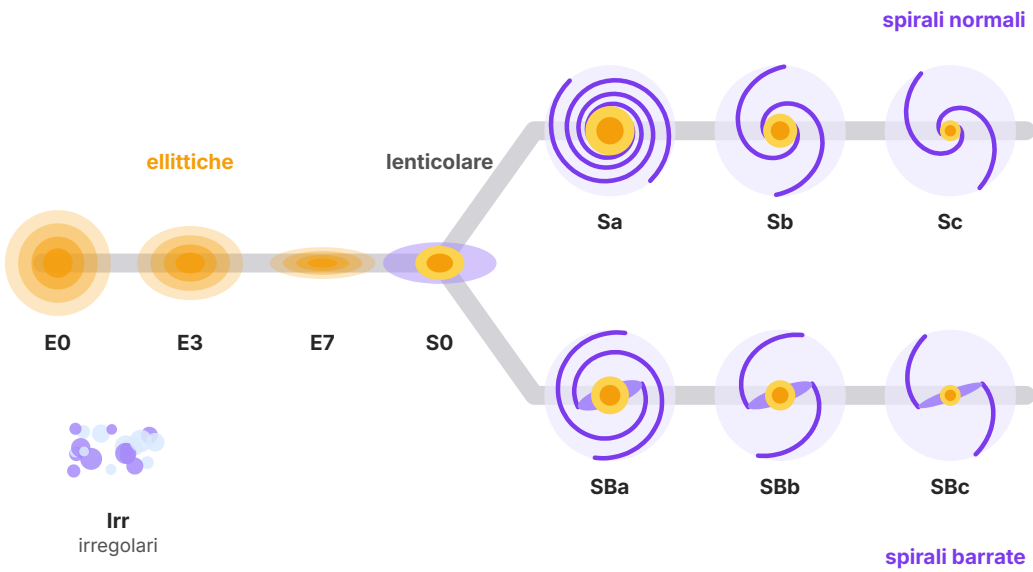


Figura 8.7 La classificazione morfologica delle galassie proposta da Hubble (schema «a diapason»): ellittiche da E0 a E7, lenticolari (S0), spirali normali (Sa, Sb, Sc) e barrate (SBa, SBb, SBc), con bracci sempre più aperti e nucleo sempre più piccolo da «a» a «c»; a parte le irregolari (Irr). Disegni schematici.

8.4.3 Gruppi e ammassi di galassie

Anche le galassie tendono a raggrupparsi. La Via Lattea fa parte del **Gruppo Locale**, un insieme di alcune decine di galassie distribuite in una regione di circa 10 milioni di anni luce. Le mag-

giori sono la Via Lattea, Andromeda (circa 2,5 milioni di anni luce) e la galassia del Triangolo; le altre sono galassie nane, fra cui le Nubi di Magellano. Andromeda si sta avvicinando a noi a circa 110 km/s, attratta dalla gravità.

Su scala più grande, le galassie formano **ammassi di galassie**, che ne contengono da centinaia a migliaia. Il grande ammasso più vicino è quello della Vergine, a circa 50 milioni di anni luce, con più di mille galassie. Su scala ancora più grande, ammassi e superammassi formano una specie di gigantesca ragnatela, separata da enormi regioni quasi vuote.

8.5 L'Universo in espansione

8.5.1 Lo spostamento verso il rosso

La sirena di un'ambulanza suona più acuta mentre si avvicina e più grave quando si allontana: è l'*effetto Doppler*; se la sorgente si allontana, le onde che ci raggiungono risultano «stirate», con una lunghezza d'onda maggiore. Lo stesso accade alla luce. Se una galassia si allontana da noi, tutte le righe del suo spettro appaiono spostate verso lunghezze d'onda maggiori, cioè verso il rosso: questo fenomeno si chiama **spostamento verso il rosso** (in inglese *redshift*). Se invece la sorgente si avvicina, le righe si spostano verso il blu. Lo spostamento si riconosce perché sappiamo dove dovrebbero trovarsi le righe degli elementi.

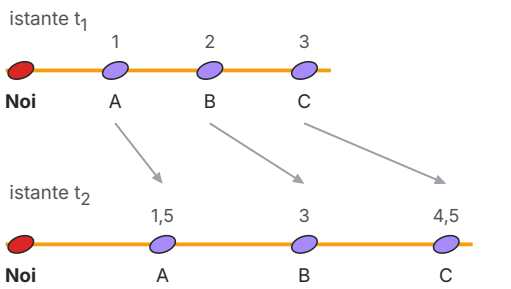
Già nel decennio 1910–1920 l'astronomo statunitense Vesto Slipher aveva notato che gli spettri della maggior parte delle galassie mostrano uno spostamento verso il rosso: quasi tutte le galassie si allontanano da noi.

8.5.2 La legge di Hubble-Lemaître

Nel 1927 il sacerdote e fisico belga Georges Lemaître ricavò dalla teoria della relatività che l'Universo poteva espandersi e notò, con i pochi dati disponibili, che le galassie più lontane sembravano allontanarsi più in fretta. Nel 1929 Hubble, confrontando le distanze delle galassie con le loro velocità, mostrò che la velocità di allontanamento è direttamente proporzionale alla distanza: una galassia due volte più lontana si allontana due volte più in fretta. È la **legge di Hubble-Lemaître**, chiamata così su raccomandazione della IAU dal 2018 per riconoscere il contributo di entrambi.

Questa legge non significa che siamo al centro dell'Universo. Immagina un elastico con dei puntini equidistanti, e tiralo finché si allunga del 50 % (Figura 8.8a): nello stesso tempo i puntini più distanti si allontanano di più, quindi più velocemente, e da qualsiasi puntino si vedrebbero gli altri fuggire con velocità proporzionali alla distanza. Lo stesso vale per l'Universo, in tre dimensioni: non sono le galassie a correre nello spazio, è lo spazio stesso fra le galassie lontane che si dilata, e con esso si allungano le onde della luce che lo attraversa.

a) Un modello unidimensionale



galassia	distanza t_1	distanza t_2	aumento
A	1	1,5	+0,5
B	2	3	+1
C	3	4,5	+1,5

b) Legge di Hubble-Lemaître

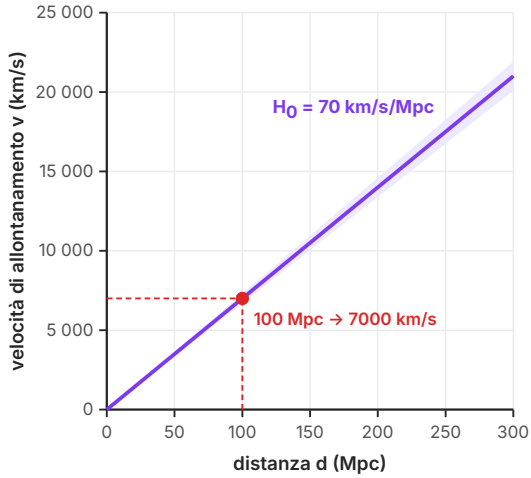


Figura 8.8 a) L'espansione in un modello unidimensionale: se tutte le distanze aumentano del 50 %, ogni galassia si allontana da «Noi» di una quantità proporzionale alla sua distanza (distanze in unità arbitrarie). b) La legge di Hubble-Lemaître, $v = H_0 \cdot d$, con H_0 = 70 km/s/Mpc; la fascia chiara corrisponde ai valori misurati oggi, fra 67 e 73 km/s/Mpc. In rosso l'esempio di una galassia a 100 Mpc.

8.5.3 Il Big Bang

Se oggi le galassie si allontanano le une dalle altre, in passato dovevano essere più vicine. Ripercorrendo all'indietro l'espansione si arriva a un'epoca in cui tutta la materia dell'Universo osservabile era concentrata in uno stato estremamente denso e caldo. La teoria del **Big Bang** descrive l'evoluzione dell'Universo a partire da quello stato: nei primi istanti l'Universo era una «zuppa» caldissima di particelle e radiazione, che espandendosi si è raffreddata. Nei primi minuti si sono formati i nuclei di idrogeno ed elio, dopo circa 380 000 anni gli atomi, e centinaia di milioni di anni dopo le prime stelle e galassie. Secondo le misure più accurate, l'Universo ha un'età di circa **13,8 miliardi di anni**. Il nome «Big Bang» (in inglese, «grande botto») fu coniato nel 1949 dall'astronomo Fred Hoyle, che sosteneva una teoria rivale.

ERRORE FREQUENTE

Il Big Bang non è un'esplosione in un punto dello spazio. Un'esplosione ordinaria avviene in un luogo preciso e lancia frammenti in uno spazio che esisteva già. Il Big Bang, invece, non ha un centro: è avvenuto «ovunque», perché è lo spazio stesso che si espande, e tutte le galassie si allontanano le une dalle altre, come i puntini dell'elastico. Per questo non esiste un punto dell'Universo da cui guardare «il luogo del Big Bang».

APPROFONDIMENTO · MISURARE L'ESPANSIONE

In formule, la legge di Hubble-Lemaître si scrive:

$$v = H_0 \cdot d$$

Qui v è la velocità con cui una galassia si allontana, d la sua distanza e H_0 la **costante di Hubble**, che vale circa **70 km/s per megaparsec**: per ogni megaparsec di distanza (3,26 milioni di anni luce) la velocità di allontanamento aumenta di circa 70 km/s. Le misure recenti danno valori fra circa 67 e 73 km/s/Mpc. Il grafico di v in funzione di d è una retta che passa per l'origine, e H_0 è la sua pendenza (Figura 8.8), proprio come la densità era la pendenza della retta massa–volume nel Capitolo 1.

Usare la legge di Hubble-Lemaître

a) Una galassia dista 50 Mpc. Con quale velocità si allontana? (H_0 = 70 km/s/Mpc)

$v = H_0 \cdot d$ = 70 km/s/Mpc × 50 Mpc = **3500 km/s**. La distanza in anni luce è $50 \times 3{,}26 \times 10^6$ a.l. ≈ $1{,}6 \times 10^8$ a.l., circa 160 milioni di anni luce.

b) Un'altra galassia si allontana a 14 000 km/s. Quanto dista?

Si ricava d dalla formula inversa: $d = v/H_0$ = 14 000 km/s ÷ 70 km/s/Mpc = **200 Mpc**.

c) Se l'espansione fosse sempre avvenuta alla velocità attuale, quanto tempo sarebbe servito a una galassia per arrivare alla sua distanza attuale partendo da «qui»? Il tempo è $t = d/v = 1/H_0$. Con 1 Mpc = $3{,}09 \times 10^{19}$ km: $t = 3{,}09 \times 10^{19}$ km ÷ 70 km/s = $4{,}4 \times 10^{17}$ s ≈ **14 miliardi di anni**. È una stima sorprendentemente vicina all'età dell'Universo ricavata con metodi più precisi.

APPROFONDIMENTO · LA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Il Big Bang fa almeno tre previsioni verificabili, tutte confermate: l'espansione dell'Universo; l'abbondanza di idrogeno ed elio, circa tre quarti e un quarto della massa della materia ordinaria, proprio come previsto dai calcoli della nucleosintesi primordiale; e l'esistenza di una debole radiazione residua dell'epoca in cui si formarono gli atomi. Questa radiazione, emessa quando l'Universo aveva una temperatura di circa 3000 K, è stata «stirata» dall'espansione fino a diventare un debole segnale di microonde che arriva da tutte le direzioni del cielo. È la **radiazione cosmica di fondo**, scoperta per caso nel 1964–1965 da Arno Penzias e Robert Wilson, che pensavano a un disturbo della loro antenna; corrisponde a una temperatura di circa 2,7 K ed è la luce più antica che possiamo osservare.

Le misure più recenti hanno mostrato che la materia ordinaria, quella fatta di atomi, è solo circa il 5 % del contenuto dell'Universo: il resto è costituito da *materia oscura*, che si rivela solo con la sua gravità, e da *energia oscura*, responsabile dell'accelerazione dell'espansione, di cui ancora non conosciamo la natura.

IN SINTESI

Distanze: 1 UA ≈ 1,496 × 10^8 km; 1 a.l. ≈ 9,46 × 10^{12} km ≈ 63 200 UA; 1 pc ≈ 3,26 a.l. ≈ 3,09 × 10^{13} km.

Parallasse: d (pc) = 1/p (″).

SINTESI

- La sfera celeste è una sfera immaginaria centrata sull'osservatore; vi si individuano zenit, orizzonte, poli celesti ed equatore celeste. Il cielo è diviso in 88 costellazioni ufficiali.
- Per la rotazione terrestre, il cielo sembra ruotare intorno ai poli celesti in circa 23 h 56 min (moto apparente diurno); la Stella Polare, vicinissima al polo nord celeste, indica il Nord e la sua altezza è circa uguale alla latitudine.
- Unità di distanza: unità astronomica (≈ 1,496 × 10^8 km), anno luce (≈ 9,46 × 10^{12} km), parsec (≈ 3,26 a.l.).
- La parallasse annua è lo spostamento apparente di una stella vicina dovuto al moto della Terra intorno al Sole; d (pc) = 1/p (″).
- Poiché la luce ha velocità finita, guardare lontano significa guardare nel passato.
- Gli spettri possono essere continui, di emissione o di assorbimento; le righe sono le impronte degli elementi chimici e rivelano la composizione delle stelle.
- Il colore di una stella dipende dalla temperatura superficiale: le stelle rosse sono le più fredde, quelle azzurre le più calde.
- Quanto una stella appare brillante dipende dall'energia che emette e dalla sua distanza; nella scala delle magnitudini, numeri più piccoli indicano stelle più brillanti.
- Approfondimenti: classi spettrali (O B A F G K M), magnitudini e diagramma H-R; la legge $v = H_0 \cdot d$ e la radiazione cosmica di fondo.
- Le stelle nascono dalle nebulose e vivono fondendo idrogeno in elio; la massa ne decide la durata e la fine: nana bianca dopo la fase di gigante rossa, oppure supernova con stella di neutroni o buco nero.
- Quasi tutti gli elementi più pesanti dell'elio sono stati prodotti dalle stelle (nucleosintesi stellare).
- Le galassie si classificano in ellittiche, lenticolari, spirali, spirali barrate e irregolari; la Via Lattea è una spirale barrata di circa 100 000 a.l., con il Sole a circa 26 000 a.l. dal centro.
- Le galassie si allontanano con velocità proporzionali alla distanza (legge di Hubble-Lemaître): l'Universo si espande e ha avuto origine dal Big Bang, circa 13,8 miliardi di anni fa.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● L'anno luce è:
   - **A.** il tempo che la luce impiega ad arrivare dal Sole alla Terra
   - **B.** la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno
   - **C.** il tempo che una stella impiega a nascere
   - **D.** la distanza media fra la Terra e il Sole

2. ● Durante la notte la Stella Polare sembra quasi ferma perché:
   - **A.** è la stella più vicina alla Terra
   - **B.** è la stella più luminosa del cielo
   - **C.** si muove insieme alla Terra
   - **D.** si trova vicinissima al polo nord celeste

3. ●● Se la parallasse annua di una stella è la metà di quella di un'altra, la prima stella si trova:
   - **A.** a distanza doppia
   - **B.** a distanza dimezzata
   - **C.** a distanza quadrupla
   - **D.** alla stessa distanza, ma è meno luminosa

4. ● Osservata con uno spettroscopio, la luce del Sole mostra:
   - **A.** solo poche righe colorate su fondo nero
   - **B.** un unico colore giallo
   - **C.** uno spettro continuo senza alcuna riga
   - **D.** uno spettro continuo solcato da righe scure

5. ●● Una stella di 20 masse solari concluderà la sua evoluzione:
   - **A.** come nana bianca, dopo aver formato una nebulosa planetaria
   - **B.** come nana bruna
   - **C.** con un'esplosione di supernova, lasciando una stella di neutroni o un buco nero
   - **D.** restando in sequenza principale per sempre

6. ● Nella classificazione di Hubble, la Via Lattea è una galassia:
   - **A.** ellittica
   - **B.** irregolare
   - **C.** lenticolare
   - **D.** a spirale barrata

Vero o falso

7. ● Le stelle di una stessa costellazione si trovano tutte, più o meno, alla stessa distanza dalla Terra.

8. ● La luce che oggi riceviamo dalla galassia di Andromeda è partita circa 2,5 milioni di anni fa.

9. ● Una stella di magnitudine apparente −1 appare più brillante di una di magnitudine +2.

10. ● Le stelle rosse sono più calde delle stelle azzurre.

11. ●● Il Sole terminerà la sua vita esplodendo come supernova.

Applicare e calcolare

12. ● La distanza media Terra–Sole è $1{,}496 \times 10^8$ km e la velocità della luce è $3{,}00 \times 10^5$ km/s. Quanto tempo impiega la luce del Sole a raggiungerci? Esprimi il risultato in secondi e in minuti e secondi.

13. ● Alfa Centauri A dista 4,37 anni luce. Esprimi la distanza in chilometri (1 a.l. = $9{,}46 \times 10^{12}$ km) e in parsec.

14. ●● La parallasse annua di Sirio è 0,379″. Calcola la sua distanza in parsec e in anni luce.

15. ●● La stella di Barnard ha una parallasse di 0,547″, Proxima Centauri di 0,768″. Quale delle due è più vicina? Calcola la distanza di entrambe in anni luce.

16. ●●● In un modello in scala la distanza Terra–Sole (1 UA) è rappresentata da 1 m. Proxima Centauri dista circa 268 600 UA. A quale distanza andrebbe collocata nel modello? E la galassia di Andromeda, a 2,5 milioni di anni luce (1 a.l. ≈ 63 200 UA)?

Leggere dati e figure

17. ● Nello spettro di una stella si osservano righe scure a 656 nm, 486 nm, 434 nm e 410 nm. Confrontandole con la Figura 8.3, di quale elemento si tratta? Perché le righe sono scure e non colorate?

18. ● Osserva la Figura 8.4. Quali tappe attraversa una stella come il Sole, dalla nascita alla fine? Che cosa resta, invece, di una stella di 15 masse solari?

Indagare e argomentare

19. ●● Progetta un'esperienza che simuli la parallasse con il tuo pollice e i tuoi occhi. Che cosa osservi avvicinando il pollice al viso? Che ruolo hanno gli oggetti lontani?

20. ●● Un amico sostiene: «Le stelle che vedo stanotte esistono ora esattamente come le vedo». Spiega perché non è necessariamente vero, con un esempio numerico.

21. ●● Perché gli osservatori astronomici si costruiscono in montagna e lontano dalle città? Proponi due interventi con cui il tuo comune potrebbe ridurre l'inquinamento luminoso.

22. ●●● «Siamo fatti di polvere di stelle». Commenta questa frase spiegando da dove provengono l'idrogeno, il carbonio, il ferro e l'oro presenti sulla Terra.

Approfondimento: stelle e Universo in numeri

23. ● Rispetto a una stella di classe spettrale B, una stella di classe M è:
    A. più calda e di colore azzurro
    B. più calda e di colore rosso
    C. più fredda e di colore rossastro
    D. più giovane, ma della stessa temperatura

24. ●● Una stella di magnitudine apparente 1 e una di magnitudine 6: quale affermazione è corretta?
    A. La seconda appare 5 volte più brillante della prima.
    B. La prima appare 100 volte più brillante della seconda.
    C. La prima appare 6 volte più brillante della seconda.
    D. La seconda appare 100 volte più brillante della prima.

25. ● Nel diagramma H-R il Sole si trova:
    A. sulla sequenza principale, fra le stelle di classe G
    B. fra le supergiganti, in alto a destra
    C. fra le nane bianche, in basso a sinistra
    D. fra le giganti rosse

26. ●● La radiazione cosmica di fondo corrisponde a una temperatura di circa 2,7 K e arriva da tutte le direzioni del cielo.

27. ●● La stella A ha magnitudine apparente 2, la stella B magnitudine 7, la stella C magnitudine 12. Quante volte A appare più brillante di B? E di C?

28. ●● Il Sole ha magnitudine assoluta +4,8. Quale sarebbe la sua magnitudine apparente se si trovasse a 100 pc? Sarebbe visibile a occhio nudo (limite ≈ 6)? *Suggerimento: parti dalla distanza di 10 pc.*

29. ●● Usando H_0 = 70 km/s/Mpc: a) con quale velocità si allontana una galassia distante 40 Mpc? b) Quanto dista, in Mpc e in anni luce, una galassia che si allontana a 10 500 km/s?

30. ●●● Calcola il tempo $1/H_0$ in anni nel caso in cui H_0 = 73 km/s/Mpc (1 Mpc = $3{,}086 \times 10^{19}$ km; 1 anno = $3{,}156 \times 10^{7}$ s). È maggiore o minore del valore ottenuto con 70 km/s/Mpc?

31. ●● Osserva la Figura 8.5. Betelgeuse e Rigel hanno luminosità simili. Quale delle due è più calda? Quale ha il raggio maggiore? Spiega come lo deduci dalla posizione delle due stelle e dalle linee tratteggiate.

32. ● Usando il grafico della Figura 8.8b, determina: a) la velocità di allontanamento di una galassia distante 200 Mpc; b) la distanza di una galassia che si allontana a 21 000 km/s.

33. ●● La tabella riporta dati approssimati di quattro stelle brillanti.

Stella	Magnitudine apparente	Distanza (a.l.)	Magnitudine assoluta
Sirio	−1,46	8,6	+1,4
Canopo	−0,74	≈ 310	≈ −5,6
Vega	+0,03	25	+0,6
Rigel	+0,13	≈ 860	≈ −7,0

a) Quale stella appare più brillante dalla Terra? b) Quale emette più energia? c) Perché le due risposte sono diverse?

PER APPROFONDIRE

- [SAG] C. Sagan, *Cosmos*: i capitoli sulle stelle, sulla nascita degli elementi e sulle galassie, raccontati con passione da uno dei grandi divulgatori del Novecento.
- [HAW] S. Hawking, *Dal big bang ai buchi neri*: una guida all'espansione dell'Universo, al Big Bang e ai buchi neri, per chi vuole spingersi oltre il programma.
- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: le pagine introduttive sulla Terra come pianeta e sulla sua origine nel Sistema solare.

Glossario del capitolo

Anno luce (a.l.)
Unità di distanza: lo spazio percorso dalla luce nel vuoto in un anno, circa $9{,}46 \times 10^{12}$ km.

Classe spettrale
Categoria in cui si classifica una stella in base al suo spettro e quindi alla temperatura superficiale: O B A F G K M, dalla più calda alla più fredda.

Costellazione
Gruppo di stelle che appaiono vicine nel cielo; ufficialmente, una delle 88 regioni in cui la IAU ha diviso la sfera celeste.

Diagramma H-R
Grafico che riporta la luminosità delle stelle in funzione della temperatura superficiale; vi si distinguono sequenza principale, giganti, supergiganti e nane bianche.

Legge di Hubble-Lemaître
Le galassie si allontanano con velocità proporzionali alla distanza: $v = H_0 \cdot d$, con $H_0 \approx 70$ km/s/Mpc.

Magnitudine apparente
Misura di quanto una stella appare brillante dalla Terra; la scala è inversa e una differenza di 5 magnitudini corrisponde a un fattore 100.

Moto apparente diurno
Rotazione apparente della sfera celeste intorno ai poli celesti, in circa 23 h 56 min, dovuta alla rotazione della Terra.

Nana bianca
Resto compatto di una stella di massa piccola o media, con massa paragonabile a quella del Sole e dimensioni simili a quelle della Terra.

Parallasse annua
Angolo sotto cui, da una stella, si vedrebbe il raggio dell'orbita terrestre; è la metà dello spostamento apparente della stella in sei mesi.

Parsec (pc)
Distanza alla quale una stella ha una parallasse annua di 1″; vale circa 3,26 anni luce. $d\,(\text{pc}) = 1/p\,(″)$.

Radiazione cosmica di fondo
Debole radiazione di microonde, corrispondente a circa 2,7 K, che arriva da tutte le direzioni: è il residuo dell'Universo caldo primordiale e una prova del Big Bang.

Sequenza principale
Fascia diagonale del diagramma H-R in cui si trovano le stelle che fondono idrogeno in elio nel nucleo, circa il 90 % del totale.

Sfera celeste
Sfera immaginaria, di raggio grandissimo e centrata sull'osservatore, su cui si proiettano le posizioni apparenti degli astri.

Spettro di assorbimento
Spettro continuo solcato da righe scure, prodotto quando la luce attraversa un gas più freddo che assorbe le proprie lunghezze d'onda caratteristiche.

Spettro di emissione
Spettro formato da righe colorate su fondo scuro, emesso da un gas caldo e rarefatto; le righe sono caratteristiche di ogni elemento.

Stelle circumpolari
Stelle abbastanza vicine al polo celeste da non tramontare mai per un osservatore a una data latitudine.

Supernova
Esplosione con cui termina la vita di una stella di grande massa; lascia una stella di neutroni o un buco nero e disperde elementi pesanti.

Unità astronomica (UA)
Distanza media fra la Terra e il Sole, pari a 149 597 870 700 m (circa $1{,}496 \times 10^8$ km).

Soluzioni

1. B. L'anno luce è una distanza: lo spazio percorso dalla luce nel vuoto in un anno, circa $9{,}46 \times 10^{12}$ km.

2. D. La Polare è a meno di un grado dal polo nord celeste, sul prolungamento dell'asse terrestre: il cielo ruota intorno a quel punto. Non è né la stella più vicina né la più luminosa.

3. A. La distanza è inversamente proporzionale alla parallasse ($d = 1/p$): parallasse dimezzata, distanza doppia.

4. D. È uno spettro di assorbimento: lo spettro continuo prodotto negli strati profondi è solcato dalle righe scure degli elementi dell'atmosfera solare.

5. C. Oltre circa 8 masse solari la stella diventa una supergigante ed esplode come supernova; resta una stella di neutroni o, per le masse maggiori, un buco nero.

6. D. La Via Lattea è una spirale barrata.

7. F. Le stelle di una costellazione sono solo nella stessa direzione; le loro distanze possono essere molto diverse (in Orione, Betelgeuse ≈ 550 a.l., Rigel ≈ 860 a.l.).

8. V. Andromeda dista circa 2,5 milioni di anni luce, quindi la sua luce viaggia da circa 2,5 milioni di anni.

9. V. La scala è inversa: −1 è minore di +2, quindi la prima stella appare più brillante (di 3 magnitudini, circa 16 volte).

10. F. È il contrario: le stelle rosse sono le più fredde (circa 3000 K), quelle azzurre le più calde (oltre 20 000 K).

11. F. Il Sole ha una massa troppo piccola: diventerà una gigante rossa, espellerà una nebulosa planetaria e finirà come nana bianca.

12. $t = d/v = 1{,}496 \times 10^8$ km $\div\ 3{,}00 \times 10^5$ km/s = 499 s ≈ 8 min 19 s.

13. $d = 4{,}37 \times 9{,}46 \times 10^{12}$ km $= 4{,}13 \times 10^{13}$ km; in parsec: $4{,}37 \div 3{,}26 = 1{,}34$ pc.

14. $d = 1/0{,}379 = 2{,}64$ pc; $2{,}64 \times 3{,}26 = 8{,}60$ a.l.

15. È più vicina Proxima Centauri, che ha la parallasse maggiore. Barnard: $1/0{,}547 = 1{,}83$ pc = 5,96 a.l.; Proxima: $1/0{,}768 = 1{,}30$ pc = 4,24 a.l.

16. Proxima: 268 600 UA × 1 m/UA = 268 600 m ≈ 269 km. Andromeda: $2{,}5 \times 10^6 \times 63\,200$ UA $= 1{,}58 \times 10^{11}$ UA → $1{,}58 \times 10^{11}$ m $= 1{,}58 \times 10^8$ km: nel modello sarebbe più lontana del vero Sole dalla Terra.

17. Idrogeno: sono le quattro righe di Balmer, a 656, 486, 434 e 410 nm. Le righe sono scure perché si tratta di uno spettro di assorbimento: il gas più freddo dell'atmosfera stellare assorbe, dalla luce continua proveniente dall'interno, proprio le lunghezze d'onda che l'idrogeno sa emettere.

18. Il Sole: nebulosa → protostella → sequenza principale → gigante rossa → nebulosa planetaria e nana bianca. Una stella di 15 masse solari (oltre circa 8) diventa una supergigante rossa ed esplode come supernova; resta una stella di neutroni (un buco nero solo per le stelle di massa ancora maggiore).

19. Traccia: tieni il pollice a braccio teso davanti a un oggetto lontano (lo spigolo di un edificio) e guardalo alternando l'occhio destro e il sinistro; annota di quanto si sposta rispetto allo sfondo, per esempio contro un righello appeso al muro. Ripeti con il pollice a metà distanza: lo spostamento cresce. Gli occhi rappresentano le due posizioni della Terra (la distanza fra gli occhi è la «base», come i 2 UA dell'orbita), il pollice la stella vicina, gli oggetti lontani le stelle di sfondo, che non si spostano in modo apprezzabile. Conclusione: più l'oggetto è vicino, maggiore è la parallasse.

20. Traccia: la luce ha velocità finita, quindi vediamo ogni stella com'era quando la luce è partita: Sirio come 8,6 anni fa, Betelgeuse come circa 550 anni fa, la galassia di Andromeda come 2,5 milioni

di anni fa. Nel frattempo una stella può essere cambiata o persino esplosa come supernova: la notizia sarebbe ancora in viaggio. Per le stelle visibili a occhio nudo, quasi tutte entro qualche migliaio di anni luce, è improbabile ma possibile.

21. Traccia: in montagna l'aria sopra il telescopio è più sottile, più secca e meno turbolenta, e spesso si è al di sopra delle nubi e dell'inquinamento; lontano dalle città il cielo è buio, senza la luce artificiale diffusa dall'atmosfera che cancella gli oggetti deboli. Interventi possibili: lampioni schermati che illuminano solo verso il basso, luci di intensità e colore adeguati (meno luce bianco-azzurra), spegnimento o riduzione dell'illuminazione nelle ore notturne e degli edifici non abitati, regolamenti per insegne pubblicitarie e fari.

22. Traccia: l'idrogeno (con gran parte dell'elio) si è formato nei primi minuti dopo il Big Bang. Il carbonio è prodotto dalla fusione dell'elio nelle giganti rosse e disperso dalle nebulose planetarie; il ferro è l'ultimo elemento prodotto dalla fusione nel nucleo delle supergiganti e viene liberato dalle supernove; l'oro e gli altri elementi più pesanti del ferro si formano in eventi violenti come le supernove e gli scontri fra stelle di neutroni. Questa materia, restituita alle nebulose, è entrata nella nube da cui sono nati il Sole e la Terra, 4,6 miliardi di anni fa: tranne l'idrogeno, gli atomi del nostro corpo sono stati fabbricati nelle stelle.

23. C. Le stelle di classe M hanno temperature superficiali inferiori a circa 3700 K e appaiono rossastre; quelle di classe B superano i 10 000 K e sono bianco-azzurre.

24. B. Numero più piccolo = stella più brillante; 6 − 1 = 5 magnitudini = fattore 100.

25. A. Il Sole è una stella di sequenza principale di classe G2 (G2 V).

26. V. È la radiazione residua dell'epoca in cui si formarono gli atomi, «stirata» dall'espansione; corrisponde a circa 2,7 K e arriva uniformemente da tutto il cielo.

27. A e B: 7 − 2 = 5 magnitudini, fattore 100. A e C: 12 − 2 = 10 magnitudini, fattore 100 × 100 = 10 000.

28. A 10 pc la magnitudine apparente è uguale a quella assoluta, +4,8. A 100 pc la distanza è 10 volte maggiore, la luminosità apparente 100 volte minore e la magnitudine aumenta di 5: $m = 4{,}8 + 5 = 9{,}8$. Non sarebbe visibile a occhio nudo (9,8 > 6); servirebbe un telescopio.

29. a) $v = 70$ km/s/Mpc × 40 Mpc = 2800 km/s. b) $d = 10\,500 \div 70 = 150$ Mpc; $150 \times 3{,}26 \times 10^6$ a.l. $= 4{,}89 \times 10^8$ a.l. (circa 490 milioni di anni luce).

30. $1/H_0 = 3{,}086 \times 10^{19}$ km ÷ 73 km/s $= 4{,}23 \times 10^{17}$ s; diviso $3{,}156 \times 10^7$ s/anno $= 1{,}34 \times 10^{10}$ anni (13,4 miliardi di anni). Con 70 km/s/Mpc si ottiene $1{,}40 \times 10^{10}$ anni: una costante di Hubble maggiore dà un tempo minore, perché t è inversamente proporzionale a H_0.

31. Rigel è più calda (circa 12 000 K, a sinistra nel diagramma), Betelgeuse più fredda (circa 3600 K, a destra). A parità di luminosità, la stella più fredda emette meno energia per metro quadrato e deve quindi avere una superficie molto più grande: Betelgeuse si trova vicino alla linea dei 1000 $R_\odot$, Rigel fra quelle di 1 e 100 $R_\odot$ (circa 80 $R_\odot$). Betelgeuse ha il raggio maggiore, circa dieci volte quello di Rigel.

32. a) A 200 Mpc la retta corrisponde a 14 000 km/s (70 × 200). b) A 21 000 km/s corrisponde una distanza di 300 Mpc (21 000 ÷ 70).

33. a) Sirio, che ha la magnitudine apparente più piccola (−1,46). b) Rigel, che ha la magnitudine assoluta più piccola (≈ −7,0). c) La luminosità apparente dipende anche dalla distanza: Sirio è vicinissima (8,6 a.l.) ma intrinsecamente poco luminosa, Rigel emette moltissima energia ma è cento volte più lontana.