

Astronomia pop

Astronomia facile per chi parte da zero

Lorenzo Pantieri

Un libro come questo non sarà mai davvero finito, e per fortuna il vuoto che lascia non è così grande. Grazie ai miei studenti e ai miei insegnanti: il libro è più loro che mio. Grazie a Elena, lei sa perché. ♡ L'immagine di copertina mostra una nebulosa attraversata dai colori dell'arcobaleno.
♡

Lorenzo Pantieri

Astronomia pop. Astronomia facile per chi parte da zero

Copyright © 2026

☞ lorenzo.pantieri@gmail.com

Indice

INTRODUZIONE

1 LA TERRA **1**
1 La Terra è rotonda . . . 1
2 La Terra si muove . . . 4
3 Orientarsi sulla Terra . . . 10
Domande e risposte . . . 13
Casa, dolce casa . . . 15
Esercizi . . . 17

2 IL SOLE E LA LUNA **33**
1 Misurare il cielo . . . 33
2 Il Sole . . . 35
3 La Luna . . . 39
Domande e risposte . . . 43
Giorno e notte . . . 45
Esercizi . . . 47

3 I PIANETI **53**
1 Il cielo in tre atti . . . 53
2 Il pianeta scoperto con una penna . . . 56
3 Il sistema solare . . . 58
Domande e risposte . . . 62
Esploriamo il Sistema solare . . . 64
Esercizi . . . 66

4 LE STELLE **81**
1 Il cielo stellato . . . 81
2 Le caratteristiche di una stella . . . 83
3 L'evoluzione stellare . . . 85
Domande e risposte . . . 89
Luci dal passato . . . 91
Esercizi . . . 94

5 LE GALASSIE **105**
1 La Via Lattea . . . 105
2 Le galassie tra forme e incontri . . . 106
3 Dalle galassie all'universo . . . 108
Domande e risposte . . . 111
Alla scoperta della Via Lattea . . . 113
Esercizi . . . 115

6 L'UNIVERSO **117**
1 Dove Dio ha diviso per zero 117
2 Siamo soli nell'universo? 119
3 Dal Big Bang al grande freddo 122
Domande e risposte 129
Dai buchi neri al Big Bang 131
Esercizi 133

A CRONOLOGIA **139**

B COSTELLAZIONI E MITI **141**

INDICE DEI NOMI **147**

Introduzione

Da qualche parte, qualcosa di incredibile
attende di essere conosciuto.

Carl Sagan

L'astronomia non si fa solo negli osservatori o con grandi telescopi: è intorno a noi. È nel susseguirsi del giorno e della notte, nelle fasi della Luna, nel movimento apparente del Sole, nelle stelle che vediamo brillare e perfino nel modo in cui misuriamo il tempo. Osservare il cielo significa quindi partire da fenomeni familiari per capire meglio come funziona il nostro pianeta, il Sistema solare e, più in generale, l'universo.

Questo libro è diviso in sei capitoli.

- **Il capitolo 1** è dedicato alla Terra e ai suoi moti.
- **Il capitolo 2** ci porta verso il Sole e la Luna.
- **Il capitolo 3** ci conduce nel Sistema solare, tra pianeti e altri corpi celesti.
- **Il capitolo 4** entra nel mondo delle stelle, dalla nascita alla morte.
- **Il capitolo 5** allarga lo sguardo alla Via Lattea e alle altre galassie.
- **Il capitolo 6** affronta l'universo nel suo insieme: origine, evoluzione e fine.

Insomma, partiremo dalla Terra, allargheremo lo sguardo verso il Sole e la Luna, attraverseremo il Sistema solare e arriveremo fino alle stelle, alle galassie e all'universo intero.

Ogni capitolo contiene domande e risposte, osservazioni da provare in autonomia, esercizi e mappe concettuali, per scoprire quanta astronomia si nasconde nelle cose che osserviamo ogni giorno.

Concludono l'opera due appendici.

- **L'appendice A** raccoglie alcune tappe essenziali della storia dell'astronomia.
- **L'appendice B** è dedicata alle costellazioni e ai loro miti.

Buona lettura, e buon viaggio nell'astronomia.

Lorenzo Pantieri

1 La Terra

Dove siamo? Che forma ha la Terra? Come si muove nello spazio? E dove si trova, esattamente, il nostro pianeta nell'universo?

In questo capitolo partiremo dalla Terra che abitiamo, per capire come abbiamo scoperto la sua forma, le sue dimensioni e il suo movimento nello spazio. Poi allargheremo lo sguardo, fino a trovare il nostro posto nel cosmo. Prima di allontanarci nello spazio, quindi, conviene guardare bene sotto i nostri piedi.

1 La Terra è rotonda

Per prima cosa dobbiamo capire che forma ha il mondo sul quale viviamo. Oggi sembra una domanda quasi infantile: abbiamo visto migliaia di fotografie della Terra dallo spazio e possiamo osservare direttamente la curvatura del pianeta. Ma per la maggior parte della storia umana nessuno ha mai potuto vedere la Terra dall'esterno.

Eppure gli antichi Greci riuscirono a capire che la Terra è sferica osservando semplicemente il cielo, le eclissi, le ombre e le navi che scomparivano all'orizzonte. E non si limitarono a intuirlo: arrivarono persino a misurare le dimensioni del pianeta.

Come abbiamo capito che la Terra è una sfera

Il polo sud? Non esiste. Il Sole? È più piccolo della Svizzera. Le stelle? Si trovano a poche migliaia di chilometri da noi.

Benvenuti nel mondo del **terrapiattismo**, il movimento secondo cui la Terra non è un globo, ma un disco, benché secoli di osservazioni astronomiche, una miriade di immagini dallo spazio e il buon senso dicano il contrario. Una bufala, a cui credono, fra gli altri, milioni di statunitensi e decine di migliaia di italiani. Nell'era di Internet e delle stazioni spaziali, com'è possibile che qualcuno pensi che la Terra sia fatta come un **frisbee** o come una pizza (figura 1)?



▲ **Figura 1**
La foto, scattata nel 1968 durante la missione Apollo 8, mostra la Terra che sorge sull'orizzonte lunare.

In realtà, la domanda è interessante anche per chi al terrapiattismo non crede affatto: come abbiamo capito che la Terra è una sfera? Non abbiamo sempre potuto fotografarla dallo spazio, e non abbiamo avuto bisogno di farlo. Molto prima dei satelliti, delle sonde spaziali e degli astronauti, gli astronomi avevano già trovato diversi indizi che puntavano tutti nella stessa direzione.

Alcuni filosofi greci immaginarono una Terra sferica. Anassimandro, per esempio, aveva capito che la Terra era un corpo sospeso nello spazio. Qualcuno, forse Parmenide, forse Pitagora, o un membro della scuola pitagorica, aveva suggerito che la forma più ragionevole per la Terra fosse quella di una palla. Ma si trattava ancora di argomentazioni filosofiche. Un passo decisivo fu compiuto quando gli astronomi cominciarono a cercare nel cielo una prova osservabile della forma della Terra.

Un indizio importante venne dalle eclissi. Anassagora capì come funzionano: un'eclissi di Sole avviene quando la Luna si mette fra noi e il Sole e ne oscura la luce, mentre un'eclissi di Luna avviene quando è la Terra a mettersi fra il Sole e la Luna, proiettando la propria ombra sulla superficie lunare. Aristotele osservò che, durante un'eclissi di Luna, il bordo dell'ombra della Terra è sempre curvo, e in particolare circolare.

Molti oggetti, come una moneta, possono proiettare un'ombra circolare, ma quella di un disco rimane circolare solo quando la luce lo colpisce da una particolare direzione. Cambiando l'inclinazione della luce, infatti, l'ombra si deforma. Durante le eclissi, invece, l'ombra della Terra rimane sempre circolare, anche quando il Sole si trova in posizioni diverse nel cielo. La Terra deve quindi avere una forma capace di produrre un'ombra circolare indipendentemente dalla direzione della luce.

La forma sferica della Terra spiega perché la sua ombra rimane circolare durante le eclissi, qualunque sia la posizione del Sole nel cielo. Per Aristotele era un forte argomento a favore della sfericità della Terra. Ma non era l'unico: quando una nave si allontana dalla costa, lo scafo scompare prima dell'albero e delle vele, mentre spostandosi verso nord o verso sud cambiano le stelle visibili e la loro altezza sull'orizzonte. Osservazioni difficili da spiegare su una Terra piatta, ma naturali sulla superficie di una sfera.

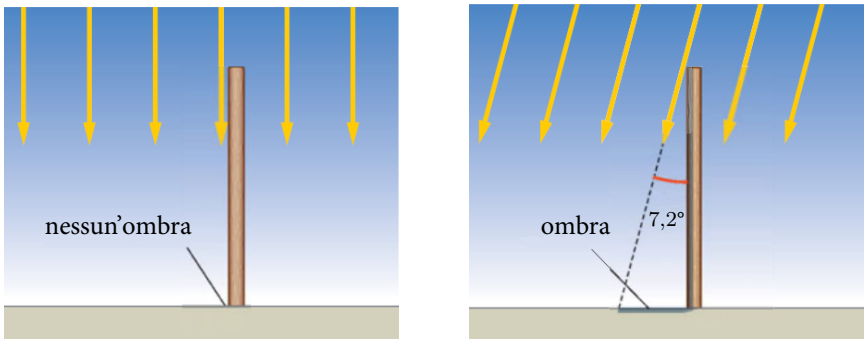
Gli antichi Greci, però, non si limitarono a capire che la Terra era rotonda. Provarono anche a misurarla.

Eratostene misura la Terra

Dagli antichi Greci in poi, le persone di cultura dibatterono sulla posizione della Terra nell'universo, ma la sua forma sferica divenne progressivamente un fatto acquisito. Ventitré secoli fa Eratostene di Cirene, città che oggi si trova in Libia, misurò addirittura le dimensioni della Terra.

Oggi misurare le dimensioni del nostro pianeta è facile, grazie alle sonde spaziali, ai satelliti e agli strumenti della geodesia. Eratostene, invece, ci riuscì più di duemila anni fa, quando la prima circumnavigazione della Terra era ancora lontana, servendosi solo di uno "gnomone", un bastone piantato verticalmente in un terreno pianeggiante, e di un po' di matematica.

Eratostene sapeva che a Siene, una città dell'antico Egitto, l'attuale Assuan, a mezzogiorno del solstizio d'estate il Sole si trovava quasi allo zenit. Siene infatti si trova vicino al tropico del Cancro: in quel momento il Sole è molto alto nel cielo e i raggi solari cadono quasi perpendicolari al terreno. Un bastone piantato verticalmente non proietta quindi praticamente alcuna ombra. Secondo la tradizione, la luce del Sole arrivava perfino fino al fondo dei pozzi.



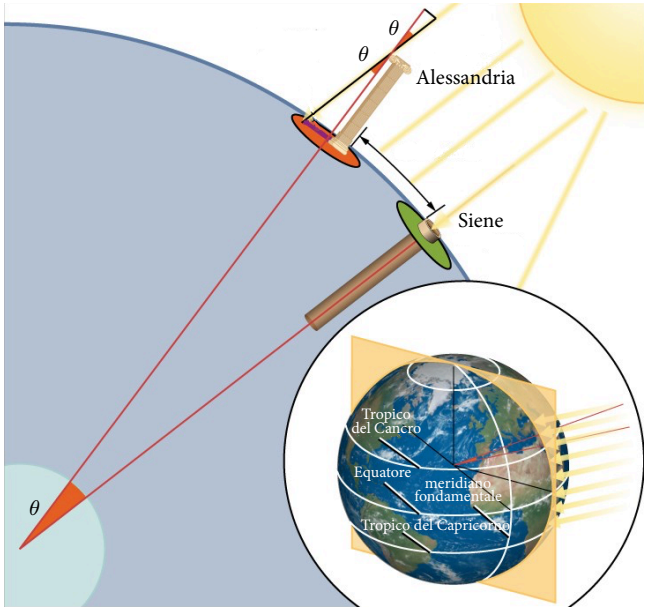
(a) A mezzogiorno del solstizio d'estate a Siene i raggi solari sono perpendicolari alla superficie terrestre.

(b) A mezzogiorno del solstizio d'estate ad Alessandria d'Egitto i raggi solari formano un angolo di 7,2° con la verticale.

▲ Figura 2
I raggi solari cadono sulla Terra con inclinazioni diverse a seconda del luogo.

Nello stesso giorno Eratostene misurò l'ombra dello gnomone ad Alessandria d'Egitto, che si trovava a nord di Siene. Grazie all'ombra del bastone stabilì che la direzione dei raggi solari formava un angolo di circa 7,2° con la verticale, cioè $1/50$ di un angolo giro (**figura 2b**).

Il punto fondamentale è che i raggi del Sole, essendo il Sole molto lontano dalla Terra, possono essere considerati praticamente paralleli. Se a Siene arrivano perpendicolari al terreno e ad Alessandria sono inclinati di 7,2°, la differenza non può essere dovuta alla luce del Sole: deve dipendere dalla curvatura della Terra. Nelle condizioni scelte da Eratostene, l'angolo α di inclinazione dei raggi solari ad Alessandria è uguale all'angolo β formato dai raggi che uniscono il centro della Terra con le due città (**figura ??**).



▲ Figura 3
Eratostene misura la Terra con un bastone.

Eratostene dedusse quindi che la circonferenza della Terra doveva essere 50 volte la distanza tra Alessandria e Siene, perché l'angolo che sottende la loro distanza è un cinquantesimo dell'angolo giro che sottende l'intera circonferenza della Terra. Vale quindi la proporzione:

$$\frac{\text{distanza Siene-Alessandria}}{\text{circonferenza terrestre}} = \frac{\alpha}{360°}$$

Non restava quindi che misurare la distanza tra le due città. Secondo la ricostruzione tradizionale, Eratostene utilizzò una stima basata sulla distanza percorsa dalle carovane: se un cammello percorreva in media l'equivalente di 20 chilometri al giorno e un cammello impiegava 40 giorni per percorrere il tragitto, la distanza era quindi pari a circa 800 chilometri. La circonferenza terrestre risultava così dell'ordine di 40 000 chilometri. La stima attribuita a Eratostene, a seconda dei valori e delle conversioni delle unità utilizzate, è sorprendentemente vicina al valore misurato oggi, poco più di 40 000,km.

L'esperimento, semplice ma geniale, mostra la potenza della matematica applicata alla scienza, che permette di risolvere brillantemente problemi molto complessi. Lo stupore per una misura del genere fu immenso anche nell'antichità. Plinio il Vecchio la definì «un'impresa inaudita, ma così semplice che è impossibile non crederci».

L'impresa di Eratostene, rimasta ineguagliata per molti secoli, fu superata solo alla fine del Settecento, quando Jean-Baptiste Delambre e Pierre Méchain misurarono il meridiano di Parigi applicando la novità teorica della trigonometria sferica e quella pratica del "cerchio ripetitore", uno strumento per misurare gli angoli. La precisione era ormai molto maggiore, ma l'idea di fondo era la stessa: usare misure locali per ricavare le dimensioni di un oggetto troppo grande per essere misurato direttamente.

Ipparco scopre l'America

Straordinaria fu anche l'intuizione di Ipparco sull'esistenza dell'America. La dedusse dalla grande differenza fra le maree dell'oceano Atlantico e dell'oceano Indiano, osservata dagli esploratori che si erano spinti da un lato verso l'Europa settentrionale nella spedizione guidata dal geografo Pitea, e dall'altro verso l'Asia al seguito di Alessandro Magno.

Diciassette secoli prima di Cristoforo Colombo, Ipparco capì che i due oceani non potevano essere collegati. Intuì che un'enorme massa terrestre doveva separare le acque, come in compartimenti stagni. Senza navigare, solo con la logica, aveva già previsto l'esistenza di un continente interposto: l'America.

Ipparco si occupò anche della geografia terrestre e usò coordinate basate sulla latitudine e sulla longitudine. La Terra poteva così diventare un oggetto da misurare e rappresentare matematicamente, non più solo un territorio da descrivere.

Ma una domanda restava aperta: dove si trova la Terra nell'universo? È una sfera immobile al centro del cosmo, mentre Sole, pianeti e stelle le girano intorno, oppure si muove? Per gli astronomi antichi la risposta non era affatto ovvia. Capire che la Terra non era il centro dell'universo avrebbe richiesto un nuovo, enorme cambio di prospettiva.

2 La Terra si muove

La Terra non è ferma. Ruota continuamente su sé stessa, viaggia attorno al Sole e, su tempi molto più lunghi, cambia lentamente il proprio orientamento nello spa-

zio. Alcuni di questi movimenti sono così familiari che ne osserviamo ogni giorno le conseguenze. Altri sono tanto lenti da essere impercettibili nel corso di una vita.

La Terra gira su sé stessa

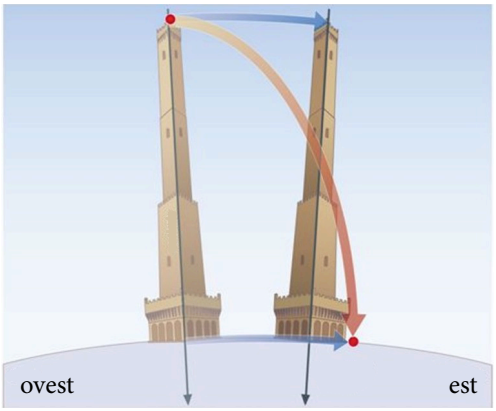
Per secoli abbiamo guardato il Sole, la Luna e le stelle attraversare il cielo senza renderci conto che, in realtà, era la Terra a muoversi.

L'idea che la Terra ruoti su sé stessa era già stata proposta nell'antichità. I pitagorici, per esempio, avevano considerato la possibilità che fosse la Terra a ruotare, invece di immaginare l'intero cielo in movimento attorno a noi. L'ipotesi era semplice: il moto quotidiano del Sole e delle stelle può essere spiegato sia facendo ruotare il cielo attorno a una Terra immobile, sia facendo ruotare la Terra da ovest verso est.

Per molto tempo, però, prevalse la prima interpretazione. Aristotele sollevò un'obiezione apparentemente molto convincente: se la Terra ruotasse, una pietra lasciata cadere da una certa altezza non dovrebbe arrivare esattamente sotto il punto da cui è stata lasciata cadere, perché durante la caduta la Terra continuerebbe a muoversi. E, soprattutto, se la Terra ruotasse così velocemente, perché non ce ne accorgeremmo?

Oggi sappiamo che l'obiezione non funziona. Quando lasciamo cadere un oggetto dalla cima di una torre, l'oggetto ha già la stessa velocità orizzontale della torre e della superficie terrestre. Durante la caduta conserva quindi gran parte di quella velocità e non rimane indietro rispetto al suolo. Lo stesso accade quando saltiamo: continuiamo a muoverci insieme alla Terra, anche se per un istante siamo sollevati dal terreno.

La rotazione terrestre è stata però dimostrata sperimentalmente solo molti secoli dopo. Una delle prime prove fu realizzata nel 1791 da Giovanni Battista Guglielmini a Bologna, nella Torre degli Asinelli. Lasciando cadere delle sfere di piombo dalla sommità della torre, alta circa 100 metri, osservò che esse cadevano leggermente a est rispetto al punto che ci si sarebbe aspettati assumendo una Terra immobile (**figura 4**).



▲ **Figura 4**
L'esperimento di Guglielmini.

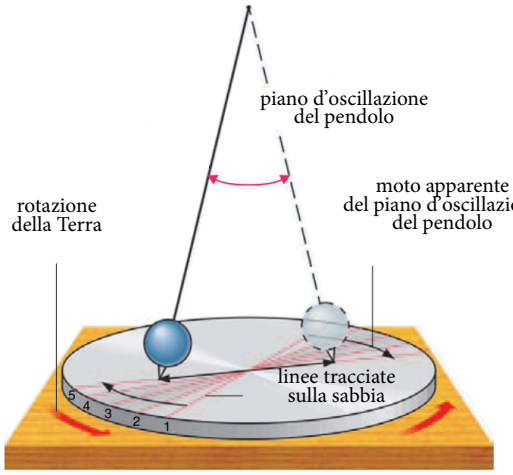
Il motivo è che la parte superiore della torre si muove, insieme alla Terra, un po' più velocemente della sua base. Quando la sfera viene lasciata cadere, conserva la maggiore velocità verso est che possedeva in cima alla torre e finisce quindi leggermente spostata in quella direzione.

L'esperimento non è semplice: il vento, le vibrazioni della torre e altri disturbi possono facilmente nascondere un effetto così piccolo. Una dimostrazione molto più spettacolare arrivò nel 1851, quando il fisico francese Léon Foucault installò nel Pantheon di Parigi un grande pendolo.

Il pendolo di Foucault era formato da una sfera di ottone di circa 28 kg appesa a un filo lungo 67 metri. Una volta avviato, il pendolo continuava a oscillare avanti e indietro, ma il piano della sua oscillazione sembrava ruotare lentamente rispetto al pavimento. In realtà, era il pavimento a ruotare insieme alla Terra sotto il pendolo (**figura 5**).

La velocità apparente di questa rotazione dipende dalla latitudine: è massima ai poli e diminuisce avvicinandosi all'equatore, dove il fenomeno scompare. A Parigi, per esempio, il piano del pendolo ruota di circa 11° ogni ora.

Il pendolo di Foucault fornì così una dimostrazione visibile della rotazione terrestre: non era necessario osservare direttamente la Terra dallo spazio, bastava guardare come si comportava un pendolo.



▲ **Figura 5**
Il pendolo di Foucault.

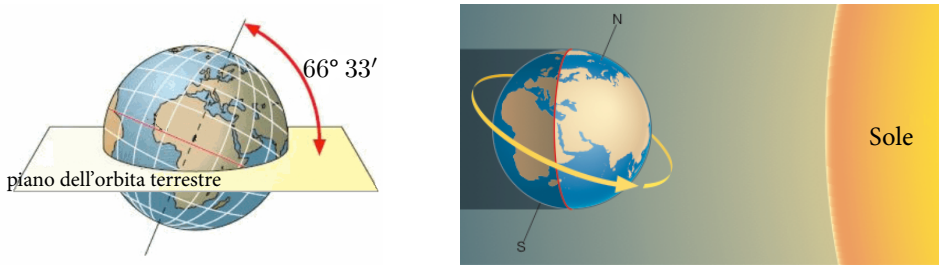
La rotazione terrestre ha molte conseguenze. La più evidente è l'alternarsi del giorno e della notte: mentre una parte della Terra è illuminata dal Sole, l'altra si trova nella sua ombra (**figura 6**). L'atmosfera rende però il passaggio meno brusco, perché la luce del Sole continua a illuminare gli strati dell'atmosfera anche quando il Sole è già sotto l'orizzonte. È il fenomeno del crepuscolo.

La rotazione spiega anche perché il Sole raggiunge il punto più alto del cielo in momenti diversi a seconda della longitudine. La Terra compie una rotazione di 360° in circa 24 ore, cioè di circa 15° ogni ora. In prima approssimazione, quindi, due luoghi separati da 15° di longitudine hanno un'ora di differenza nel tempo solare locale.

Per rendere più semplice la vita quotidiana sono stati introdotti i fusi orari. Il globo è stato diviso idealmente in 24 zone, ciascuna larga circa 15° di longitudine. Il meridiano fondamentale è quello che passa per Greenwich, vicino a Londra. L'Italia appartiene al fuso dell'Europa centrale e, rispetto a Greenwich, ha un'ora in più durante l'ora solare. Nella pratica, però, i confini dei fusi seguono soprattutto i confini politici degli Stati e non esattamente i meridiani.

La Terra ruota da ovest verso est attorno a un asse immaginario che attraversa i due poli. La rotazione non è però priva di effetti anche sulla forma del pianeta. La superficie terrestre all'equatore si muove più velocemente rispetto a quella vicina ai poli e la rotazione produce un effetto centrifugo che tende a far rigonfiare la Terra all'equatore e a schiacciarla leggermente ai poli. Per questo la Terra non è una sfera perfetta.

La rotazione terrestre influenza inoltre il movimento dell'aria e dell'acqua attraverso l'effetto Coriolis. I venti e le correnti oceaniche vengono deviati rispetto alla loro direzione iniziale e questo contribuisce, tra l'altro, alla struttura dei grandi sistemi atmosferici e degli uragani.



(a) Asse terrestre **(b)** Alternanza della notte e del dì

▲ **Figura 6**
Rotazione terrestre

Un fenomeno spesso attribuito all'effetto Coriolis è il verso di rotazione dell'acqua nei lavandini. In realtà, nelle normali condizioni domestiche l'effetto è troppo piccolo per determinare il verso del vortice: contano molto di più la forma del recipiente, il modo in cui è stata versata l'acqua e le correnti già presenti.

La Terra viaggia attorno al Sole

La rotazione non è l'unico movimento della Terra. Mentre gira su sé stessa, il nostro pianeta viaggia anche attorno al Sole.

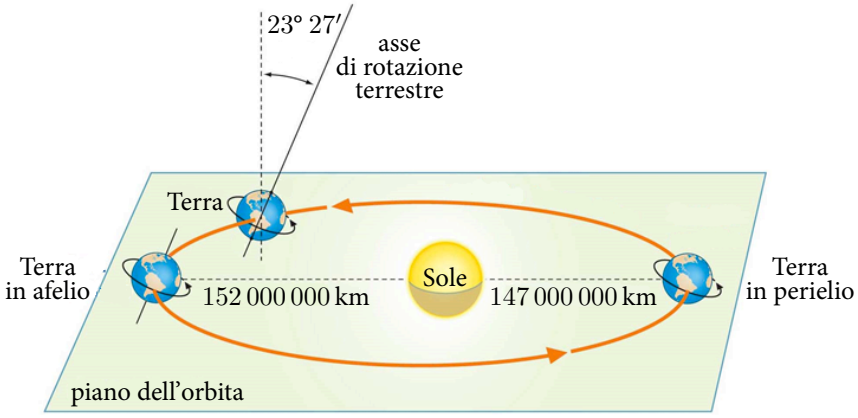
L'idea che fosse la Terra a orbitare attorno al Sole era già stata proposta nell'antichità. Aristarco di Samo, ventitré secoli fa, aveva sostenuto un modello eliocentrico. Aveva inoltre capito, confrontando le dimensioni apparenti della Luna e del Sole e le loro distanze, che il Sole doveva essere molto più grande della Terra.

L'idea eliocentrica non ebbe però fortuna. Il modello geocentrico di Aristotele e, più tardi, di Tolomeo descriveva la Terra immobile al centro dell'universo e riusciva a rappresentare con una certa efficacia i movimenti apparenti dei pianeti. Fu solo molti secoli dopo, con Copernico, Galileo e Keplero, che il modello eliocentrico tornò al centro dell'astronomia.

Una delle prove decisive del movimento della Terra arrivò nel Settecento. Nel 1726 l'astronomo James Bradley scoprì l'aberrazione della luce stellare. Il fenomeno può essere immaginato pensando alla pioggia che cade verticalmente mentre noi viaggiamo in automobile: per noi, la pioggia sembra arrivare obliquamente perché ci stiamo muovendo.

Lo stesso principio vale per la luce delle stelle. Dato che la Terra si muove lungo la propria orbita mentre la luce ci raggiunge, la direzione apparente da cui proviene una stella risulta leggermente spostata rispetto alla sua direzione reale. L'aberrazione della luce costituisce quindi una prova del moto orbitale della Terra.

L'orbita terrestre non è perfettamente circolare, ma è un'ellisse molto poco eccentrica, con il Sole situato in uno dei due fuochi. La distanza media tra la Terra e il Sole è di circa 150 milioni di chilometri. Nel corso dell'anno la distanza varia leggermente: la Terra raggiunge il perielio, il punto più vicino al Sole, all'inizio di gennaio, e l'afelio, il punto più lontano, all'inizio di luglio (figura 7).



▲ **Figura 7**
Rivoluzione terrestre

Vista dal polo nord celeste, la Terra percorre la propria orbita in senso antiorario. Per completare un giro impiega circa 365 giorni, 5 ore, 48 minuti e 46 secondi: è il cosiddetto anno tropico, sul quale si basa il ciclo delle stagioni. Questo numero non corrisponde a un numero intero di giorni. Per mantenere il calendario sincronizzato con le stagioni è quindi necessario introdurre periodicamente un giorno aggiuntivo.

Le stagioni dipendono però soprattutto da un'altra caratteristica della Terra: l'inclinazione del suo asse di rotazione.

L'asse terrestre è inclinato di circa $23,5°$ rispetto alla perpendicolare al piano dell'orbita. Durante il viaggio attorno al Sole, l'asse mantiene pressoché costante il proprio orientamento nello spazio. Di conseguenza, nel corso dell'anno i due emisferi ricevono la luce solare con inclinazioni diverse.

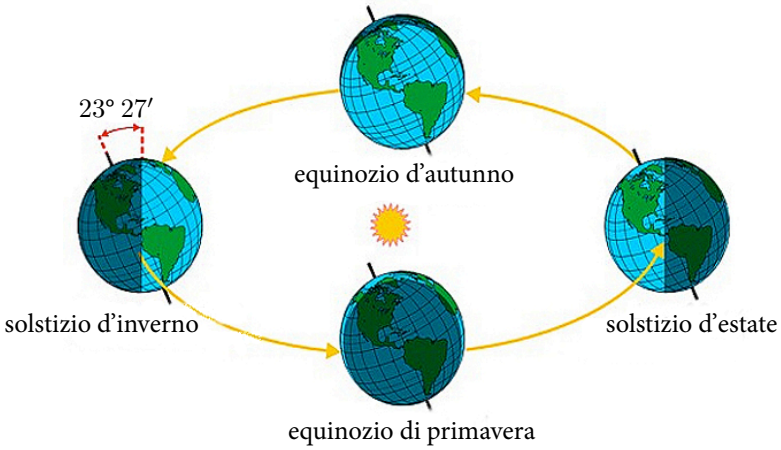
Quando l'emisfero nord è inclinato verso il Sole, i raggi solari lo raggiungono più direttamente e le giornate sono più lunghe: è estate. Sei mesi dopo la situazione si inverte ed è inverno. Nell'emisfero sud accade contemporaneamente il contrario.

Questo spiega anche perché il fatto che la Terra sia leggermente più vicina al Sole in gennaio non rende più caldo l'emisfero nord. Le stagioni dipendono principalmente dall'inclinazione dei raggi solari e dalla durata del giorno, non dalla distanza dal Sole.

All'equatore i raggi solari arrivano mediamente più perpendicolari, mentre verso i poli si distribuiscono su una superficie più ampia e devono attraversare una maggiore quantità di atmosfera. Per questo le regioni equatoriali ricevono, in media, più energia solare rispetto alle regioni polari.

I due equinozi, intorno al 20-21 marzo e al 22-23 settembre, sono i momenti dell'anno in cui il Sole si trova sull'equatore celeste e giorno e notte hanno durata quasi uguale. I solstizi, intorno al 20-21 giugno e al 21-22 dicembre, segnano invece il massimo spostamento apparente del Sole verso nord o verso sud (**figura 8**).

L'inclinazione dell'asse terrestre determina anche l'esistenza dei tropici e dei circoli polari. In questo modo la superficie terrestre può essere suddivisa in cinque grandi fasce astronomiche: due zone polari, due zone temperate e una zona intertropicale.



▲ **Figura 8**
Alternanza delle stagioni (le stagioni sono quelle dell'emisfero nord; quelle dell'emisfero sud sono invertite)

Il movimento della Terra attorno al Sole è inoltre alla base del nostro calendario. Dato che l'anno astronomico non dura un numero intero di giorni, un calendario di 365 giorni accumulerebbe lentamente un errore.

Nel calendario giuliano, introdotto da Giulio Cesare, si stabilì quindi di aggiungere un giorno ogni quattro anni. Ma l'anno giuliano era leggermente troppo lungo e, nel corso dei secoli, le date del calendario si spostarono rispetto alle stagioni.

Nel 1582 papa Gregorio XIII introdusse una riforma che diede origine al calendario gregoriano, oggi utilizzato nella maggior parte del mondo. Un anno è bisestile se è divisibile per 4, tranne gli anni secolari che non sono divisibili per 400. Così il 2000 è stato bisestile, mentre il 1900 non lo è stato. Anche il 2100 non sarà bisestile.

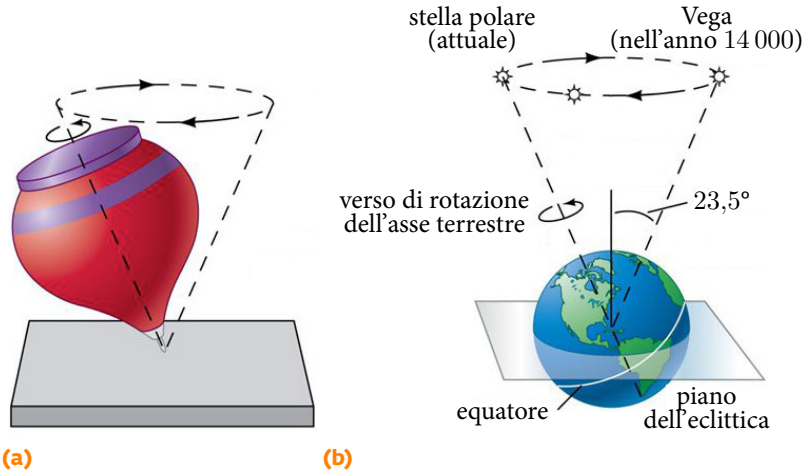
Il calendario gregoriano non riproduce perfettamente il moto della Terra, ma è sufficientemente preciso per le nostre esigenze quotidiane. Dietro una semplice successione di giorni, mesi e anni si nasconde dunque il movimento del nostro pianeta nello spazio.

I moti millenari della Terra

La Terra non mantiene immutabile nel tempo nemmeno l'orientamento del proprio asse. Se osservassimo il nostro pianeta per migliaia di anni, ci accorgeremmo che il suo asse cambia lentamente direzione nello spazio.

Il fenomeno ricorda quello di una trottola: mentre ruota rapidamente attorno al proprio asse, l'asse stesso può compiere lentamente un movimento conico. Nel caso della Terra questo movimento è chiamato **precessione** e si completa in circa 26 000 anni.

Anche l'inclinazione dell'asse terrestre non è perfettamente costante. Varia lentamente, oscillando tra circa $22,1°$ e $24,5°$. Allo stesso tempo cambia anche l'eccentricità dell'orbita: nel corso di migliaia di anni l'orbita terrestre diventa alternativamente un po' più circolare o un po' più ellittica.



▲ **Figura 9**
La precessione dell'asse terrestre modifica lentamente l'orientamento della Terra nello spazio e provoca, nel corso dei millenni, lo sfasamento tra i segni dello Zodiaco e le costellazioni da cui prendono il nome.

Questi tre movimenti (precessione, variazione dell'inclinazione dell'asse e variazione dell'eccentricità orbitale) modificano lentamente il modo in cui la radiazione solare viene distribuita sulla Terra. Su scale di decine di migliaia di anni possono quindi contribuire alle variazioni del clima terrestre.

La precessione ha anche una conseguenza curiosa sul cielo. L'orientamento dell'asse terrestre cambia lentamente e quindi cambia la posizione dei poli celesti rispetto alle stelle. Anche il punto dell'orbita in cui si verificano gli equinozi si sposta nel tempo.

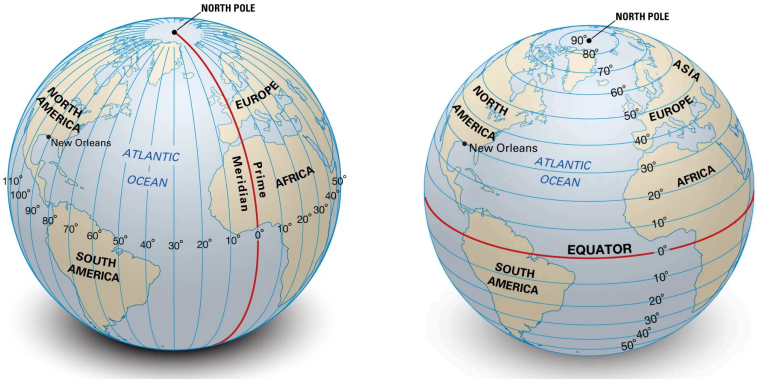
Per questo le costellazioni che vediamo associate ai segni dello zodiaco non corrispondono più esattamente ai segni zodiacali dell'astrologia. Quando, secondo l'astrologia, il Sole si trova per esempio nel segno dei Gemelli, dal punto di vista astronomico si trova in una regione del cielo appartenente alla costellazione del Toro (**figura 9**).

Le costellazioni sono figure apparenti. Le stelle che le compongono possono trovarsi a distanze molto diverse da noi e non essere fisicamente vicine tra loro. La loro disposizione nel cielo è quindi una prospettiva costruita dal nostro punto di vista sulla Terra.

Il cielo che osserviamo non è dunque immobile. La Terra ruota ogni giorno, percorre la propria orbita ogni anno e modifica lentamente il proprio orientamento nel corso di migliaia di anni. Anche le figure che da sempre riconosciamo nel cielo, osservate su tempi abbastanza lunghi, cambiano.

3 Orientarsi sulla Terra

Oggi, per sapere dove siamo, basta spesso guardare lo smartphone: una costellazione di satelliti e un po' di matematica fanno il lavoro al posto nostro. Per gran parte della storia umana, però, orientarsi significava osservare il paesaggio e soprattutto il cielo.



(a) Meridiani. **(b)** Paralleli.

▲ Figura 10
Meridiani e paralleli.

Per costruire un sistema di riferimento valido su tutta la Terra possiamo partire da due punti particolari: i **poli geografici**, dove l'asse di rotazione terrestre incontra la superficie del pianeta. Il polo nord e il polo sud permettono di definire le quattro direzioni fondamentali: **nord**, **sud**, **est** e **ovest**.

Ma per individuare un punto sulla superficie terrestre non basta sapere in quale direzione si trova. Ci servono delle coordinate. Per questo immaginiamo di tracciare sulla Terra una griglia formata da **meridiani** e **paralleli** (figura 10).

I meridiani sono semicirconferenze che uniscono i due poli. Ce ne sono, in teoria, infiniti, ma per misurare le posizioni ne scegliamo uno come riferimento: il meridiano che passa per Greenwich, a Londra. A partire da questo misuriamo la **longitudine**, cioè la distanza angolare di un punto verso est o verso ovest.

I paralleli sono invece circonferenze ottenute immaginando di tagliare la Terra con piani perpendicolari al suo asse di rotazione. Il più importante è l'**equatore**, che divide la Terra in emisfero settentrionale e meridionale. Dall'equatore misuriamo la **latitudine**, cioè la distanza angolare di un punto verso nord o verso sud.



▲ Figura 11
Le coordinate geografiche.

Latitudine e longitudine formano così il **reticolato geografico**: un sistema di coordinate che permette di individuare qualsiasi punto sulla superficie terrestre (figura 11). È lo stesso principio che utilizziamo quando il GPS del nostro smartphone mostra la nostra posizione su una mappa.

Guardare il cielo per trovare la strada

Prima dei satelliti, il riferimento più importante era proprio il cielo. Il Sole permette infatti di riconoscere, almeno approssimativamente, est e ovest: sorge a est e tramonta

a ovest, anche se solo agli equinozi questi punti coincidono esattamente con l'est e l'ovest geografici.

Di notte, nell'emisfero settentrionale, c'è un riferimento ancora più prezioso: la **stella polare**. La sua posizione nel cielo è molto vicina alla direzione del polo nord celeste, perché l'asse di rotazione terrestre punta quasi verso di essa. Mentre la Terra ruota, le altre stelle sembrano descrivere archi attorno a quel punto, mentre la stella polare rimane quasi ferma.

Anche la bussola sfrutta, in modo completamente diverso, il nostro pianeta come riferimento. Il suo ago magnetizzato si orienta secondo il campo magnetico terrestre e indica approssimativamente la direzione del nord.

Oggi possiamo affidarci a una bussola digitale o al GPS. Ma dietro questi strumenti rimane la stessa domanda che ha accompagnato i viaggiatori per millenni: dove mi trovo? E per rispondere, in fondo, dobbiamo ancora guardare alla Terra e al suo rapporto con il cielo.

Domande e risposte

Perché la Terra è sferica?

La gravità attira la materia verso il centro. Un corpo abbastanza grande tende quindi ad assumere una forma quasi sferica.

Perché la Terra ruota?

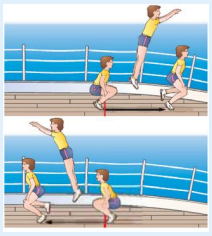
La Terra ha ereditato il proprio movimento di rotazione dal disco di gas e polveri da cui si è formata. Non c'è bisogno di una forza che continui a "spingerla": nello spazio, il moto tende a conservarsi.

Perché non sentiamo la Terra muoversi?

Noi, insieme all'atmosfera e a tutto ciò che ci circonda, ci muoviamo con la Terra. Non percepiamo una velocità costante, ma soprattutto i cambiamenti di velocità.



(a) L'acqua che cade goccia a goccia da un secchio entra nel collo di una bottiglia.



(b) Saltando verso prua o verso poppa con la stessa forza, si raggiunge la stessa distanza.

▲ **Figura 12**
Non possiamo capire con un esperimento se la nave è ferma o si muove a velocità costante.

Perché esistono le stagioni?

L'asse terrestre è inclinato di circa $23,5°$ rispetto alla perpendicolare al piano dell'orbita. Durante il viaggio attorno al Sole, questa inclinazione cambia l'illuminazione dei due emisferi.

Perché d'estate fa più caldo?

D'estate i raggi del Sole arrivano più direttamente e le giornate sono più lunghe. Il suolo riceve così più energia.

Perché esistono il giorno e la notte?

ça Terra ruota su sé stessa: mentre una metà è illuminata dal Sole, l'altra è rivolta verso lo spazio e si trova nell'oscurità.

Perché il cielo è azzurro?

L'atmosfera diffonde la luce solare e diffonde molto più efficacemente le componenti blu rispetto a quelle rosse.

Perché le stelle sembrano muoversi?

È la Terra che ruotare. Durante la notte le stelle ci appaiono quindi attraversare il cielo da est verso ovest.

Perché all'equatore non pesiamo esattamente quanto ai poli?

La rotazione terrestre produce una piccola forza centrifuga, massima all'equatore. Inoltre la Terra è leggermente più "gonfia" all'equatore, quindi lì siamo un po' più lontani dal centro.

La Terra potrebbe smettere di ruotare?

Non spontaneamente. La rotazione sta lentamente rallentando, soprattutto a causa delle maree, ma fermare completamente la Terra richiederebbe un enorme trasferimento di energia.

Perché abbiamo un'atmosfera?

La gravità terrestre è abbastanza forte da trattenere attorno al pianeta uno strato di

gas. L'atmosfera si è formata e modificata nel tempo attraverso processi geologici, vulcanici e biologici.

Come facciamo a sapere che la Terra si muove?

Possiamo osservare direttamente gli effetti dei suoi movimenti: il pendolo di Foucault dimostra la rotazione, mentre l'aberrazione della luce stellare e altri fenomeni rivelano il movimento orbitale.

Perché d'estate fa caldo e d'inverno freddo, se la Terra è più vicina al Sole proprio a gennaio?

Le stagioni non dipendono principalmente dalla distanza dal Sole, ma dall'inclinazione dell'asse terrestre. A gennaio l'emisfero nord è inclinato lontano dal Sole e riceve meno energia.

Perché il Sole non sorge sempre esattamente a est?

Durante l'anno la posizione apparente del Sole rispetto alle stelle cambia. Il Sole sorge esattamente a est soltanto intorno agli equinozi.

Perché le ombre cambiano lunghezza durante la giornata?

Laltezza apparente del Sole nel cielo cambia. Quando il Sole è basso, le ombre sono lunghe. Quando è alto, sono corte.

Perché a mezzogiorno la mia ombra è più corta?

Intorno al mezzogiorno solare, il Sole raggiunge la massima altezza della giornata. I suoi raggi arrivano quindi più dall'alto e producono un'ombra più corta.

Perché in Australia le stagioni sono opposte alle nostre?

L'Australia si trova nell'emisfero sud. Quando l'emisfero nord è inclinato verso il Sole e vive l'estate, quello sud è inclinato nella direzione opposta e vive l'inverno.

Se la Terra gira così velocemente, perché non ce ne accorgiamo?

Perché noi, l'atmosfera e tutto ciò che ci circonda ci muoviamo insieme alla Terra. Non percepiamo una velocità costante, ma soprattutto i cambiamenti di velocità.

Se siamo sulla Terra che gira, perché non veniamo scaraventati via?

La gravità terrestre ci mantiene attaccati al suolo. La rotazione produce una piccola spinta verso l'esterno, ma è molto più debole della gravità.

Che cosa succederebbe se la Terra smettesse improvvisamente di ruotare?

Sarebbe catastrofico. Il terreno si fermerebbe, ma persone, oceani e atmosfera continuerebbero a muoversi per inerzia a grande velocità. Ci sarebbero venti e giganteschi spostamenti degli oceani, con conseguenze devastanti.

Come fa il GPS a sapere dove siamo?

Il GPS riceve segnali da diversi satelliti e, confrontando il tempo impiegato dai segnali per arrivare al dispositivo, calcola la nostra posizione sulla Terra.

Perché le ombre cambiano lunghezza durante il giorno?

Le ombre cambiano lunghezza durante il giorno a causa del movimento apparente del Sole nel cielo, dovuto alla rotazione terrestre. Di mattina e di sera, quando il Sole è basso sull'orizzonte, le ombre sono più lunghe, mentre a mezzogiorno, quando il Sole raggiunge la sua altezza maggiore, diventano più corte.

Casa, dolce casa

Le ombre durante il giorno

Misura in diversi momenti della giornata la lunghezza e la direzione dell'ombra di un bastone. Segna i risultati per confrontarli durante la giornata.

L'ombra cambia perché il Sole sembra spostarsi nel cielo a causa della rotazione della Terra. Quando il Sole è alto, l'ombra è più corta; quando è basso, è più lunga.

Il moto apparente del Sole

Segui la posizione del Sole nel cielo dall'alba al tramonto. Puoi segnare ogni ora la sua posizione rispetto a edifici o alberi.

Il Sole sembra muoversi da est verso ovest perché la Terra ruota su sé stessa da ovest verso est.

La rotazione della Terra

Osserva le stelle in diversi momenti della notte e, se possibile, confronta la loro posizione rispetto a un punto fisso.

Le stelle sembrano muoversi nel cielo perché è la Terra a ruotare continuamente su sé stessa.

Le stagioni

In diversi periodi dell'anno osserva l'altezza del Sole e confronta la durata delle ore di luce. Puoi ripetere le misure nello stesso luogo e alla stessa ora.

I cambiamenti dipendono dall'inclinazione dell'asse terrestre: durante l'orbita della Terra attorno al Sole, cambia l'altezza apparente del Sole e la durata del giorno.

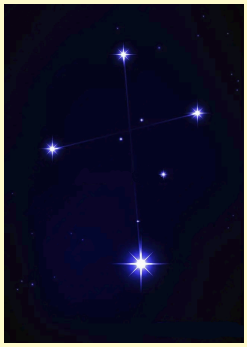
La Luna vista dalla Terra

Osserva la Luna per diverse sere e segna la sua posizione rispetto alle stelle vicine. Noterai che non rimane nello stesso punto del cielo.

La Luna cambia posizione perché orbita attorno alla Terra. Per questo, rispetto alle stelle lontane, ogni sera appare leggermente spostata.

Il cielo da latitudini diverse

Se viaggi verso nord o verso sud, osserva le costellazioni visibili e confrontale con quelle che vedevi prima. Alcune saranno più alte, più basse oppure non saranno più visibili (figura 13).



▲ **Figura 13**
La Croce del Sud è una costellazione visibile nel cielo australe, ma non da quello boreale.

Cambiando latitudine, cambia anche la parte di cielo che possiamo osservare. Per questo, spostandoci verso nord o verso sud, cambiano le costellazioni visibili.

La Stella Polare e la latitudine

Osserva la Stella Polare e misura, anche approssimativamente, la sua altezza sull'orizzonte. Se viaggi verso nord o ver-

so sud, ripeti l'osservazione e confronta i risultati.

L'altezza della Stella Polare sull'orizzonte è circa uguale alla latitudine del luogo. Per questo, osservando il cielo, i navigatori potevano capire a quale latitudine si trovavano.

Il movimento delle stelle

Scegli una stella luminosa e osservane la posizione rispetto a un edificio o a un albero per alcune ore. Puoi ripetere l'osservazione in momenti diversi della notte.

La stella sembra spostarsi nel cielo perché è la Terra a ruotare su sé stessa. Il movimento è apparente: siamo noi a cambiare continuamente orientamento nello spazio.

Il Sole non sorge sempre nello stesso punto

Per alcuni giorni consecutivi osserva il punto dell'orizzonte in cui sorge il Sole, usando come riferimento un edificio, un albero o un altro elemento del paesaggio. Ripeti l'osservazione nello stesso luogo e, se possibile, alla stessa ora.

Il punto in cui il Sole sorge cambia durante l'anno. Agli equinozi sorge circa a est, mentre durante l'anno si sposta progressivamente verso nord o verso sud lungo l'orizzonte.

Esercizi

1 **Vero o falso?**

a. L'asse terrestre passa per i due poli geografici. V F

b. Il moto di rotazione della Terra è responsabile dell'alternarsi delle stagioni. V F

c. Il giorno sidereo è il tempo impiegato dalla Terra per compiere una rotazione completa rispetto alle stelle. V F

d. Se la Terra aumentasse la velocità di rotazione, il giorno diventerebbe più corto. V F

e. La teoria eliocentrica fu elaborata da Tolomeo. V F

[tre affermazioni vere e due false]

2 **Vero o falso?**

a. La velocità orbitale della Terra è maggiore al perielio che all'afelio. V F

b. I fusi orari hanno idealmente un'ampiezza di 15° di longitudine. V F

c. La forza apparente centrifuga dovuta alla rotazione terrestre è massima ai poli. V F

d. Il giorno solare e il giorno sidereo hanno la stessa durata. V F

e. Il pendolo di Foucault fornisce una prova della rotazione terrestre. V F

[tre affermazioni vere e due false]

3 Indica la risposta corretta.

a. L'asse terrestre è:
- A passante per i poli geografici
- B perpendicolare all'equatore ma non passante per i poli
- C inclinato rispetto ai poli
- D esterno alla Terra

b. Il giorno sidereo è:
- A il tempo della rivoluzione terrestre
- B il tempo impiegato dalla Terra per una rotazione rispetto alle stelle
- C il tempo impiegato dalla Terra per orbitare attorno al Sole
- D il tempo tra due successivi solstizi

c. Il moto di rotazione terrestre provoca:
- A l'alternarsi delle stagioni
- B la variazione della distanza Terra-Sole
- C l'alternarsi del dì e della notte
- D l'alternarsi degli anni

d. Le stelle sembrano muoversi da est verso ovest perché:
- A la Terra ruota da ovest verso est
- B la Terra ruota da est verso ovest
- C la Terra compie il moto di rivoluzione
- D il Sole trascina le stelle nel suo moto

e. Se la Terra aumentasse la velocità di rotazione avremmo:
- A stagioni più fredde
- B anni più lunghi
- C notti più lunghe
- D giorni più corti

f. Se la Terra aumentasse la velocità di rivoluzione, a parità di orbita, avremmo:
- A anni più corti
- B giorni siderei più lunghi
- C mesi più lunghi
- D notti più lunghe

g. La forza apparente centrifuga dovuta alla rotazione terrestre è massima:
- A ai poli
- B all'equatore
- C all'afelio
- D al centro della Terra

[tre risposte A, due B, una C e una D]

4 Indica la risposta corretta.

a. La variabilità della velocità di rivoluzione della Terra è legata:

- A alla durata dell'anno solare
- B alla durata del giorno sidereo
- C alla durata del giorno solare
- D all'inclinazione dell'asse terrestre

b. La costanza del giorno sidereo indica che:

- A la Terra mantiene costante la distanza dal Sole
- B la Terra ruota attorno al proprio asse con velocità angolare pressoché costante
- C la Terra si muove alla stessa velocità lungo l'orbita
- D il giorno solare ha sempre la stessa durata

c. Gli epicicli furono utilizzati per descrivere il moto dei pianeti soprattutto nel modello di:

- A Tolomeo
- B Tycho Brahe
- C Keplero
- D Newton

d. La forza gravitazionale tra due corpi:

- A aumenta all'aumentare della distanza
- B diminuisce all'aumentare della distanza
- C non dipende dalla distanza
- D diminuisce all'aumentare delle masse

e. La differenza tra giorno solare e giorno sidereo è dovuta principalmente:

- A all'inclinazione dell'asse terrestre
- B al moto di rivoluzione della Terra
- C al moto della Luna
- D all'uso di orologi diversi

f. Spostandosi di 45° verso est, l'ora locale aumenta di circa:

- A un'ora
- B due ore
- C tre ore
- D sei ore

g. La velocità lineare dovuta alla rotazione terrestre è maggiore:

- A ai poli
- B ai tropici
- C all'equatore
- D uguale in ogni località

[tre risposte A, due B e due C]

5 Indica la risposta corretta.

a. Il piano di oscillazione del pendolo di Foucault sembra ruotare perché:

- A la Terra ruota sotto il piano di oscillazione
- B il Sole ruota attorno alla Terra
- C la Luna modifica il piano del pendolo
- D il pendolo segue il moto del Sole

b. Se la velocità di rivoluzione della Terra fosse costante, il giorno solare medio sarebbe:

- A variabile per effetto della velocità orbitale
- B costante, trascurando gli altri effetti
- C uguale al giorno sidereo
- D più lungo solo all'afelio

c. Se aumentasse la velocità di rivoluzione della Terra, il giorno solare diventerebbe:

- A più lungo
- B invariato
- C più corto
- D uguale al giorno sidereo

d. Se la Terra non avesse il moto di rivoluzione attorno al Sole, il giorno solare sarebbe:

- A uguale al giorno sidereo
- B più corto del giorno sidereo
- C più lungo del giorno sidereo
- D variabile durante l'anno

e. Il giorno solare apparente è variabile soprattutto perché:

A la Terra cambia la propria velocità di rotazione ogni giorno

B la velocità orbitale della Terra varia durante l'anno

C il Sole cambia massa durante l'anno

D la Luna modifica la velocità del Sole

f. La migliore evidenza della quasi costanza della rotazione terrestre è:

A la durata dell'anno solare

B la durata del giorno solare apparente

C la durata del giorno sidereo

D l'inclinazione dell'asse terrestre

g. Nell'emisfero nord, le ore di luce aumentano:

A dal solstizio d'estate al solstizio d'inverno

B dall'equinozio d'autunno al solstizio d'inverno

C dal solstizio d'inverno al solstizio d'estate

D solo durante il mese di giugno

[tre risposte A, due B, una C e una D]

6 Indica la risposta corretta.

a. Per guadagnare sei ore di differenza di tempo occorre spostarsi di:

A 45° verso est

B 90° verso est

C 90° verso ovest

D 180° verso est

b. Spostandosi di 45° verso est, l'orologio va regolato:

A aumentando l'orario di tre ore

B diminuendo l'orario di tre ore

C aumentando l'orario di sei ore

D lasciando invariato l'orario

c. I fusi orari hanno idealmente un'ampiezza di:

A 10°

B 15°

C 20°

D 24°

d. L'eclittica è:

A l'asse di rotazione terrestre

B il piano dell'orbita terrestre attorno al Sole

C il piano dell'equatore terrestre

D una linea che congiunge i poli

e. Se la Terra non compisse il moto di rivoluzione attorno al Sole:

A non si succederebbero le stagioni dovute alla rivoluzione

B avremmo stagioni più lunghe

C il giorno solare diventerebbe necessariamente variabile

D il giorno sidereo scomparirebbe

f. A Milano, il giorno più lungo dell'anno si verifica intorno al:

A 21 giugno

B 23 agosto

C 22 dicembre

D 13 dicembre

g. Il giorno è un intervallo di tempo legato principalmente:

A al moto di rivoluzione terrestre

B al moto di rotazione terrestre

C al moto di rivoluzione lunare

D al moto di rotazione lunare

[tre risposte A, tre B e una C]

7 Indica la risposta corretta.

a. Il 21 giugno, nel nostro emisfero, il Sole raggiunge:

A la massima declinazione meridionale

B la massima declinazione settentrionale

C l'equatore celeste

D il polo nord celeste

b. La velocità della Terra lungo la sua orbita è:

A costante

B maggiore all'afelio

C maggiore al perielio

D nulla agli equinozi

c. All'equinozio di primavera, al polo nord il Sole:
- A raggiunge un'altezza di 90°
- B sorge e rimane sull'orizzonte
- C tramonta definitivamente
- D raggiunge la massima altezza dell'anno

d. A Roma, il 21 marzo, a mezzogiorno, il Sole raggiunge un'altezza di circa:
- A 20°
- B 45°
- C 60°
- D 90°

e. Lo spostamento di 30° verso est comporta una differenza di tempo di:
- A un'ora
- B due ore
- C tre ore
- D quattro ore

f. L'asse terrestre è inclinato di circa 23° 27′ rispetto:
- A al piano dell'eclittica
- B alla perpendicolare al piano dell'eclittica
- C all'equatore terrestre
- D al meridiano di Greenwich

g. Durante il solstizio d'inverno nell'emisfero nord, i raggi solari sono perpendicolari:
- A all'equatore
- B al Tropico del Cancro
- C al Tropico del Capricorno
- D al Circolo Polare Artico

[tre risposte A, due B e due C]

8 Indica la risposta corretta.

a. La minima altezza del Sole a mezzogiorno a Milano si registra:
- A al solstizio d'estate
- B all'equinozio di primavera
- C all'equinozio d'autunno
- D al solstizio d'inverno

b. All'equinozio di primavera i raggi del Sole sono perpendicolari:
- A al Tropico del Cancro
- B all'equatore
- C al Tropico del Capricorno
- D al Circolo Polare Artico

c. La durata dell'anno solare è circa:
- A 365,2422 giorni
- B 365,4524 giorni
- C 365,6250 giorni
- D 366,2422 giorni

d. Il 22 dicembre il Sole è perpendicolare:
- A all'equatore
- B al polo sud
- C al Tropico del Capricorno
- D al Tropico del Cancro

e. In una località a 30° di latitudine nord, il Sole può trovarsi allo zenit:
- A due volte all'anno
- B una volta all'anno
- C una volta al giorno
- D mai

f. Nell'emisfero nord, l'aumento delle ore di buio inizia:
- A dal solstizio d'estate
- B dall'equinozio d'autunno
- C dal solstizio d'inverno
- D dall'equinozio di primavera

g. Tra un solstizio e il solstizio successivo trascorrono circa:
- A 90 giorni
- B 120 giorni
- C 180 giorni
- D 270 giorni

[tre risposte A, due B e due C]

9 Indica la risposta corretta.

a. Il moto di rotazione della Terra avviene intorno a un asse:
- A che passa per il centro della Terra
- B tangente alla superficie terrestre
- C esterno alla Terra
- D diretto verso il Sole

b. Se l'asse terrestre fosse perpendicolare al piano dell'eclittica:

A non avremmo l'alternarsi delle stagioni dovuto all'inclinazione dell'asse

B avremmo solo due stagioni

C i giorni durerebbero sempre dodici ore ovunque

D avremmo soltanto ore di luce

c. Il primo anno bisestile successivo al 2016 è stato:

A 2018

B 2019

C 2020

D 2021

d. A Roma, la notte più lunga dell'anno si verifica intorno al:

A 21 giugno

B 21 dicembre

C 31 dicembre

D 13 dicembre

e. Se l'asse terrestre fosse inclinato di 60° rispetto al piano dell'eclittica, i Tropici si troverebbero:

A a 23° 27′ dall'equatore

B a 30° dall'equatore

C a 60° dall'equatore

D a 70° dall'equatore

f. Il Sole raggiunge la massima altezza al polo nord:

A all'equinozio di primavera

B all'equinozio d'autunno

C al solstizio d'estate

D al solstizio d'inverno

g. La prova sperimentale della rotazione terrestre fornita da Foucault nel 851 utilizzava:

A un'eclissi solare

B un pendolo

C un satellite artificiale

D un'eclissi lunare

[tre risposte A, tre B e una C]

10 Indica la risposta corretta.

a. L'inclinazione dell'asse terrestre è una delle cause principali:

A dell'alternarsi delle stagioni

B dell'alternarsi del dì e della notte

C della successione dei giorni della settimana

D delle fasi lunari

b. Il valore massimo della latitudine è:

A 0°

B 90°

C 180°

D 360°

c. I raggi del Sole sono perpendicolari alla latitudine di 23° 27′ N intorno al:

A 21 marzo

B 21 giugno

C 23 settembre

D 22 dicembre

d. Il 22 settembre, a Torino, l'altezza del Sole a mezzogiorno è circa:

A 5°

B 15°

C 25°

D 45°

e. Quale completamento è errato? I raggi del Sole formano un angolo di 90° con l'asse terrestre:

A al solstizio d'inverno

B all'equinozio di primavera

C il 21 marzo

D il 23 settembre

f. La forza gravitazionale esercitata dal Sole sulla Terra è:

A maggiore al perielio

B minore al perielio

C costante lungo l'orbita

D nulla all'afelio

g. Spostandosi di 90° verso ovest, la differenza di tempo locale è di:

A tre ore avanti

B sei ore indietro

C sei ore avanti

D nove ore indietro

[tre risposte A, due B e due C]

11 Indica la risposta corretta.

a. Durante il solstizio d'inverno i raggi del Sole arrivano perpendicolari:

- A all'equatore
- B al Tropico del Capricorno
- C al Tropico del Cancro
- D al Circolo Polare Artico

b. Il Circolo Polare Artico è completamente in ombra durante:

- A l'equinozio di primavera
- B il solstizio d'inverno
- C il solstizio d'estate
- D l'equinozio d'autunno

c. I Tropici sono paralleli lungo i quali i raggi solari a mezzogiorno:

- A cadono sempre perpendicolari
- B non cadono mai perpendicolari
- C possono cadere perpendicolari ai solstizi
- D cadono perpendicolari agli equinozi

d. Il 22 settembre la località in cui il Sole può trovarsi allo zenit è:

- A l'equatore
- B il polo nord
- C il polo sud
- D il Tropico del Cancro

e. Quale completamento è errato? Le stagioni dipendono:

- A dalla variazione della distanza Terra-Sole
- B dall'inclinazione dell'asse terrestre
- C dall'orientamento dell'asse durante la rivoluzione
- D dalla variazione dell'inclinazione dei raggi solari

f. L'orbita terrestre è un'ellisse e il Sole si trova:

- A nel centro dell'ellisse
- B in uno dei due fuochi
- C sul bordo dell'ellisse
- D in uno dei vertici dell'ellisse

g. L'asse terrestre:

- A passa per i paralleli
- B è situato a nord dell'equatore
- C congiunge i due poli geografici
- D passa soltanto per il centro della Terra

[tre risposte A, due B e due C]

12 Indica la risposta corretta.

a. Per completare il moto di rivoluzione, la Terra compie circa:

- A 365 rotazioni
- B alcune decine di rotazioni
- C alcune migliaia di rotazioni
- D milioni di rotazioni

b. Qual è la migliore descrizione della forma della Terra?

- A leggermente appiattita ai poli e rigonfia all'equatore
- B leggermente appiattita all'equatore e ai poli
- C perfettamente sferica
- D rigonfia ai poli e all'equatore

c. La teoria eliocentrica fu elaborata da:

- A Newton nel Seicento
- B Galileo nel Cinquecento
- C Copernico nel Cinquecento
- D Keplero nel Settecento

d. La Terra è rigonfia all'equatore soprattutto perché:

- A la crosta è più pesante
- B la forza gravitazionale è maggiore
- C la velocità di rivoluzione è maggiore
- D la rotazione terrestre produce un effetto centrifugo

e. La velocità lineare di rotazione terrestre è maggiore all'equatore perché:

- A la distanza dall'asse di rotazione è maggiore
- B la gravità è maggiore
- C la Terra ruota più velocemente all'equatore
- D l'equatore è più vicino al Sole

f. La località che il 22 settembre ha il Sole perpendicolare si trova:

A all'equatore
B al polo nord
C al Tropico del Cancro
D al Tropico del Capricorno

g. Il valore della latitudine di Torino è circa:

A 40° N
B 45° N
C 40° E
D 45° E

[tre risposte A, due B, una C e una D]

13 Indica la risposta corretta.

a. La longitudine di Milano è circa:

A 19° N
B 9° E
C 19° E
D 9° N

b. La latitudine è misurata rispetto:

A al meridiano di Greenwich
B all'equatore
C all'eclittica
D al Tropico del Cancro

c. La longitudine è misurata rispetto:

A all'equatore
B al polo nord
C al meridiano fondamentale di Greenwich
D all'eclittica

d. Le coordinate 44° 8′ N e 12° 14′ E indicano:

A latitudine nord e longitudine est
B latitudine est e longitudine nord
C latitudine sud e longitudine est
D latitudine nord e longitudine ovest

e. Un punto situato a 45° N si trova:

A nell'emisfero sud
B nell'emisfero nord
C sul meridiano di Greenwich
D sull'equatore

f. Un punto situato a 30° E si trova:

A a 30° di latitudine nord
B a 30° di latitudine sud
C a 30° di longitudine est
D sull'equatore

g. Quale coppia identifica correttamente i punti di riferimento delle coordinate geografiche?

A equatore e meridiano di Greenwich
B Tropico del Cancro e Tropico del Capricorno
C poli e circoli polari
D eclittica e equatore celeste

[tre risposte A, tre B e una C]

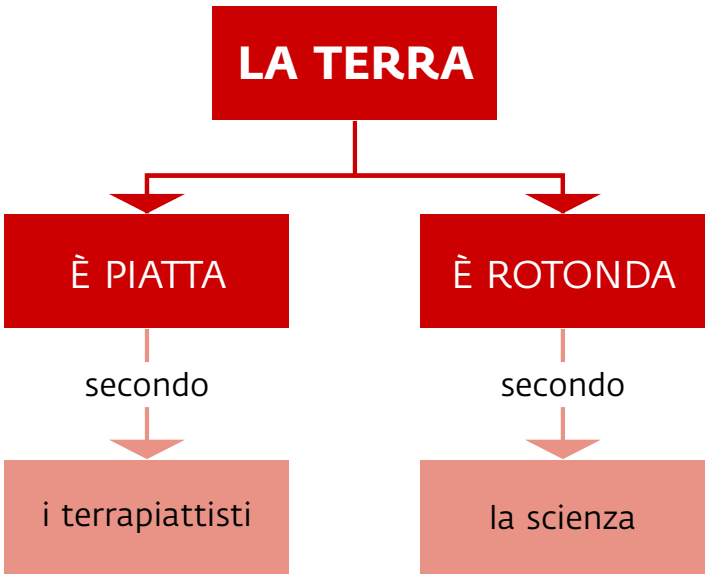
IN SINTESI

LA TERRA



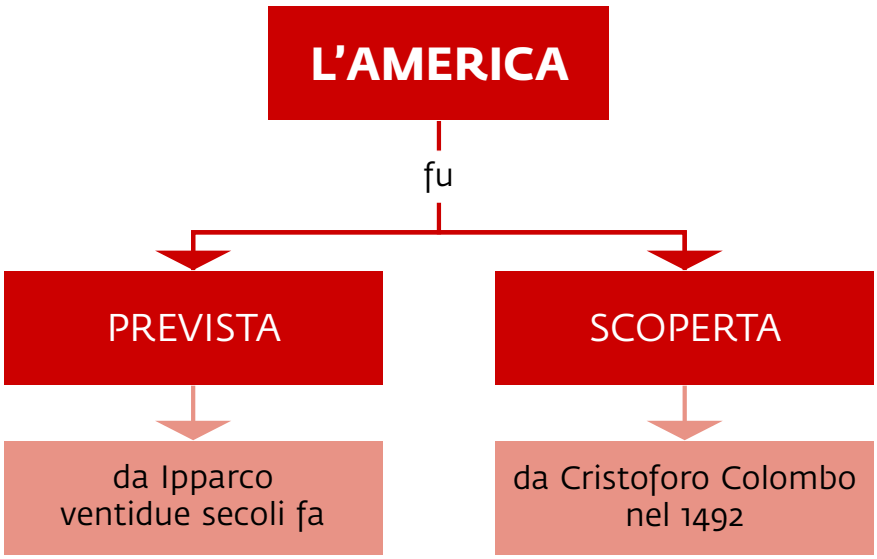
IN SINTESI

LA TERRA



IN SINTESI

LA TERRA



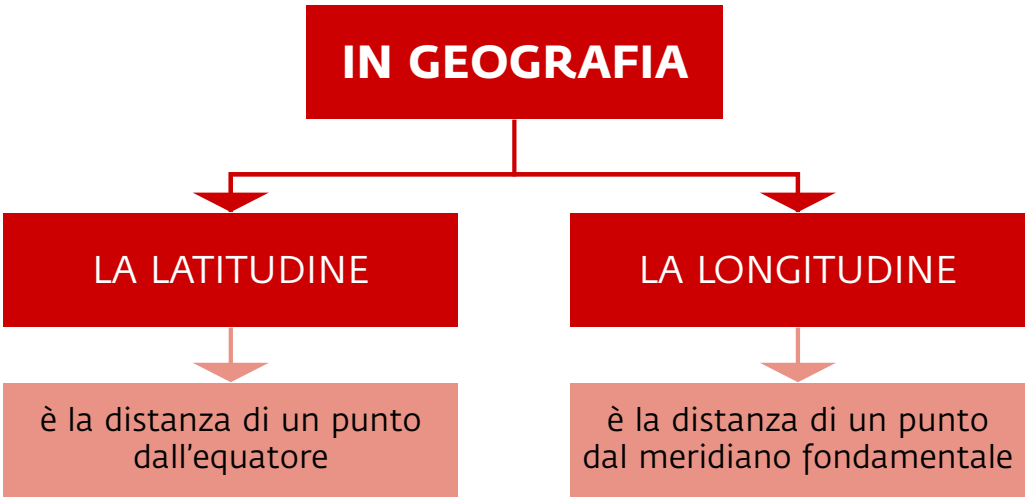
IN SINTESI

LA TERRA



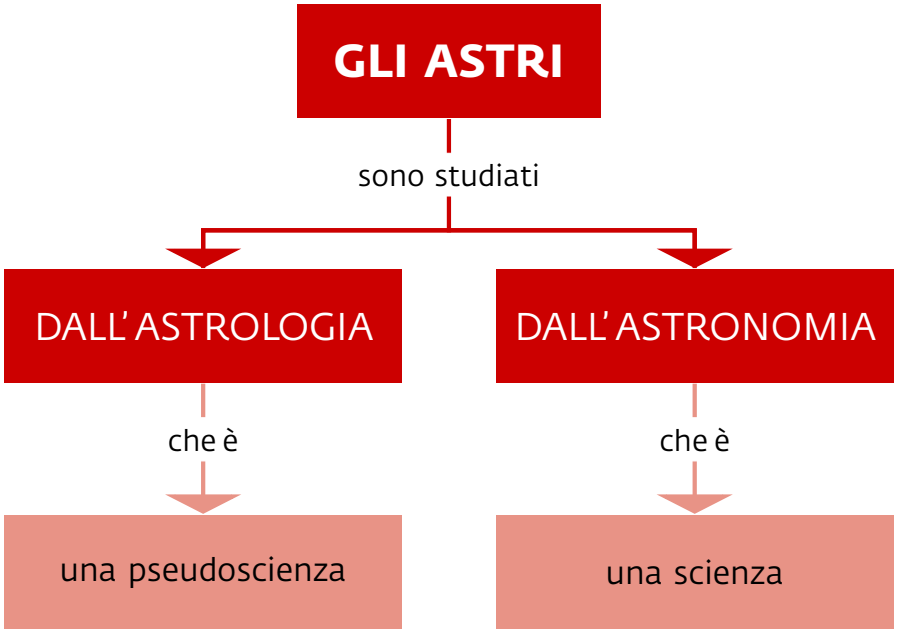
IN SINTESI

LA TERRA



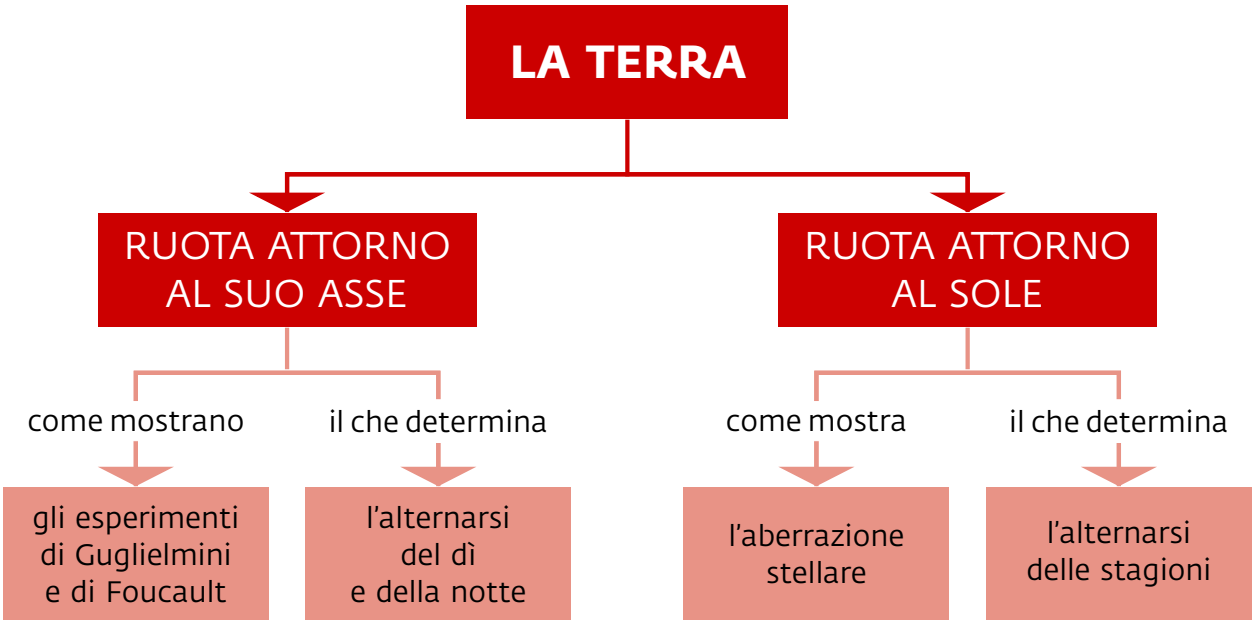
IN SINTESI

LA TERRA



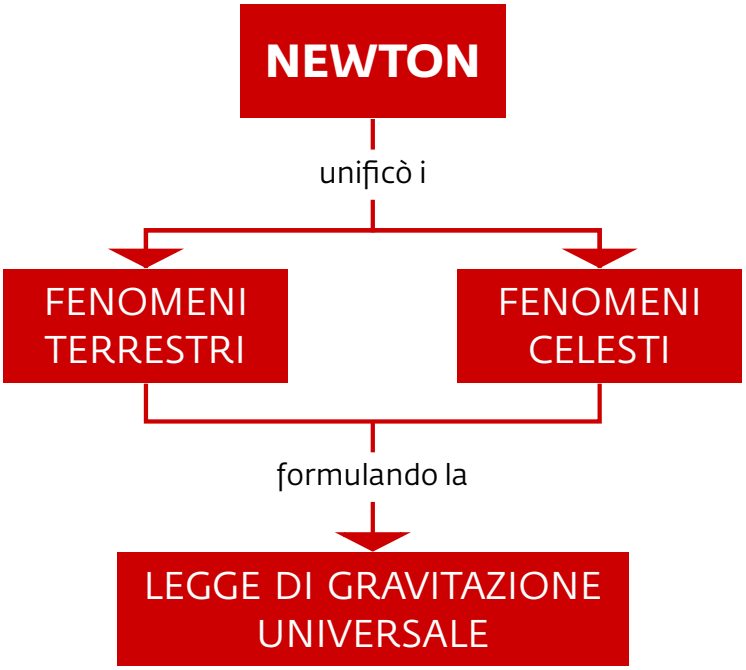
IN SINTESI

LA TERRA



IN SINTESI

LA TERRA



2 Il Sole e la Luna

Che cosa sappiamo davvero del Sole, la stella che illumina e riscalda il nostro pianeta? Come abbiamo fatto a misurare la distanza della Luna e del Sole? E perché la Luna ci mostra sempre la stessa faccia?

In questo capitolo scopriremo come gli antichi astronomi, a partire da Aristarco, riuscirono a misurare le distanze fra la Terra, la Luna e il Sole. Esploreremo poi il Sole, la sua energia e la sua attività, per tornare infine sulla Luna e comprenderne le fasi, le eclissi e le maree.

1 Misurare il cielo

Quanto è lontano il Sole? E quanto è lontana la Luna? Oggi possiamo rispondere con grande precisione, ma per secoli queste domande hanno rappresentato una delle sfide più difficili dell'astronomia. La cosa sorprendente è che qualcuno provò ad affrontarle più di duemila anni fa, senza telescopi, senza calcolatrici e senza poter andare da nessuna parte: gli bastarono la geometria, l'osservazione del cielo e un'idea geniale.

Fu **Aristarco di Samo**, ventitré secoli fa, a tentare per primo una misura sistematica delle distanze tra Terra, Luna e Sole. I suoi numeri erano tutt'altro che precisi, ma il suo metodo era rivoluzionario. Aristarco aveva capito che il cielo poteva diventare un gigantesco problema di geometria e che, osservando con attenzione la posizione della Luna e del Sole, era possibile trasformare distanze apparentemente irraggiungibili in numeri.

La distanza che misura l'universo

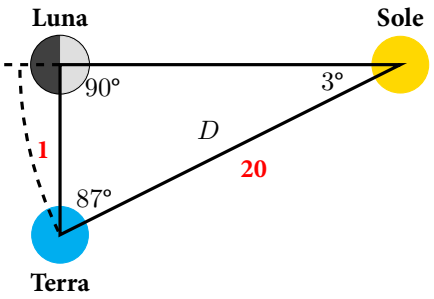
La distanza media fra la Terra e il Sole è oggi definita come **unità astronomica**. È una delle unità fondamentali dell'astronomia perché permette di dare una scala alle distanze del Sistema solare e, indirettamente, di misurare anche quelle delle stelle.

Le stelle più vicine, infatti, sembrano cambiare leggermente posizione nel corso dell'anno. Non stanno facendo avanti e indietro nello spazio: a cambiare è il nostro punto di vista, perché la Terra si sposta lungo la sua orbita attorno al Sole. Osservando la stessa stella a sei mesi di distanza, la vediamo quindi da due punti opposti dell'orbita terrestre. La piccola variazione della sua posizione apparente, chiamata **parallasse**, permette di ricavarne la distanza.

Per fare questa misura serve però conoscere la scala dell'orbita terrestre. Il lato del triangolo che usiamo come riferimento è proprio la distanza media tra Terra e Sole, cioè l'unità astronomica. Prima di poter misurare le stelle, quindi, era necessario risolvere un problema apparentemente ancora più difficile: misurare la distanza che ci separa dal Sole.

Aristarco trovò un modo ingegnoso per farlo sfruttando la Luna. Quando la Luna appare esattamente a metà, durante il primo o l'ultimo quarto, Sole, Terra e Luna formano un triangolo rettangolo. La Luna è illuminata dal Sole e, nel momento in cui vediamo metà del suo disco illuminato, la direzione Terra–Luna è perpendicolare alla direzione Luna–Sole (figura 1). Se riusciamo a misurare l'angolo tra la Luna e il Sole visto dalla Terra, possiamo quindi ricavare il rapporto fra la distanza Terra–Sole e la distanza Terra–Luna.

Aristarco stimò che l'angolo con vertice nella Terra fosse di circa 87° e che quello con vertice nel Sole fosse quindi di circa 3°. Era una misura difficilissima: un errore di pochi decimi di grado avrebbe prodotto una differenza enorme nella distanza calcolata. Aristarco, però, non si lasciò scoraggiare dalla difficoltà.



▲ **Figura 1**
Secondo Aristarco, la distanza D fra la Terra e il Sole è venti volte la distanza fra la Terra e la Luna.

Immaginiamo per semplicità di porre la distanza Terra–Luna uguale a 1. Dato che l'angolo nel Sole è molto piccolo, possiamo approssimare il triangolo con un arco di circonferenza centrato nel Sole e di raggio pari alla distanza D tra Sole e Terra. La distanza Terra–Luna corrisponde allora approssimativamente a un piccolo tratto di questa circonferenza. Possiamo quindi scrivere

$$3° : 360° = 1 : 2\pi D$$

da cui si ottiene

$$D \simeq 20.$$

Aristarco concluse quindi che il Sole doveva trovarsi a circa venti volte la distanza della Luna. Il numero era sbagliato, ma l'idea era straordinariamente buona.

Aristarco aveva infatti sottovalutato quanto fosse piccolo l'angolo che stava cercando di misurare. Il valore reale è circa $0{,}15°$, non 3°. Una differenza apparentemente minuscola che, in un triangolo enorme, cambia completamente il risultato. Se sostituiamo il valore corretto nei suoi calcoli, otteniamo una distanza di circa 150 milioni di chilometri: praticamente il valore dell'unità astronomica che usiamo oggi.

Il metodo di Aristarco, quindi, funzionava. A tradirlo erano soprattutto le difficoltà delle misure effettuate a occhio nudo. È una distinzione importante: nella scienza un risultato numerico può essere sbagliato senza che sia sbagliato il ragionamento che lo ha prodotto.

Restava però un problema: bisognava conoscere anche la distanza Terra–Luna. Aristarco affrontò anche questa seconda domanda utilizzando ancora una volta la geometria e, soprattutto, le eclissi lunari.

Durante un'eclissi di Luna la Terra si trova tra il Sole e la Luna e proietta nello spazio un'enorme ombra. Osservando quanto è grande l'ombra rispetto al disco lunare,

Aristarco cercò di ricavare le dimensioni relative della Luna e della Terra. Stimò che il diametro della Luna fosse circa il 35% di quello terrestre e, osservando che il diametro apparente della Luna è di circa 2° secondo la sua stima, arrivò a una distanza di circa dieci diametri terrestri.

Anche questa volta il numero era sbagliato. La Luna dista in media dalla Terra circa trenta diametri terrestri, cioè circa 384 000 km. Aristarco aveva sovrastimato sia il diametro apparente della Luna sia il rapporto tra il diametro lunare e quello terrestre. Correggendo le misure, però, il suo stesso metodo porta molto vicino al valore reale.

Un secolo più tardi, Ipparco di Nicea riprese l'idea di Aristarco e, migliorando le misure di partenza, riuscì a ottenere una distanza Terra–Luna corretta al circa 98%. Per il Sole la faccenda fu molto più difficile: una misura davvero soddisfacente della distanza Terra–Sole arrivò solo nel Seicento secolo, quando Christiaan Huygens ottenne nel 1659 un valore corretto al circa 90%.

Il copernicanesimo prima di Copernico

Aristarco non si limitò a misurare le distanze. Le sue misure lo portarono verso una conclusione ancora più sorprendente. Se il Sole era molto più lontano della Luna, allora doveva essere anche enormemente più grande. Dato che Sole e Luna hanno dimensioni apparenti quasi identiche nel cielo, un oggetto molto più lontano doveva necessariamente essere anche molto più grande.

Con le sue stime, Aristarco concluse che il diametro del Sole fosse circa venti volte quello della Luna e circa sette volte quello della Terra. Oggi sappiamo che il Sole misura circa 109 diametri terrestri, ma anche la stima di Aristarco era sufficiente per mettere in crisi l'idea tradizionale di un piccolo Sole che ruotasse attorno a una Terra centrale.

Se la Terra era molto più piccola del Sole, perché avrebbe dovuto essere proprio la Terra il centro dell'universo? Aristarco fece il passo successivo e propose che fosse la Terra a muoversi attorno al Sole. Era un'idea che anticipava di quasi diciotto secoli il modello eliocentrico di Copernico.

Aristarco aveva immaginato un universo in cui la Terra non occupava più il centro della scena. Era una rivoluzione concettuale enorme, costruita partendo da qualcosa di apparentemente molto semplice: misurare quanto sono lontani il Sole e la Luna.

Archimede raccontò con ammirazione l'impresa di Aristarco e sottolineò quanto le sue idee avessero ampliato le dimensioni immaginate dell'universo. Il gesto più importante di Aristarco, però, non fu solo aver ottenuto numeri più o meno corretti. Fu aver mostrato che il cosmo poteva essere misurato e che, quando le misure entrano in conflitto con le nostre intuizioni, può essere l'intuizione a dover cambiare.

2 Il Sole

Il Sole ci sembra quasi una presenza scontata: sorge ogni mattina, illumina il cielo, scalda la Terra e tramonta ogni sera. Eppure, dietro quella sfera apparentemente tran-

quilla si nasconde una delle macchine più straordinarie dell'universo. Il Sole è una stella, una delle centinaia di miliardi che popolano la Via Lattea, ma è l'unica abbastanza vicina da permetterci di studiarne la superficie in dettaglio. Tutto quello che rende possibile la vita sulla Terra, in ultima analisi, dipende dalla sua energia.

Una stella molto speciale

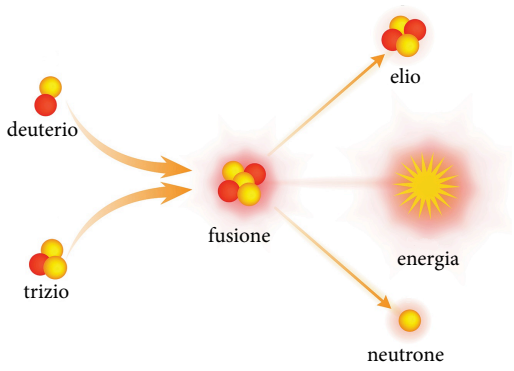
Il Sole è enorme rispetto alla Terra. Il suo diametro è circa 109 volte quello terrestre e al suo interno potrebbero stare più di un milione di pianeti come il nostro. La sua massa è circa 330 000 volte quella della Terra e rappresenta quasi il 99,9% della massa complessiva del Sistema solare. È il Sole, quindi, a dominare gravitazionalmente il nostro piccolo angolo di universo: pianeti, asteroidi e comete gli girano intorno perché la sua enorme massa curva le loro traiettorie e li mantiene legati al Sistema solare.

Eppure il Sole non è una stella particolarmente eccezionale. Rispetto a molte altre stelle è di dimensioni e luminosità abbastanza ordinarie. La sua importanza per noi dipende soprattutto dalla distanza: si trova a circa 150 milioni di chilometri dalla Terra, abbastanza vicino da riscaldarci e illuminare il nostro pianeta, ma abbastanza lontano da permettere alla vita di esistere.

Il Sole ha circa 4,6 miliardi di anni, più o meno la stessa età della Terra. Quando si è formato, circa 4,6 miliardi di anni fa, attorno a lui è rimasto un disco di gas e polveri dal quale sarebbero nati i pianeti. In altre parole, la Terra e il Sole non sono due oggetti indipendenti che per caso si sono trovati insieme: sono nati dalla stessa nube di materia e fanno parte della stessa storia.

Una fornace nucleare

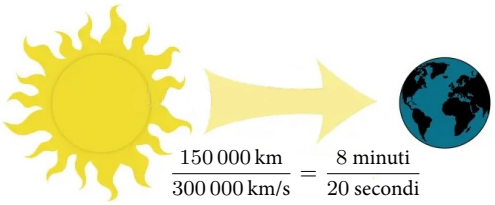
Per migliaia di anni gli esseri umani hanno potuto solo chiedersi da dove venisse la luce del Sole. Sembrava una gigantesca palla di fuoco sospesa nel cielo, ma nessun normale fuoco avrebbe potuto bruciare abbastanza a lungo da spiegare la sua esistenza. Oggi sappiamo che il Sole non è alimentato da una combustione chimica. La sua energia nasce da un processo molto più potente: la **fusione nucleare** (figura 2).



▲ **Figura 2**
La fusione nucleare.

Nel cuore del Sole la temperatura raggiunge circa 15 milioni di gradi e la pressione è enorme. In queste condizioni i nuclei di idrogeno possono fondersi tra loro e formare nuclei di elio. Nel processo una piccolissima parte della massa iniziale viene trasformata in energia, secondo la famosa relazione di Einstein, $E = mc^2$. È una differenza minuscola in termini di massa, ma moltiplicata per il quadrato della velocità della luce produce una quantità enorme di energia.

Il Sole trasforma in questo modo ogni secondo circa 600 milioni di tonnellate di idrogeno in elio. Una quantità enorme, ma quasi insignificante rispetto alla massa complessiva della stella. È proprio questa straordinaria riserva di combustibile che permette al Sole di brillare da miliardi di anni e di continuare a farlo ancora per miliardi di anni.



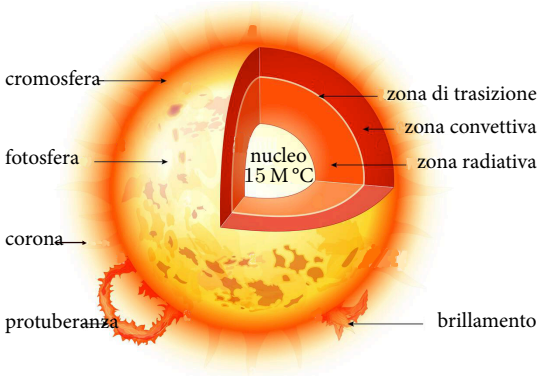
▲ **Figura 3**
La luce del Sole impiega circa otto minuti per raggiungere la Terra.

L'energia prodotta nel nucleo non arriva immediatamente sulla superficie. All'interno del Sole la radiazione viene continuamente assorbita, riemessa e deviata dalla materia. Il viaggio verso l'esterno è quindi estremamente lento e complesso. Una volta raggiunta la superficie, però, l'energia viene finalmente irradiata nello spazio sotto forma di luce e di altre radiazioni.

La luce che riceviamo dal Sole percorre poi lo spazio a circa 300 000 km/s e impiega poco più di otto minuti per raggiungere la Terra. Questo significa che il Sole che vediamo nel cielo è sempre il Sole di circa otto minuti fa. Non possiamo osservare istantaneamente quello che accade sulla sua superficie: ogni volta che guardiamo il Sole, stiamo guardando il suo passato, anche se solo di pochi minuti (**figura ??**).

Un Sole tutt'altro che tranquillo

A prima vista il Sole sembra una sfera liscia e immutabile. In realtà la sua superficie è un luogo estremamente turbolento. La parte che vediamo direttamente è chiamata **fotosfera** e ha una temperatura di circa 5500 °C. Se potessimo avvicinarci abbastanza, non vedremmo una superficie solida, ma un enorme oceano di gas incandescente in continuo movimento.



▲ **Figura 4**
La struttura del Sole.

Una delle strutture più spettacolari sono le **macchie solari**. Appaiono più scure perché hanno una temperatura inferiore rispetto alle regioni circostanti, anche se rimangono comunque incandescenti. Le macchie sono legate all'intensa attività magnetica del Sole e non sono immobili: possono comparire, crescere, deformarsi e scomparire nel giro di giorni o settimane.

L'attività magnetica segue un ciclo di circa undici anni, durante il quale il numero di macchie e la frequenza dei fenomeni più violenti aumentano e diminuiscono. Quando il Sole è particolarmente attivo possono verificarsi enormi **brillamenti**, esplosioni che liberano in pochi minuti quantità gigantesche di energia, e **espulsioni di mas-**

sa coronale, durante le quali miliardi di tonnellate di plasma vengono lanciate nello spazio.

Il Sole ha anche un'atmosfera molto più estesa di quanto suggerisca la sua superficie visibile. La parte più esterna, la **corona solare**, è estremamente rarefatta ma può raggiungere temperature di milioni di gradi. Normalmente non possiamo vederla perché la luce della fotosfera è molto più intensa, ma durante un'eclisse totale di Sole la Luna può coprire il disco solare lasciando apparire per pochi minuti quella spettacolare corona luminosa.

Il vento del Sole

Il Sole non manda nello spazio solo luce. Dalla sua atmosfera fluisce continuamente un torrente di particelle cariche chiamato **vento solare**. È un flusso invisibile che attraversa l'intero Sistema solare e che ci ricorda che il Sole non è una semplice lampadina cosmica: è una stella che interagisce fisicamente con tutto quello che le sta intorno.

La Terra ha un prezioso scudo contro questo flusso di particelle: il suo campo magnetico. Quando il vento solare raggiunge il nostro pianeta, il campo magnetico lo devia e impedisce alla maggior parte delle particelle di penetrare nell'atmosfera. Ma alcune riescono a seguire le linee del campo magnetico verso le regioni polari e, entrando in contatto con l'atmosfera, producono le **aurore polari**.

Le aurore sono quindi, in un certo senso, un messaggio del Sole. Le particelle partite dalla nostra stella raggiungono la Terra, interagiscono con gli atomi dell'atmosfera e li fanno brillare. Le tende verdi, rosse e violacee che vediamo nei cieli delle regioni polari sono il risultato visibile di un'interazione che è iniziata milioni di chilometri più lontano.

Le tempeste solari più intense possono però avere anche conseguenze meno spettacolari. Le particelle e i campi magnetici associati all'attività solare possono disturbare satelliti, sistemi di comunicazione e reti elettriche. Il Sole è quindi abbastanza lontano da sembrare innocuo, ma abbastanza potente da modificare concretamente l'ambiente spaziale intorno alla Terra.

Il futuro del Sole

Il Sole non brillerà per sempre. Tra qualche miliardo di anni l'idrogeno presente nel suo nucleo comincerà a scarseggiare e l'equilibrio che mantiene stabile la stella cambierà. Il nucleo si contrarrà, mentre gli strati esterni si espanderanno enormemente. Il Sole diventerà una **gigante rossa**, aumentando di dimensioni fino a coinvolgere direttamente i pianeti più interni del Sistema solare.

Mercurio e Venere saranno quasi certamente inghiottiti. Anche il destino della Terra sarà drammatico: molto prima di essere eventualmente inglobata, il nostro pianeta diventerà un mondo completamente inadatto alla vita, perché l'aumento della luminosità del Sole renderà la superficie sempre più calda e gli oceani finiranno per scomparire.

La storia del Sole non finirà nemmeno Dopo aver espulso nello spazio gli strati esterni, la stella lascerà dietro di sé il proprio nucleo: una piccola e densissima **nana bianca**, grande all'incirca quanto la Terra ma contenente una frazione enorme della massa che oggi appartiene al Sole. Non produrrà più energia attraverso la fusione nucleare come una stella normale. Continuerà invece a raffreddarsi lentamente per miliardi e miliardi di anni.

Il Sole che vediamo oggi, quindi, è solo una fase della sua storia. È nato, sta vivendo la sua lunga età adulta e un giorno morirà. Nel frattempo, però, continuerà a fornire alla Terra luce ed energia, alimentando il clima, gli oceani e quasi tutte le forme di vita che conosciamo. Ogni alba è quindi molto più di un semplice cambio di luce: è il segnale che, a 150 milioni di chilometri da noi, una stella continua da miliardi di anni a trasformare materia in energia.

3 La Luna

La Luna è il nostro vicino di casa più importante. È abbastanza vicina da poter essere raggiunta da una navicella spaziale, abbastanza grande da dominare il cielo notturno e abbastanza massiccia da influenzare persino gli oceani terrestri. Eppure, vista da vicino, è un mondo sorprendentemente ostile: niente aria da respirare, niente cielo azzurro, niente vento, niente pioggia e quasi nessuna protezione dal calore e dal freddo dello spazio.

Un mondo senza cielo

La Luna ha un raggio di circa 1700 km, poco più di un quarto di quello terrestre. Quando la vediamo brillare nel cielo, però, non dobbiamo lasciarci ingannare: la Luna non produce luce propria. La sua superficie riflette la luce del Sole, proprio come farebbe una gigantesca roccia illuminata da un faro cosmico.

Sulla Luna non esiste una vera atmosfera come quella terrestre. La gravità è circa un sesto di quella della Terra e non è sufficiente a trattenere un involucro gassoso denso. Esiste una tenuissima esosfera, ma è così rarefatta che sulla superficie lunare non possiamo respirare, né sentiremmo il vento soffiare. L'acqua non scorre sulla superficie come sulla Terra, anche se oggi sappiamo che nelle regioni permanentemente in ombra, soprattutto vicino ai poli, esistono depositi di ghiaccio.

L'assenza di un'atmosfera cambia completamente l'aspetto del paesaggio. Sulla Luna non esistono i crepuscoli: quando il Sole tramonta, il cielo passa quasi direttamente dalla luce al buio. Non c'è aria che diffonda la luce solare, quindi anche durante il giorno il cielo rimane nero. E senza un'atmosfera capace di distribuire e trattenere il calore, la superficie passa da temperature di circa 110 °C durante il giorno a circa −150 °C durante la notte.

Guardando la superficie lunare si vede una storia scritta nella roccia. Ci sono montagne, grandi pianure scure e soprattutto crateri: alcuni piccoli, altri larghi centinaia di chilometri. La maggior parte dei crateri è il risultato di impatti avvenuti miliardi

di anni fa, quando asteroidi e altri corpi colpivano molto più frequentemente la superficie lunare. Sulla Terra molte di quelle cicatrici sono state cancellate dall'erosione, dall'acqua, dal vento e dalla continua trasformazione della superficie. Sulla Luna, invece, quasi nulla le ha cancellate. Il paesaggio lunare è quindi una sorta di archivio degli antichi bombardamenti del Sistema solare.

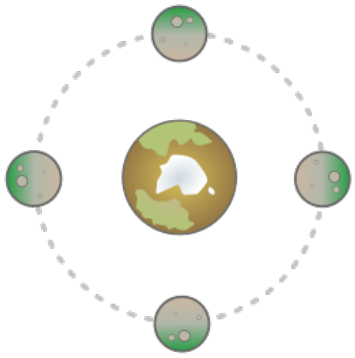
Le grandi regioni scure che vediamo a occhio nudo sono chiamate tradizionalmente "mari". Il nome è un equivoco storico: non contengono acqua. Sono immense pianure formate soprattutto da antiche colate di lava che riempirono grandi bacini prodotti da impatti giganteschi. La superficie lunare è inoltre ricoperta dalla **regolite**, una polvere finissima prodotta da miliardi di anni di impatti di meteoriti e micrometeoriti. È quella stessa polvere che gli astronauti delle missioni Apollo hanno lasciato sulle loro impronte.

E proprio qui emerge una delle caratteristiche più affascinanti della Luna: è un mondo che conserva il passato. La sua superficie cambia molto più lentamente di quella terrestre e per questo porta ancora i segni di eventi avvenuti miliardi di anni fa. Guardare la Luna significa, in un certo senso, guardare un pezzo della storia del Sistema solare.

Perché vediamo sempre la stessa faccia?

La Luna ruota su sé stessa e contemporaneamente orbita intorno alla Terra. I due movimenti durano praticamente lo stesso tempo: circa 27 giorni e un terzo. Il risultato è sorprendente: dalla Terra vediamo quasi sempre la stessa faccia della Luna (figura 5).

Non significa che la Luna non ruoti. Al contrario, ruota esattamente quanto basta per mantenere sempre orientata verso di noi la stessa parte della superficie. È come se una persona camminasse intorno a un tavolo continuando a guardare sempre la persona seduta al centro: per completare il giro dovrebbe ruotare su sé stessa una volta.



▲ **Figura 5**
La rotazione della Luna è sincronizzata con il suo moto orbitale: per questo dalla Terra vediamo sempre la stessa faccia.

La Luna, inoltre, non si trova sempre alla stessa distanza dalla Terra. La sua orbita è leggermente ellittica: nel punto più vicino, il *perigeo*, si trova a circa 356 000 km, mentre nel punto più lontano, l'*apogeo*, arriva a circa 407 000 km. La distanza media è di circa 384 000 km.

La Luna impiega circa 27,3 giorni per tornare nella stessa posizione rispetto alle stelle, ma per ritrovare la stessa posizione rispetto al Sole servono circa 29,5 giorni. La differenza nasce dal fatto che, mentre la Luna gira intorno alla Terra, anche la Terra si sposta lungo la propria orbita intorno al Sole. Per questo la Luna deve percorrere un piccolo tratto supplementare prima che Sole, Terra e Luna tornino nella stessa configurazione.

Le fasi della Luna

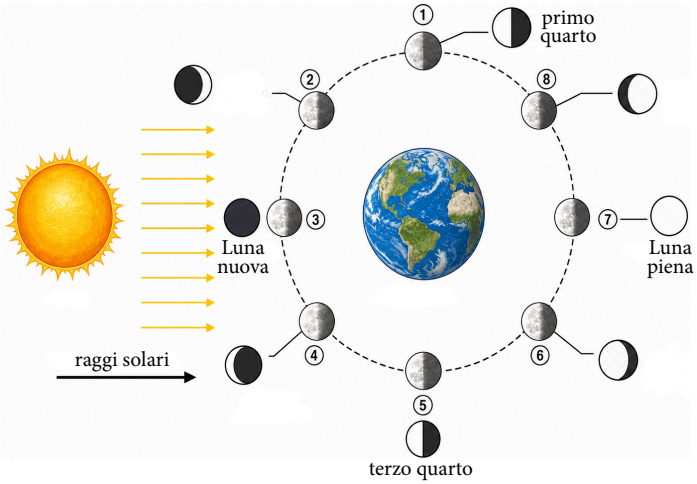
La Luna sembra cambiare continuamente forma. A volte appare come una sottile falce, altre volte come un mezzo disco, altre ancora come un cerchio luminoso perfetto. La Luna, naturalmente, non cambia forma: cambia la porzione della sua superficie illuminata dal Sole che riusciamo a vedere dalla Terra.

Quando la Luna si trova tra la Terra e il Sole, la sua faccia illuminata è rivolta quasi completamente lontano da noi: è la **Luna nuova**. Quando invece Terra e Sole si trovano ai lati opposti della Luna, vediamo quasi tutta la faccia illuminata: è la **Luna piena**. Tra queste due situazioni compaiono il primo e l'ultimo quarto, insieme a tutte le sottili fasi intermedie (figura 6).

Le quattro fasi principali si susseguono nell'arco di circa un mese. La Luna non si accende e non si spegne, e non c'è alcuna ombra della Terra che la copra durante il normale ciclo delle fasi: è semplicemente la geometria del sistema Sole-Terra-Luna a determinare quanta parte illuminata possiamo vedere.

Quando la Luna oscura il Sole

Se Sole, Terra e Luna fossero sempre perfettamente allineati, assisteremmo a un'eclisse ogni mese. Non accade perché l'orbita della Luna è inclinata di circa 5° rispetto al piano dell'orbita terrestre. Nella maggior parte dei mesi la Luna passa quindi un po' sopra o un po' sotto la linea che unisce Terra e Sole.



▲ **Figura 6**
Le fasi lunari.

Quando l'allineamento è abbastanza preciso, però, può accadere qualcosa di spettacolare. Durante un'**eclisse di Sole**, la Luna passa tra noi e il Sole e proietta la propria ombra sulla superficie terrestre. La Luna è molto più piccola del Sole, ma si trova anche enormemente più vicina a noi: per una straordinaria coincidenza geometrica, nel cielo i due dischi hanno dimensioni apparenti simili. È per questo che la Luna può arrivare a coprire quasi perfettamente il Sole.

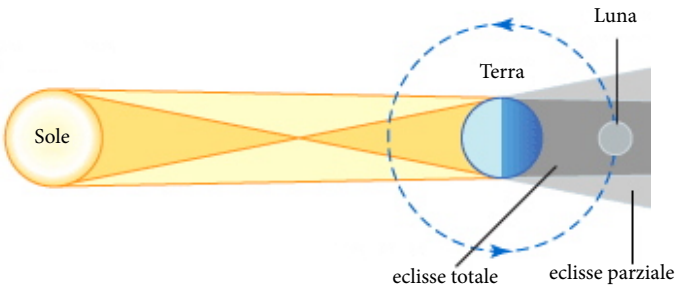
Durante un'**eclisse di Luna**, invece, è la Terra a trovarsi tra il Sole e la Luna. La Luna entra nell'ombra terrestre e può assumere una caratteristica colorazione rossastra. In questo caso l'eclisse è visibile da una porzione molto più ampia della Terra rispetto a

un'eclisse solare, perché basta trovarsi sul lato notturno del pianeta per poter assistere al fenomeno (figura 7).

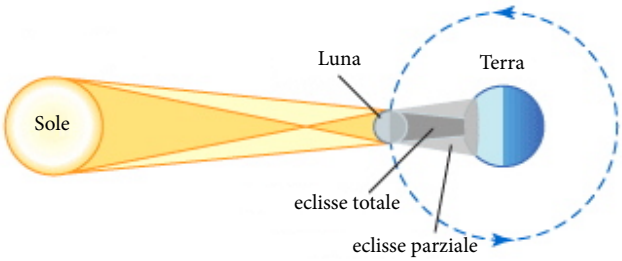
Le eclissi sono quindi un gioco di ombre su scala astronomica. Sole, Terra e Luna si muovono continuamente nello spazio e, solo quando la geometria è quella giusta, uno dei tre corpi finisce nell'ombra di un altro.

La Luna e le maree

La Luna non si limita a illuminare le nostre notti. La sua gravità tira continuamente la Terra, e l'effetto più evidente di questa attrazione è il movimento delle **maree**.



(a) Eclisse di Luna.



(b) Eclisse di Sole.

▲ **Figura 7**
Eclisse di Luna ed ecliss di Sole.

Le maree sono il lento innalzarsi e abbassarsi delle grandi masse d'acqua terrestri. La spiegazione più semplice è immaginare che la gravità della Luna attiri gli oceani verso di sé. Ma la situazione è un po' più sottile: la gravità lunare non agisce con la stessa intensità su ogni punto della Terra. È leggermente più forte sul lato rivolto verso la Luna e leggermente più debole sul lato opposto. Questa differenza produce due rigonfiamenti degli oceani, uno rivolto verso la Luna e uno sul lato opposto della Terra.

La Terra ruota sotto questi rigonfiamenti e, per questo, nella maggior parte delle coste si osservano generalmente due alte e due basse maree nell'arco di circa un giorno. L'intervallo medio tra due alte maree successive è di circa 12 ore e 25 minuti. La presenza dei continenti, la forma delle coste e la profondità degli oceani rendono però il fenomeno molto più complesso: non esiste un unico ritmo delle maree valido ovunque sulla Terra.

La Luna sta quindi continuamente tirando il nostro pianeta, deformandolo impercettibilmente e spostando masse d'acqua grandi quanto interi oceani. È una delle dimostrazioni più concrete del fatto che la gravità non è solo qualcosa che tiene i pianeti in orbita: è una forza che modella ancora oggi il volto della Terra.

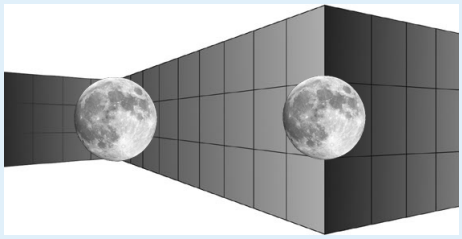
Domande e risposte

Perché vediamo sempre la stessa faccia della Luna?

Vediamo quasi sempre la stessa faccia della Luna perché il tempo che impiega a ruotare su sé stessa è uguale al tempo che impiega a compiere un giro intorno alla Terra.

Perché a volte la Luna sembra enorme quando è vicina all'orizzonte?

È un'illusione ottica. Quando la Luna è vicina all'orizzonte, la confrontiamo con alberi, case e montagne e ci sembra più grande, ma in realtà la sua dimensione apparente cambia pochissimo (figura 8).



▲ **Figura 8**
La Luna sembra più grande all'orizzonte, ma è un'illusione ottica.

Perché alcune notti c'è la Luna piena e altre non si vede proprio?

La Luna non produce luce, ma riflette quella del Sole. Durante il suo movimento intorno alla Terra cambia la parte illuminata che vediamo: queste sono le fasi lunari. Quando è Luna nuova, la parte illuminata è rivolta verso il Sole e dalla Terra la vediamo pochissimo o per niente.

Perché la Luna si vede anche di giorno?

Perché la Luna riflette la luce del Sole e, in alcune fasi, si trova sopra l'orizzonte anche durante il giorno. Per questo possiamo vederla insieme al cielo illuminato dal Sole.

Perché non abbiamo un'eclissi ogni mese?

Perché l'orbita della Luna è inclinata rispetto al piano dell'orbita terrestre. Quindi, nella maggior parte dei mesi, Sole, Terra e Luna non sono perfettamente allineati e non si verifica un'eclissi.

Perché sulla Luna non possiamo sentire un astronauta parlare?

Perché sulla Luna non c'è un'atmosfera abbastanza densa da permettere al suono di propagarsi. Per comunicare, gli astronauti usano le onde radio, che possono viaggiare anche nel vuoto.

Potremmo vedere un tramonto sulla Luna?

Sì. Sulla Luna il Sole tramonta, ma il cielo rimane nero perché non c'è un'atmosfera che diffonda la luce. Il Sole apparirebbe come un disco molto luminoso che scende verso l'orizzonte.

Perché il Sole sembra giallo, anche se una stella come il Sole emette luce di molti colori?

Il Sole emette luce di molti colori, che insieme formano la luce bianca. Attraversando l'atmosfera terrestre, alcuni colori vengono diffusi più di altri e il Sole ci appare spesso giallastro.

Perché il Sole scalda anche attraverso una finestra?

La luce del Sole attraversa il vetro e trasporta energia. Quando questa energia viene assorbita dagli oggetti presenti nella stanza, si trasforma in calore e aumenta la temperatura.

Perché al tramonto il Sole diventa rosso?

Quando il Sole è vicino all'orizzonte, la sua luce attraversa uno strato maggiore di atmosfera. La luce blu viene diffusa maggiormente, mentre quella rossa e arancione riesce ad arrivare più direttamente ai nostri occhi.

Perché non dobbiamo guardare direttamente il Sole?

La luce del Sole è molto intensa e può danneggiare gravemente gli occhi, anche in pochi secondi. Per osservare il Sole servono strumenti e filtri solari adatti.

Perché un'eclissi solare non rende improvvisamente notte tutta la Terra?

Durante un'eclissi la Luna copre il Sole solo per una piccola parte della superficie terrestre. L'ombra della Luna raggiunge una zona limitata della Terra, mentre nel resto del pianeta continua a esserci la luce del giorno.

Se il Sole si spegnesse, quanto tempo impiegheremmo ad accorgercene?

Circa 8 minuti e 20 secondi, perché è questo il tempo che la luce del Sole impiega per raggiungere la Terra. Anche la sua attrazione gravitazionale non cambierebbe per noi prima di quel momento.

Se nello spazio non c'è aria, come fa il Sole a scaldarci?

Il Sole ci scalda attraverso la radiazione: emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche, che possono viaggiare anche nel vuoto dello spazio.

Se il Sole è una stella, perché le altre stelle sembrano così diverse?

Il Sole ci sembra molto diverso soprattutto perché è molto più vicino. Le altre stelle sono lontanissime e possono avere dimensioni, temperature e colori differenti.

Il Sole morirà?

Sì. Tra circa cinque miliardi di anni il Sole esaurirà il combustibile nel suo nucleo e si trasformerà prima in una gigante rossa e poi in una nana bianca.

Giorno e notte

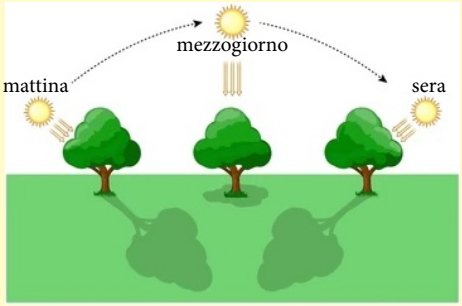
Il Sole attraversa il cielo

Osserva il Sole a intervalli di qualche ora, usando come riferimento un edificio, un albero o un altro punto del paesaggio. Non guardare mai direttamente il Sole.

Il Sole sembra spostarsi nel cielo da est verso ovest durante la giornata. Questo movimento è apparente ed è dovuto soprattutto alla rotazione della Terra.

L'ombra cambia durante il giorno

Scegli un oggetto verticale, come un palo o un bastone, e osserva la sua ombra in diversi momenti della giornata. Puoi segnare sul terreno la posizione della punta dell'ombra (figura 9).



▲ **Figura 9**
L'ombra cambia lunghezza e direzione durante il giorno.

L'ombra cambia lunghezza e direzione durante il giorno. È più lunga quando il Sole è basso sull'orizzonte e più corta quando il Sole è alto.

Dove tramonta il Sole?

Osserva il punto dell'orizzonte in cui tramonta il Sole in diversi periodi dell'anno. Puoi usare alberi, edifici o altri punti di riferimento per confrontare le diverse posizioni.

Il Sole non tramonta ogni giorno nello stesso punto dell'orizzonte. La posizione del tramonto cambia durante l'anno e raggiunge le posizioni più estreme intorno ai solstizi.

Quanto dura il giorno?

Segna per diversi giorni l'ora del sorgere e del tramonto del Sole. Confronta la durata del periodo in cui il Sole rimane sopra l'orizzonte.

La durata del giorno cambia nel corso dell'anno. Alle nostre latitudini, i giorni sono più lunghi in estate e più corti in inverno.

Il Sole e le stagioni

Ripeti nel corso dell'anno la stessa osservazione dell'ombra di un oggetto verticale, sempre alla stessa ora. Confronta la lunghezza delle ombre nelle diverse stagioni.

A seconda della stagione, il Sole percorre nel cielo un arco più alto o più basso. Questo cambiamento è legato all'inclinazione dell'asse terrestre mentre la Terra orbita attorno al Sole.

Le fasi della Luna

Osserva la Luna per diverse sere consecutive e disegna o fotografa la sua forma apparente. Segna anche la data e, se possibile, l'ora dell'osservazione.

La forma illuminata della Luna cambia perché, mentre orbita attorno alla Terra, cambia la posizione relativa tra Sole, Terra e Luna. Le diverse forme che osserviamo sono le **fasi lunari**.

La Luna sorge ogni giorno a un'ora diversa

Osserva l'ora in cui la Luna sorge per diversi giorni consecutivi. Confronta gli orari e nota come cambiano da un giorno all'altro.

La Luna non sorge ogni giorno alla stessa ora perché si sposta lungo la sua orbita attorno alla Terra. Per questo, rispetto alle stelle, ogni giorno appare leggermente più a est.

La Luna e le stelle

Scegli una sera una stella vicina alla Luna e osserva la loro posizione relativa. Ripeti l'osservazione nelle sere successive.

La Luna cambia rapidamente posizione rispetto alle stelle lontane perché orbita attorno alla Terra. Le stelle, invece, sono così lontane che nel corso di pochi giorni sembrano rimanere quasi immobili tra loro.

La Luna non mostra sempre la stessa faccia

Osserva la Luna in diverse sere e confronta i dettagli della sua superficie, come mari e crateri, vicino al bordo e al centro. Puoi fotografarla e confrontare le immagini.

I dettagli della superficie rimangono sempre nella stessa posizione: dalla Terra vediamo quasi sempre lo stesso emisfero della Luna. Questo accade perché il tempo che la Luna impiega per ruotare su sé stessa è uguale a quello che impiega per orbitare attorno alla Terra.

La Luna vicino all'orizzonte

Osserva la Luna quando è appena sorta e confronta le sue dimensioni apparenti con quelle che ha quando è più alta nel cielo. Puoi usare come riferimento un oggetto lontano, come un albero o un edificio.

La Luna può sembrare più grande quando è vicina all'orizzonte, ma le sue dimensioni apparenti cambiano pochissimo. Si tratta soprattutto di un'illusione ottica dovuta al modo in cui il nostro cervello interpreta la posizione della Luna rispetto agli oggetti del paesaggio.

La Luna piena sorge al tramonto

In occasione della Luna piena osserva il momento in cui la Luna compare sopra l'orizzonte e confrontalo con quello del tramonto del Sole. Puoi ripetere l'osservazione anche nei giorni vicini alla Luna piena.

La Luna piena si trova nel cielo opposta al Sole rispetto alla Terra. Per questo, in prossimità della Luna piena, la Luna sorge circa quando il Sole tramonta e tramonta circa quando il Sole sorge.

Esercizi

1 Indica la risposta corretta.

a. Per passare da Luna piena a ultimo quarto occorrono circa:

- A 7 giorni
- B 15 giorni
- C 25 giorni
- D 30 giorni

b. La durata del moto di rivoluzione lunare è di circa:

- A 24 giorni
- B 30 giorni
- C 50 giorni
- D 365 giorni

c. Il piano dell'orbita lunare è inclinato di:

- A 66° 33′ rispetto all'eclittica
- B 23° 27′ rispetto all'eclittica
- C 5° rispetto all'eclittica
- D giace sull'eclittica

d. I nodi rappresentano:

- A i punti dell'orbita lunare più lontani dal Sole
- B i punti dell'orbita lunare più vicini al Sole
- C i punti dell'orbita lunare posti sull'eclittica
- D i punti dell'orbita lunare posti sotto l'eclittica

e. Il moto di rivoluzione lunare descrive un'ellisse con la Terra:

- A al perigeo
- B all'apogeo
- C al centro
- D su uno dei due fuochi

f. Il punto dell'orbita lunare più lontano dalla Terra si chiama:

- A apogeo
- B nodo
- C perielio
- D fuochi

g. In circa una settimana la Luna percorre circa:

- A 1/4 dell'orbita lunare
- B 1/2 dell'orbita lunare
- C 3/4 dell'orbita lunare
- D 4/4 dell'orbita lunare

[due risposte A, una B, due C e due D]

2 Indica la risposta corretta.

a. Un'eventuale eclisse di Luna a Cesena può accadere in fase di:

- A Luna piena
- B Luna nuova
- C primo quarto
- D ultimo quarto

b. La velocità della Luna lungo la sua orbita è:

- A costante
- B più veloce al perigeo
- C più veloce sui nodi
- D più veloce all'apogeo

c. La fase lunare di primo quarto avviene mediamente:

- A una volta al giorno
- B una volta alla settimana
- C una volta al mese
- D una volta all'anno

d. Se alle ore 20:00 si ha l'alta marea, il giorno dopo ci sarà alle:

- A 20:48
- B 20:00
- C 22:12
- D 23:00

e. Un'eventuale eclisse di Sole a Cesena può accadere in fase di:

- A Luna piena
- B Luna nuova
- C primo quarto
- D ultimo quarto

f. La Luna compie una rotazione sul suo asse in circa:

A 24 ore
B 30 giorni
C 6 ore
D 12 ore

g. L'alta marea sizigiale si registra nelle fasi:

A primo e ultimo quarto
B Luna nuova e primo quarto
C Luna piena e ultimo quarto
D Luna nuova e Luna piena

[tre risposte A, due B, una C e una D]

3 Indica la risposta corretta.

a. La miglior stima approssimata della durata del mese lunare è di:

A 365,4524 giorni
B 29,5 giorni
C 36 ore
D 36 giorni

b. La Luna può provocare un'eclisse di Sole solo:

A se è rivolta verso la Terra
B se è in fase di Luna calante
C se si trova sui nodi in fase di Luna nuova
D se si trova sull'eclittica in fase di Luna piena

c. Se la Luna si muovesse solo sotto l'eclittica:

A non avremmo le quattro stagioni
B avremmo mesi più lunghi
C avremmo settimane più corte
D non avremmo più le eclissi

d. Il 10 giugno la Luna è piena; quando la ritroverò piena?

A 9 luglio
B 11 maggio
C 25 giugno
D 13 luglio

e. Per avere un'eclissi di Luna occorrono le seguenti circostanze:

A Luna all'apogeo e Luna nuova
B Luna piena e sull'eclittica
C Luna calante e Luna al perielio
D Luna su uno dei due nodi e Luna nuova

f. Il 10 giugno la Luna è nuova; quando la troverò piena?

A 11 maggio
B 25 giugno
C 13 luglio
D 9 luglio

g. La Luna compie una rivoluzione attorno alla Terra in circa:

A 24 ore
B 12 ore
C 30 giorni
D 6 ore

[tre risposte A, due B, due C e nessuna D]

4 Indica la risposta corretta.

a. La settimana ha una durata simile al tempo di:

A un quarto della rivoluzione lunare
B una rivoluzione lunare completa
C una rotazione della Terra
D una rivoluzione terrestre

b. Il rapporto esistente tra i tempi di rotazione terrestre e rivoluzione lunare è circa:

A 1/7
B 1/30
C 1/15
D 1/21

c. Il tempo per l'alternanza tra alta e bassa marea è di circa:

A 24 ore
B 12 ore
C 6 ore e 12 minuti
D 6 ore

d. Durante il moto di rivoluzione la Luna:

A si mantiene perpendicolare all'equatore

B si mantiene perpendicolare all'eclittica

C si mantiene a distanza uguale dalla Terra

D si mantiene a distanza variabile dalla Terra

e. Per avere un'eclissi di Sole la Luna deve trovarsi:

A in Luna nuova

B al primo quarto

C all'ultimo quarto

D in Luna piena

f. Il tempo per l'alternanza tra due alte maree è di circa:

A 24 ore

B 12 ore

C 6 ore

D 6 ore e 12 minuti

g. Per passare da Luna nuova a ultimo quarto occorrono circa:

A 7 giorni

B 15 giorni

C 21 giorni

D 30 giorni

[tre risposte A, tre B, una C e nessuna D]

5 Indica la risposta corretta.

a. Il mese lunare è legato a un percorso dell'orbita lunare pari a:

A 1 giro

B 1/2 giro

C 1/4 di giro

D 3/4 di giro

b. La Luna si trova all'afelio:

A durante il solstizio d'estate

B nessuna risposta appare accettabile

C in fase di ultimo quarto

D durante l'equinozio

c. Scegli il completamento *errato*. La Luna:

A è in novilunio quando i raggi solari ne illuminano la faccia nascosta

B osservata dalla Terra mostra sempre la stessa faccia

C ha un periodo di rotazione uguale a quello di rivoluzione

D è al primo quarto quando è allineata con il Sole e con la Terra

d. L'eclisse di Sole si ha in fase di:

A primo quarto

B ultimo quarto

C Luna nuova

D Luna piena

e. Il perigeo è un punto dell'orbita lunare:

A che tocca la superficie terrestre

B che tocca l'eclittica

C che tocca l'equatore terrestre

D che è più vicino alla Terra

f. La marea di quadratura si registra nelle fasi:

A primo e ultimo quarto

B Luna nuova e primo quarto

C Luna piena e ultimo quarto

D Luna nuova e Luna piena

g. In un anno la Luna piena si può vedere circa:

A 6 volte

B 12 volte

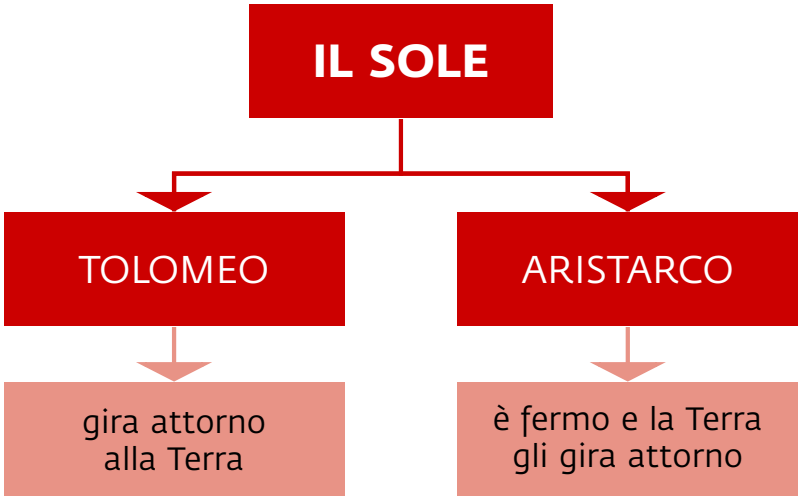
C 24 volte

D 30 volte

[due risposte A, due B, due C e una D]

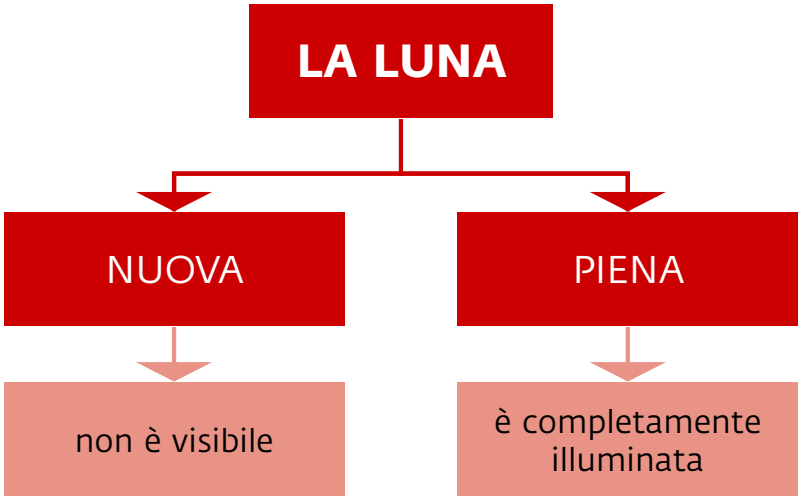
IN SINTESI

IL SOLE E LA LUNA



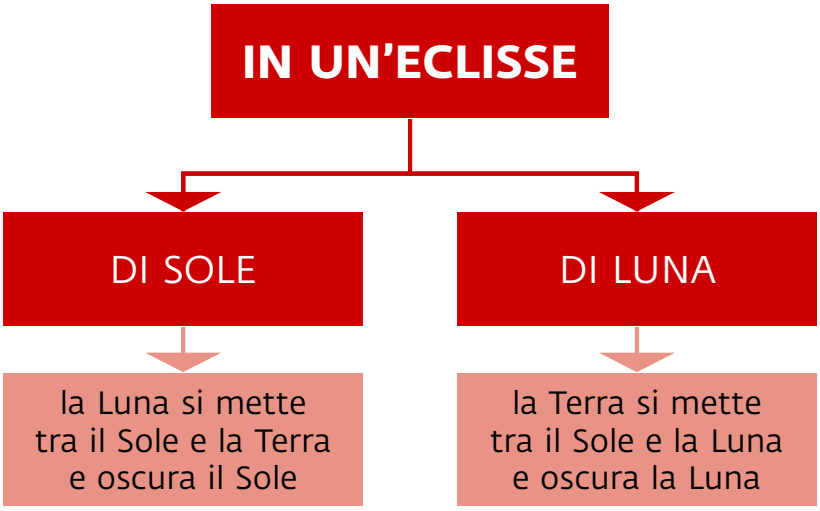
IN SINTESI

IL SOLE E LA LUNA



IN SINTESI

IL SOLE E LA LUNA



3 I pianeti

Come si muovono i pianeti? Come facciamo a sapere che esistono pianeti che non possiamo vedere? E perché proprio otto?

In questo capitolo partiremo dall'osservazione del cielo per capire come abbiamo imparato a riconoscere e spiegare il moto dei pianeti. Seguendo la strada che porta da Tolomeo a Copernico, Keplero e Newton, vedremo anche come l'astronomia sia riuscita a scoprire pianeti ancora invisibili. Infine entreremo nel Sistema solare per conoscere da vicino gli otto mondi che orbitano attorno al Sole.

1 Il cielo in tre atti

«**Maledetto sia Copernico!** Ha rovinato l'umanità, irrimediabilmente. Ormai noi tutti ci siamo poco a poco adattati alla nuova concezione dell'infinita nostra piccolezza, a considerarci anzi men che niente nell'universo».

È Pirandello, nel **Fu Mattia Pascal**, a esprimere con tanta poetica veemenza l'impatto della rivoluzione copernicana sull'uomo. L'idea che la Terra non sia il centro dell'universo, ma che sia solo uno dei tanti corpi celesti in continuo movimento si è affermata dopo una lunga battaglia.

Tolomeo

La storia ha inizio nel II secolo della nostra era, quando l'astronomo alessandrino Tolomeo pubblicò l'**Almagesto**. Per spiegare il moto dei corpi celesti, Tolomeo propone un sistema fondato sul principio della circolarità e dell'uniformità dei moti celesti, già formulato da Aristotele.

Il sistema tolemaico è **geocentrico**: la Terra, sferica e immobile, si trova al centro del mondo. Al limite esterno c'è la sfera delle fisse, che ruota una volta al giorno intorno alla Terra, da est a ovest. I corpi intermedi (il Sole, la Luna e i cinque pianeti allora conosciuti) ruotano nella direzione opposta, da ovest verso est.

C'erano però delle difficoltà: i pianeti, per esempio, anche se di solito si muovono da ovest verso est, a volte sembrano invertire la direzione di moto e spostarsi da est verso ovest.

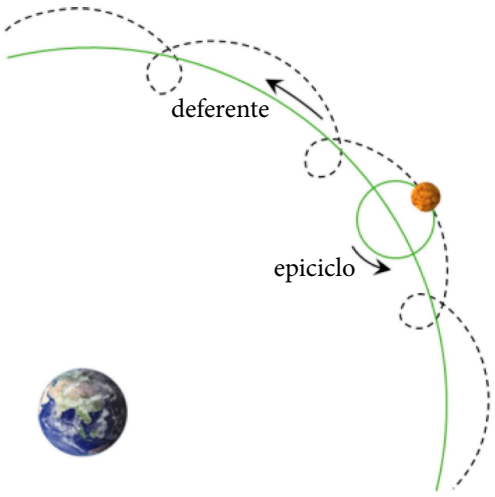
Per spiegare il moto «retrogrado» dei pianeti si suppose che si muovessero di moto uniforme su circonferenze, dette **epicicli**, i cui centri percorrevano, anch'essi con moto uniforme, altre circonferenze di diametro maggiore, chiamate **deferenti** (figura 1). Quando, come spesso avveniva, nuove osservazioni introducevano nuovi fatti da spiegare, si aggiungevano nuovi epicicli imperniati sugli epicicli precedenti. Si ar-

rivò addirittura a quaranta epicicli su epicicli per descrivere le più piccole irregolarità osservate nel moto dei pianeti.

Nel XIII secolo, Alfonso X, re di Castiglia e León e appassionato di astronomia, dichiarò che **se Dio lo avesse consultato mentre stava creando l'universo, gli avrebbe potuto dare buoni consigli**. Nonostante fosse molto complicato, il sistema tolemaico fu universalmente accettato per molti secoli.

Il rivoluzionario che mise il Sole al centro

Nel 1514 l'astronomo Niccolò Copernico pubblicò il **Commentariolo**, in cui avanzò l'ipotesi di un sistema **eliocentrico**: il Sole si trova al centro, i pianeti si muovo lungo orbite circolari attorno al Sole, mentre la Terra ruota ogni giorno su sé stessa, da ovest verso est, in modo da spiegare l'apparente rotazione della sfera celeste nel verso opposto. Questa ipotesi era stata già formulata in passato da Aristarco di Samo, ma i tempi non erano ancora maturi per accoglierla.



▲ **Figura 1**
Un deferente e un epiciclo tipici, e il moto intrecciato che generano.

La teoria di Copernico non era più precisa né più semplice di quella di Tolomeo: Tolomeo usava quaranta epicicli, mentre Copernico alla fine ne introdusse trentasei. Eppure, la sua teoria fu rivoluzionaria: rompeva con una tradizione millenaria e formulava previsioni (come la somiglianza tra i pianeti e la Terra, le fasi di Venere e un universo più grande) che furono clamorosamente confermate da Galileo.

Copernico morì nel 1543, e nello stesso anno veniva pubblicato il suo trattato **Le rivoluzioni delle sfere celesti**, che esponeva il suo sistema eliocentrico.

Nonostante l'opposizione dell'autore ormai in fin di vita, il testo di Copernico fu pubblicato facendolo precedere da una premessa anonima che a lungo fu attribuita allo stesso Copernico ma che poi (precisamente da Keplero, nel 1609), fu fatta correttamente risalire al teologo luterano Andreas Osiander. In questa premessa, Osiander sminuiva il lavoro di Copernico sostenendo che il suo modello non andasse inteso come una descrizione reale dell'universo, alternativa a quello tolemaico, ma solo come un comodo strumento matematico per semplificare i complicati calcoli del geocentrismo. Un'interpretazione che sarà poi fatta propria dal cardinal Bellarmino nella polemica con Galileo Galilei sul sistema copernicano.

Copernico era consapevole che il suo sistema non era perfetto: alcune osservazioni (per esempio il moto "irregolare" di Marte) non erano spiegabili con il suo modello. Questi problemi furono risolti da Giovanni Keplero, un astronomo che perfezionò il

sistema copernicano rinunciando all'idea che le orbite dei pianeti dovessero essere per forza circolari.

L'uomo che riordinò i pianeti

Keplero credeva che la natura avesse un **ordine matematico** e pensò di averlo trovato nel 1596, quando pubblicò il **Mistero della descrizione del mondo**. Qui, dopo aver sostenuto le ragioni del sistema copernicano, Keplero affermò che si potevano calcolare le dimensioni delle orbite planetarie mettendole in relazione con i cinque solidi regolari o "platonici". Anche se poi l'idea si rivelò sbagliata, esprimeva però un programma di ricerca che doveva mostrare ancora i suoi frutti.

Tolomeo non aveva saputo spiegare le "irregolarità" del moto di Marte, e nemmeno Copernico c'era riuscito. Anche Tycho Brahe, che l'aveva osservato innumerevoli volte, si era arreso alle difficoltà. Dopo la morte di Brahe fu Keplero ad affrontare il problema. Ci lavorò per **dieci anni**.

I tentativi si susseguirono l'uno all'altro, e tutti fallirono. Keplero concluse che era impossibile risolvere il problema con qualsiasi combinazione di circoli. Provò allora con figure ovali. Ma, di nuovo, le osservazioni lo smentirono.

Finalmente, Keplero scoprì che la teoria e le osservazioni combaciavano se si facevano muovere i pianeti lungo orbite ellittiche, con velocità variabili. Ecco le tre leggi che risolvono il problema.

1. L'orbita descritta da un pianeta è un'ellisse, di cui il Sole occupa uno dei fuochi.
2. Il segmento che unisce il Sole con il pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.
3. Il quadrato del tempo che un pianeta impiega a percorrere la sua orbita è proporzionale al cubo della sua distanza media dal Sole.

Sostituendo le orbite circolari di Tolomeo e di Copernico con le ellissi, e rimpiazzando il moto uniforme con la legge delle aree uguali, si può eliminare la moltitudine degli eccentrici e degli epicicli.

Fu una scoperta sensazionale: veniva spezzato definitivamente il dogma antico della naturalità e perfezione del moto circolare. Tre leggi matematiche fondamentali riuscivano a descrivere una quantità sterminata di osservazioni e permettevano di fare previsioni sicure e accurate.

Keplero enunciò le prime due leggi nella **Nuova astronomia** del 1609, e la terza nelle **Armonie del mondo** del 1619.

La fisica dell'epoca non permetteva di spiegare le leggi di Keplero. Per farlo bisognava "reinventare" la fisica, modificando radicalmente le idee correnti. Keplero morì nel 1630, e Galileo nel 1642. Nello stesso anno nasceva Isaac Newton, l'uomo che, raccogliendo i risultati ottenuti da Keplero e Galileo, era destinato a risolvere i problemi da loro lasciati aperti e a dare così alla fisica quell'assetto che noi conosciamo con il nome di **fisica classica**.

2 Il pianeta scoperto con una penna

Le grandi scoperte geografiche sulla nostra Terra hanno avuto uno straordinario **pendant** in cielo, con la scoperta progressiva dei pianeti del sistema solare. La storia di queste scoperte è un intreccio fra intuizioni, studi teorici, progressi tecnologici, osservazioni e colpi di fortuna.

I VIP del cielo antico

La parola "pianeta" viene dal greco **planétes**, che significa "viandante". Fin dall'antichità, questo nome è stato attribuito ai corpi celesti che mutano la loro posizione rispetto alle cosiddette "stelle fisse".

Gli antichi contavano cinque pianeti: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Un tempo si pensava che Vespero, la "stella della sera", e Lucifero, la "stella del mattino", fossero due astri distinti. Fu Pitagora a capire che Vespero e Lucifero erano in realtà lo stesso pianeta, visibile in momenti diversi della giornata, cioè Venere.

Talvolta, tra i pianeti venivano inclusi anche il Sole e la Luna, ma non la Terra, che si riteneva essere il centro immobile attorno al quale ruotavano tutti gli altri corpi celesti.

A dare il nome ai pianeti furono i Greci, che si ispirarono agli dèi dell'Olimpo. Al pianeta più luminoso, Venere, fu dato il nome della dea della bellezza. Mercurio, il pianeta che si muove più velocemente, fu chiamato come il messaggero degli dèi. A Marte, dal colore rosso sangue, fu attribuito il nome del dio della guerra. Giove, il pianeta più grande, fu abbinato alla divinità più importante della mitologia. Per Saturno, che era il più lontano conosciuto all'epoca, si scelse il nome del dio padre di Giove.

Serendipità

Il numero dei pianeti conosciuti restò invariato per millenni. La svolta si ebbe nel 1609, quando Galileo Galilei puntò verso il cielo il cannocchiale, uno strumento inventato dagli occhialai fiamminghi. In questo modo Galileo vide cose invisibili a occhio nudo: osservò i monti e le valli della Luna, scoprì i quattro satelliti di Giove, vide innumerevoli stelle invisibili che affollano la Via Lattea e si accorse che Venere mostrava fasi simili a quelle lunari.

Il cannocchiale galileiano fu progressivamente perfezionato per aumentarne la potenza e per attenuare gli effetti dell'aberrazione cromatica. Nascevano così i moderni telescopi.

Nel 1781, con un un telescopio costruito da lui stesso, William Herschel scoprì per caso uno strano oggetto, oltre l'orbita di Saturno. In un primo momento Herschel pensò che l'oggetto fosse una cometa, ma poi capì di aver scoperto un nuovo pianeta, che chiamò Urano, il dio greco del cielo.

Anche se è visibile a occhio nudo, fino ad allora Urano non era stato riconosciuto come un pianeta, per la sua bassa luminosità e il suo moto particolarmente lento.

La sua scoperta giunse inaspettata: i pianeti erano conosciuti da millenni e nessuno sospettava che ce ne fossero altri.

Calcolato, puntato, trovato

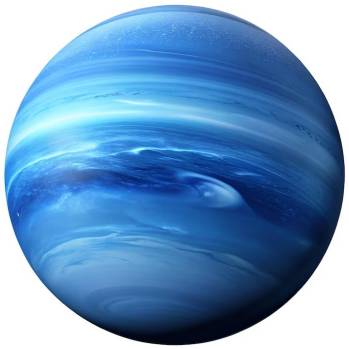
Per completare la lista dei pianeti si dovette attendere ancora. La storia iniziò nel 1687, quando Isaac Newton pubblicò la legge di gravitazione universale: nell'universo due corpi si attraggono con una forza direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

Il moto dei pianeti del sistema solare è determinato in gran parte dall'azione del Sole: infatti, la massa del Sole è mille volte la massa di Giove, il pianeta più grande del sistema solare.

Se si tiene conto solo dell'azione del Sole e si trascurano le interazioni reciproche tra i pianeti, l'accordo tra le orbite previste dalla meccanica newtoniana e i dati osservati è buono, ma non perfetto. Per avere un accordo migliore bisogna tener conto delle forze di mutua attrazione tra tutti i pianeti.

Il problema di calcolare le "perturbazioni" reciproche esercitate dai pianeti fu affrontato nel Settecento da vari matematici, tra cui Eulero, Lagrange e Laplace. In particolare, Laplace sviluppò un metodo matematico che spiegava il moto osservato di Giove e Saturno, tenendo conto della loro attrazione reciproca.

Il periodo della rivoluzione di Urano attorno al Sole è di circa 84 anni terrestri. Nel 1846, Urano aveva quindi compiuto quasi una rivoluzione completa dopo la sua scoperta. Gli astronomi si accorsero allora che la sua traiettoria era leggermente diversa da quella prevista dalla meccanica newtoniana, anche tenendo conto delle perturbazioni reciproche dei pianeti conosciuti.



▲ **Figura 2**
Un'immagine del pianeta Nettuno.

Le irregolarità del moto di Urano potevano essere spiegate con varie ipotesi: a una distanza così grande, l'effetto della gravità del Sole poteva essere diverso da quello descritto da Newton, oppure le discrepanze potevano essere dovute a errori di osservazione, oppure Urano poteva essere perturbato da un pianeta non ancora scoperto, che doveva trovarsi oltre l'orbita di Urano, perché non perturbava l'orbita di Saturno.

Nel 1845, Urbain Le Verrier a Parigi e John Adams a Cambridge, convinti che le anomalie nell'orbita di Urano fossero dovute alla presenza di un pianeta sconosciuto, usarono i dati delle osservazioni di Urano e la legge della gravitazione di Newton per calcolare la posizione del nuovo pianeta.

Adams mostrò i suoi calcoli agli astronomi di Cambridge, ma non fu preso sul serio: «mentre il lavoro è certo, il successo sembra piuttosto incerto», gli risposero. Invece Le Verrier ebbe più fortuna: inviò i suoi risultati a Johann Galle dell'osservatorio

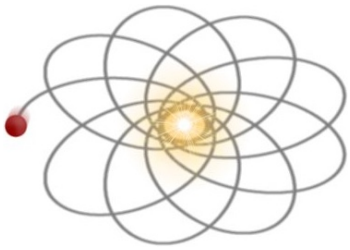
astronomico di Berlino, che si mise subito al lavoro perlustrando il cielo nella regione suggerita da Le Verrier. La sera del 23 settembre del 1846, dopo meno di un'ora di ricerca e a meno di un grado dalla posizione prevista da Le Verrier, Galle scoprì Nettuno, l'ottavo e ultimo pianeta del sistema solare. «Il pianeta di cui avete calcolato la posizione **esiste davvero**!», scrisse emozionato Galle a le Verrier.

Diversamente dalla scoperta di Urano, che fu casuale, la scoperta di Nettuno fu un trionfo della meccanica newtoniana. Si disse che Le Verrier «**aveva scoperto un pianeta con la punta della sua penna**». Il nuovo pianeta, distante dalla Terra 4,5 miliardi di chilometri, invisibile a occhio nudo e definito "il pianeta blu", fu chiamato Nettuno, il dio greco del mare (figura 2).

Il pianeta che non è mai esistito

Dopo la sua scoperta, risultò retrospettivamente che Urano era stato osservato ma non riconosciuto più volte. Il primo a vederlo fu Galileo nel 1613, che lo annotò sui suoi appunti senza però identificarlo come un pianeta.

Dopo la scoperta di Nettuno, Le Verrier cercò di spiegare le anomalie dell'orbita di Mercurio. Essa, infatti, è ellittica solo in prima approssimazione, perché soggetta alla precessione del perielio (figura 3): il punto più vicino al Sole dell'orbita di Mercurio (**il perielio**) non è fisso, ma ruota (**precede**).



▲ **Figura 3**
Precessione del perielio dell'orbita di Mercurio (fortemente esagerata).

Il fenomeno è previsto dalla meccanica newtoniana, ma Le Verrier scoprì che Mercurio avanza più velocemente di quello che prevede la teoria, con uno scarto (minuscolo, ma apprezzabile) di circa 43 secondi d'arco ogni secolo. Le Verrier ipotizzò che la differenza fosse l'effetto di un altro pianeta sconosciuto, che chiamò Vulcano, la cui orbita doveva essere interna a quella di Mercurio.

A differenza di quelle di Urano, le anomalie nell'orbita di Mercurio non erano causate dalla presenza di un pianeta nascosto. Poi si capì che erano dovute a un effetto previsto dalla relatività generale, formulata nel 1915 da Albert Einstein. Il calcolo corretto dell'orbita di Mercurio rappresentò infatti una delle principali conferme di quella teoria.

Per ironia della sorte, dunque, mentre la scoperta di Nettuno aveva mostrato la validità della legge di gravitazione di Newton, la mancata scoperta di Vulcano confermò una teoria della gravità radicalmente nuova.

3 Il sistema solare

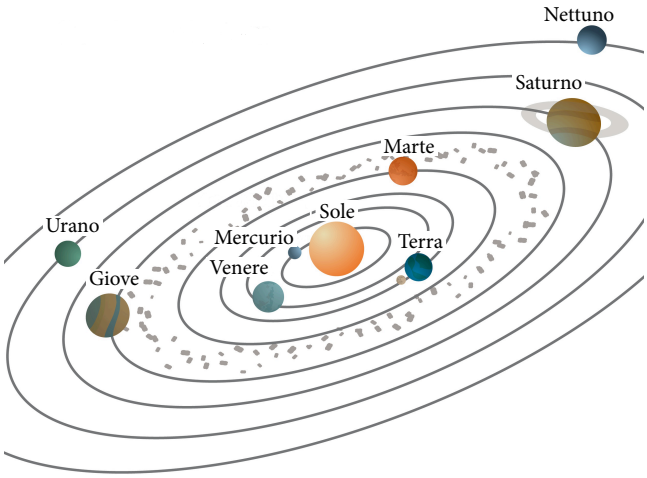
Quando alziamo gli occhi verso il cielo, vediamo solo una piccola parte del nostro quartiere cosmico. Al centro c'è il Sole, una stella attorno alla quale viaggia una grande famiglia di corpi celesti: otto pianeti, le loro lune, migliaia di asteroidi, una quan-

tità enorme di meteoroidi e, ai confini più lontani, una gigantesca riserva di corpi ghiacciati. Tutto questo è il **sistema solare**.

I corpi del sistema solare

La figura 4 mostra il sistema solare così come lo conosciamo oggi. I protagonisti sono gli otto pianeti: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno.

Tutti hanno una forma più o meno sferica e compiono due movimenti fondamentali: ruotano su se stessi e orbitano attorno al Sole. Il primo è il **moto di rotazione**, il secondo il **moto di rivoluzione**.



▲ **Figura 4**
Il sistema solare (le dimensioni non sono in scala).

Intorno a molti pianeti orbitano poi i **satelliti naturali**. La Luna, per esempio, accompagna la Terra nel suo viaggio attorno al Sole.

Il sistema solare è popolato anche da una quantità enorme di corpi più piccoli. Gli **asteroidi** sono oggetti rocciosi o metallici che orbitano attorno al Sole. I **meteoroidi** sono frammenti ancora più piccoli. Quando uno di questi entra nell'atmosfera terrestre e si riscalda fino a diventare luminoso, lo spettacolo che vediamo in cielo si chiama **meteora**.

E poi ci sono le comete. Lontano, ai margini del sistema solare, esiste una sterminata popolazione di corpi ricchi di ghiacci e polveri. Quando alcuni di questi oggetti si avvicinano al Sole, il calore può trasformarli in quelle spettacolari "stelle con la coda" che chiamiamo comete.

Pianeti terrestri e pianeti gioviani

Gli otto pianeti non sono tutti uguali. I quattro più vicini al Sole, cioè Mercurio, Venere, Terra e Marte, sono i **pianeti terrestri**: relativamente piccoli, rocciosi e metallici.

Gli altri quattro, cioè Giove, Saturno, Urano e Nettuno, sono molto più grandi e vengono chiamati **pianeti gioviani**. Sono mondi dominati da gas e ghiacci, con atmosfere molto più spesse e numerosi satelliti.

Tra i due gruppi c'è quindi una differenza fondamentale: da una parte abbiamo mondi solidi, dall'altra giganti avvolti da atmosfere profonde.

Plutone, per molto tempo considerato il nono pianeta, oggi appartiene a una categoria diversa: è un **pianeta nano**, insieme ad altri piccoli mondi delle regioni più esterne del sistema solare.

Mercurio, Venere, Terra e Marte sono mondi solidi, costruiti soprattutto con rocce e metalli. Sono piccoli rispetto ai giganti che li seguono e hanno pochi satelliti: la Terra ne ha uno, Marte due, mentre Mercurio e Venere non ne hanno nessuno.

La loro vicinanza al Sole e le dimensioni relativamente ridotte rendono inoltre difficile trattenere le atmosfere più leggere. Mercurio, il più piccolo e più vicino al Sole, ne è praticamente privo. Venere, Terra e Marte hanno invece atmosfere molto diverse tra loro.

Venere è il pianeta più luminoso del cielo notturno dopo la Luna. È anche un mondo estremamente caldo, avvolto da una spessa atmosfera ricca di anidride carbonica.

La Terra non ha bisogno di presentazioni, ma Marte è forse il suo vicino più famoso. Il suo caratteristico colore rossastro gli è valso il soprannome di "pianeta rosso". Anche Marte ha stagioni e, vicino ai poli, grandi calotte di ghiaccio.

Se i pianeti terrestri sono mondi rocciosi, i pianeti gioviani sembrano appartenere a un'altra famiglia.

Giove, Saturno, Urano e Nettuno sono enormi rispetto alla Terra e sono composti soprattutto da gas e materiali ghiacciati. Le loro basse temperature e la grande massa permettono loro di trattenere atmosfere molto estese e dense. Inoltre ruotano rapidamente e hanno numerosi satelliti.

Giove è il gigante del sistema solare: nessun altro pianeta è grande quanto lui. Sotto le sue nuvole non c'è una superficie solida simile a quella terrestre. La materia diventa sempre più densa scendendo verso l'interno, fino a raggiungere condizioni estreme in cui l'idrogeno assume forme insolite.

Intorno a Giove orbitano molti satelliti. I quattro più grandi (Io, Europa, Ganimede e Callisto) furono osservati per la prima volta da Galileo nel 1610 e furono una delle prime grandi sorprese portate dal telescopio.

Saturno è quasi altrettanto spettacolare. È leggermente più piccolo di Giove, ma ha qualcosa che lo rende immediatamente riconoscibile: un immenso sistema di anelli formato soprattutto da ghiaccio e polveri.

Che cosa muove i pianeti?

A questo punto resta una domanda fondamentale: che cosa tiene i pianeti sulle loro orbite?

La risposta arrivò con Isaac Newton alla fine del Seicento. La forza che fa cadere una mela verso il suolo è la stessa che tiene la Luna in orbita attorno alla Terra e i pianeti attorno al Sole: la **gravità**.

Per capirlo, Newton immaginò un esperimento che non aveva bisogno di essere realmente costruito.

Supponiamo di trovarci in cima a una montagna con un cannone. Se spariamo un proiettile lentamente, questo ricade a terra poco lontano. Se aumentiamo la velocità, il proiettile arriva più lontano. Ma che cosa succederebbe se potessimo aumentarla abbastanza?

Il proiettile cadrebbe comunque verso la Terra, ma la superficie terrestre, curva sotto di lui, si allontanerebbe altrettanto velocemente. Il risultato sarebbe sorprendente: il proiettile continuerebbe a cadere senza mai raggiungere il suolo. Sarebbe entrato in orbita. È proprio questo, in sostanza, quello che accade a un satellite artificiale.

Anche la Luna sta continuamente "cadendo" verso la Terra. La sua velocità laterale, però, fa sì che mentre cade la superficie terrestre si incurvi sotto di lei. La Luna continua così a girare attorno al nostro pianeta.

Se la gravità sparisse, la Luna non continuerebbe a orbitare: proseguirebbe in linea retta, lungo la direzione tangente alla sua orbita, allontanandosi nello spazio.

Newton ebbe così un'intuizione rivoluzionaria: la stessa forza governa la caduta degli oggetti sulla Terra e il movimento dei corpi celesti. Terra e cielo, improvvisamente, obbedivano alla stessa legge.

Come si è formato il sistema solare?

Il sistema solare non è sempre esistito nella forma che conosciamo oggi. Circa 4,6 miliardi di anni fa, al posto dei pianeti c'era una gigantesca nube di gas e polvere.

La gravità iniziò lentamente a far collassare questa nube. Mentre il materiale si concentrava, la nube cominciò a ruotare sempre più rapidamente e a schiacciarsi in un disco. Al centro nacque il Sole. Attorno a lui, dai materiali rimasti, cominciarono a formarsi i pianeti e gli altri corpi del sistema solare.

Non fu un processo tranquillo. Il giovane sistema solare era un luogo caotico, pieno di piccoli corpi che si scontravano continuamente. Rocce e frammenti si urtavano, si rompevano e talvolta si aggregavano formando oggetti sempre più grandi.

La Luna porta ancora oggi le cicatrici di quell'epoca: la sua superficie è disseminata di crateri prodotti da antichi impatti.

Con il passare del tempo, il caos diminuì. Le collisioni divennero meno frequenti e il sistema solare assunse progressivamente l'architettura che conosciamo.

Oggi, dopo miliardi di anni, i pianeti continuano il loro viaggio attorno al Sole. Sembra tutto tranquillo, ma quella tranquillità è il risultato di una storia lunghissima e violenta: il sistema solare che vediamo è quello che è rimasto dopo miliardi di anni di collisioni, gravità e trasformazioni.

Domande e risposte

Perché Mercurio è così caldo e così freddo?

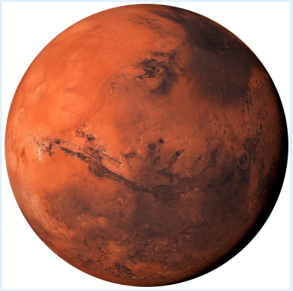
Mercurio ha un'atmosfera quasi inesistente, quindi non riesce a trattenere e distribuire il calore. Così, al Sole raggiunge circa 430 °C, mentre nella notte può scendere fino a −180 °C.

Perché Venere è più caldo di Mercurio?

Venere è più lontano dal Sole, ma possiede un'atmosfera densissima, ricca di anidride carbonica. Il suo potentissimo effetto serra intrappola il calore e porta la superficie a circa 465 °C.

Perché Marte è rosso?

La superficie di Mart econtiene molto ferro. Il ferro si è ossidato, formando una specie di ruggine che, mescolata alla polvere, dà a Marte il suo caratteristico colore rosso.



▲ **Figura 5**
Marte.

Qual è il pianeta più simile alla Terra?

Nel Sistema solare, Venere è simile alla Terra per dimensioni e composizione, ma le sue condizioni sono infernali. Tra gli esopianeti ne conosciamo diversi potenzialmente simili alla Terra, ma una vera seconda Terra non l'abbiamo ancora trovata.

Potremmo vivere su Marte?

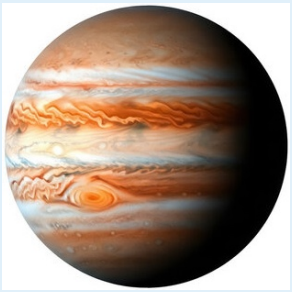
Oggi no: Marte è troppo freddo, ha un'atmosfera molto sottile e non offre protezione sufficiente dalle radiazioni. In futuro, però, potremmo costruire habitat artificiali capaci di proteggerci.

Perché Giove è così grande?

Giove si è formato in una regione del Sistema solare ricca di gas e ghiacci. La sua enorme gravità gli ha permesso di catturare sempre più materia, fino a diventare il gigante che conosciamo.

Perché Giove ha una Grande Macchia Rossa?

È una gigantesca tempesta che infuria nell'atmosfera di Giove da almeno alcuni secoli. È così grande che potrebbe contenere al suo interno la Terra (**figura 6**).



▲ **Figura 6**
Giove con la sua Grande Macchia Rossa.

È vero che Saturno galleggerebbe nell'acqua?

Nonostante le sue enormi dimensioni, Saturno è poco denso: la sua densità media è inferiore a quella dell'acqua. Se esistesse una vasca abbastanza grande, quindi, Saturno galleggerebbe (**figura 7**).



▲ **Figura 7**
Saturno.

Perché Urano è "sdraiato"?

Il suo asse di rotazione è inclinato di circa 98 gradi, probabilmente a causa di un gigantesco impatto avvenuto miliardi di anni fa. Per questo Urano sembra rotolare lungo la sua orbita.

Perché Plutone non è più considerato un pianeta?

Nel 2006 è cambiata la definizione di pianeta. Plutone è abbastanza grande da essere quasi sferico, ma non ha ripulito la sua orbita dagli altri corpi: per questo oggi è classificato come pianeta nano.

Esistono pianeti vagabondi?

Sì: sono pianeti che non orbitano attorno a nessuna stella. Probabilmente alcuni sono stati espulsi dai loro sistemi planetari e ora vagano solitari nello spazio interstellare.

Come facciamo a scoprire pianeti intorno ad altre stelle?

Spesso aspettiamo che un pianeta passi davanti alla sua stella. Durante il transito, la stella diventa impercettibilmente più debole: misurando questa variazione possiamo scoprire il pianeta e stimarne le dimensioni.

Esiste una canzone sulle leggi di Keplero?

Sì. In Italia ci ha pensato il cantautore ed ex professore Lorenzo Baglioni, che ha pubblicato il brano *Le leggi di Keplero*: un tormentone pop che spiega le tre leggi a ritmo di musica.

Perché Saturno ha degli anelli?

Gli anelli di Saturno sono formati da frammenti di ghiaccio, polveri e rocce che orbitano intorno al pianeta. Gli scienziati pensano che questi materiali derivino dalla distruzione di antiche lune, comete o altri corpi celesti, frantumati dalla forza gravitazionale di Saturno.

Esploriamo il Sistema solare

I pianeti nel cielo

Osserva il cielo in una sera limpida e cerca un punto luminoso che non sembri tremolare come le stelle. Ripeti l'osservazione in sere diverse e segna la sua posizione rispetto alle stelle vicine.

I pianeti sono così luminosi da poter essere facilmente visibili a occhio nudo. Rispetto alle stelle, però, cambiano lentamente posizione nel cielo e per questo nell'antichità furono chiamati **stelle erranti**.

Un pianeta cambia posizione

Scegli un pianeta visibile e osserva la sua posizione rispetto a una stella vicina. Ripeti l'osservazione dopo alcuni giorni e confronta le due posizioni.

Il pianeta non rimane sempre nello stesso punto rispetto alle stelle lontane. Questo accade perché anche la Terra e gli altri pianeti si muovono continuamente lungo le loro orbite attorno al Sole.

Pianeti e stelle

Osserva insieme una stella luminosa e un pianeta visibile nel cielo. Confronta il loro aspetto e, se possibile, osserva entrambi con un piccolo telescopio o un binocolo.

A occhio nudo, un pianeta può sembrare quasi identico a una stella. La differenza principale è che i pianeti, osservati con un telescopio, mostrano un piccolo disco, mentre le stelle rimangono praticamente puntiformi.

Il moto retrogrado

Segui per alcune settimane la posizione di un pianeta rispetto alle stelle e annotala su una mappa del cielo. Confronta le posizioni osservate nel tempo.

In alcuni periodi un pianeta sembra rallentare, fermarsi e poi muoversi temporaneamente nella direzione opposta rispetto alle stelle. Questo **moto retrogrado** è apparente e dipende dalla combinazione dei moti della Terra e del pianeta lungo le loro orbite.

Venere cambia forma

Quando Venere è visibile e abbastanza alta nel cielo, osservala con un piccolo telescopio. Ripeti l'osservazione in momenti diversi e confronta la forma apparente del pianeta.

Venere mostra diverse **fasi**, proprio come la Luna. Questo accade perché Venere orbita più vicino al Sole della Terra e, durante il suo percorso, cambia la posizione da cui osserviamo la sua parte illuminata.

Mercurio vicino al Sole

Cerca Mercurio nei periodi dell'anno in cui è osservabile, poco prima dell'alba o poco dopo il tramonto. Osserva sempre il pianeta senza guardare direttamente verso il Sole.

Mercurio appare sempre vicino al Sole perché la sua orbita si trova all'interno di quella terrestre. Per questo non è mai visibile per tutta la notte, ma soltanto in alcuni periodi vicino all'alba o al tramonto.

I pianeti seguono una fascia del cielo

Osserva la posizione di diversi pianeti e confrontala con quella delle costellazio-

ni. Segna su una mappa del cielo la loro posizione.

I pianeti appaiono sempre in una particolare fascia del cielo, vicina al percorso apparente seguito dal Sole. Questo accade perché le orbite dei pianeti sono quasi tutte disposte sullo stesso piano.

Un pianeta può essere visibile senza telescopio

Controlla quali pianeti sono visibili nel cielo durante il periodo dell'osservazione. Prova a individuarli prima a occhio nudo e poi, se possibile, con un binocolo o un telescopio.

Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno possono essere osservati a occhio nudo in condizioni favorevoli. Urano è molto più difficile da vedere e Nettuno richiede invece uno strumento.

Giove e le sue lune

Osserva Giove con un piccolo telescopio o anche con un buon binocolo. Cerca i piccoli punti luminosi disposti vicino al pianeta e ripeti l'osservazione dopo qualche ora o nei giorni successivi.

Quei punti sono alcune delle lune di Giove. La loro posizione cambia rapidamente perché orbitano attorno al pianeta: osservandole possiamo quindi vedere direttamente un piccolo sistema in movimento.

Esercizi

Sistema solare

1 Indica la risposta corretta.

a. La seconda legge di Keplero mette in relazione:

- A aree e tempi
- B tempi e aree
- C tempi e distanze
- D aree e distanze

b. Il perielio è:

- A il punto dell'orbita di un pianeta più lontano dal Sole
- B il punto dell'orbita di un pianeta più vicino al Sole
- C il punto dell'orbita in cui il pianeta è equidistante dal Sole
- D nessuna risposta è accettabile

c. La prima legge di Keplero afferma che:

- A I pianeti si muovono di moto circolare uniforme
- B Il Sole si trova al centro delle orbite
- C I pianeti si muovono su orbite ellittiche
- D I pianeti mantengono sempre la stessa distanza dal Sole

d. Dalla seconda legge di Keplero si deduce che la velocità con la quale ciascun pianeta percorre la sua orbita è:

- A sempre uguale
- B minore in inverno
- C maggiore in perielio
- D maggiore in afelio

e. Quale pianeta gira più velocemente attorno al Sole?

- A Terra
- B Saturno
- C Plutone
- D Mercurio

f. La prima legge di Keplero riguarda:

- A il moto di rivoluzione terrestre
- B il moto di rotazione terrestre
- C la forma della Terra
- D l'asse terrestre

g. Un extraterrestre che osservasse il nostro Sistema solare da una galassia molto lontana, con un potente telescopio, sarebbe probabilmente in grado di vedere:

- A il Sole, la Terra e tutti i pianeti
- B probabilmente soltanto il Sole
- C nulla
- D soltanto Giove

[due risposte A, una B, due C e due D]

2 **Vero o falso?**

		V	F
a.	Cassiopea è una costellazione che appare in cielo come una W.	V	F
b.	Durante le reazioni di fusione nucleare i nuclei di idrogeno si trasformano in nuclei di elio.	V	F
c.	Giove è il pianeta più grande del Sistema solare.	V	F
d.	Gli elementi presenti in quantità maggiore nelle stelle sono l'idrogeno e l'ossigeno.	V	F
e.	Il Sole si trova al centro della Via Lattea.	V	F

[tre affermazioni vere e due false]

3 **Vero o falso?**

		V	F
a.	La stella Polare ci appare nella stessa posizione da qualunque regione della Terra noi la osserviamo.	V	F
b.	La Via Lattea è la nostra galassia.	V	F
c.	La Via Lattea ha un suo moto di rotazione.	V	F
d.	Le stelle nascono dalla contrazione di nubi di gas.	V	F
e.	L'universo è formato da poche galassie.	V	F

[tre affermazioni vere e due false]

Evoluzione stellare

4 Indica la risposta corretta.

a. Finito l'idrogeno del nucleo la stella andrà incontro a:

- A contrazione gravitazionale
- B esplosione di una supernova
- C formazione della gigante rossa
- D espansione legata alla fusione nucleare dell'idrogeno

b. Le supernove sono eventi legati a:

- A formazione di stelle di grande dimensione
- B morte di stelle di grande dimensione
- C vita attiva di stelle di grande massa
- D fusione nucleare dell'idrogeno in elio

c. L'enorme peso di una nana bianca è bilanciato da:

- A pressione della contrazione gravitazionale
- B pressione degli elettroni degeneri
- C pressione dei neutroni degeneri
- D pressione della nebulosa

d. Nelle stelle la forza di gravità è bilanciata da:

- A forza centrifuga
- B forza di compressione dei gas
- C pressione degli elettroni degeneri
- D forze di espansione generate dalle fusioni nucleari

e. La formazione degli atomi più pesanti del ferro avviene:

- A durante la morte delle stelle di grandi dimensioni
- B durante le reazioni di fusione nucleare delle stelle
- C nelle nane bianche
- D nei momenti iniziali del *Big Bang*

f. Le caratteristiche di una stella di neutroni sono:

- A diametro: 100 km, densità: 10 kg/cm^3
- B diametro: 1000 km, densità: 100000 kg/cm^3
- C diametro: 100 000 km, densità: 1 milione di t/cm^3
- D diametro: 10 km, densità: 1 miliardo di t/cm^3

g. Una stella con massa 10 volte quella del Sole:

- A avrà una vita media 10 volte maggiore del Sole
- B vivrà meno del Sole
- C avrà più o meno la longevità del Sole
- D vivrà di più del Sole

[due risposte A, due B, una C e due D]

5 Indica la risposta corretta.

a. La forza che trasforma le nebulose in stelle è:

- A la forza di gravità
- B la forza di espansione gravitazionale
- C la forza centrifuga
- D la forza di accelerazione

b. La nana bianca può avere un diametro di:

- A alcuni metri
- B alcuni chilometri
- C alcuni anni luce
- D alcune decine di migliaia di chilometri

c. Perché nelle stelle più grandi la fusione nucleare è più veloce?

- A la temperatura del nucleo è più elevata
- B sono presenti atomi più pesanti
- C sono presenti isotopi
- D sono presenti atomi più leggeri

d. Per formare una stella occorre una massa minima di:

- A 1 massa solare
- B 0,08 masse solari
- C 10 masse solari
- D 100 masse solari

e. Se una stella morente ha una massa pari a 200 masse solari si formerà:

A una nana nera
B una gigante rossa
C un buco nero
D una stella di neutroni

f. La nana bianca si forma dalla morte di stelle aventi massa:

A maggiore di 15 masse solari
B minore di 8 masse solari
C maggiore di 10 masse solari
D compresa tra 15 e 30 masse solari

g. Al centro di una supernova può formarsi:

A una stella di dimensioni più piccole
B una stella simile al Sole
C una stella di neutroni
D una nana bianca

[due risposte A, una B, tre C e una D]

6 Indica la risposta corretta.

a. La fusione nucleare degli atomi è difficile da realizzare perché:

A i protoni tendono a respingersi tra loro
B i neutroni ostacolano l'unione dei nuclei atomici
C gli elettroni si respingono reciprocamente
D la forza di gravità è troppo elevata

b. Quando si uniscono quattro atomi di idrogeno per formarne uno di elio, la massa:

A aumenta
B diminuisce
C rimane uguale
D si dimezza

c. L'enorme peso di una stella di neutroni è bilanciato da:

A pressione della contrazione gravitazionale
B pressione degli elettroni degeneri
C pressione dei neutroni
D pressione della nebulosa

d. La nana bianca si trasformerà nel corso del tempo in:

A stella di neutroni
B buco nero
C supernova
D nana nera

e. La stella di neutroni può avere un diametro di:

A alcuni metri
B alcuni chilometri
C alcuni anni luce
D alcune decine di migliaia di chilometri

f. Gli atomi più pesanti del carbonio si sono formati:

A nel nucleo delle stelle più piccole
B nelle stelle di neutroni
C nel nucleo delle stelle più grandi
D nelle nane bianche

g. La fusione nucleare nel Sole terminerà quando:

A sarà stato consumato tutto l'idrogeno del Sole
B si sarà trasformato in elio l'idrogeno del nucleo
C saranno passati 5 milioni di anni
D le temperature avranno raggiunto il valore di 100 000 °C

[due risposte A, tre B, una C e una D]

7 Indica la risposta corretta.

a. La pulsar può essere l'espressione di:

A una stella di neutroni
B un buco nero
C una stella di grandi dimensioni
D una nana nera

b. Il primo evento di una stella che ha finito l'idrogeno del nucleo è:

- A l'esplosione di una supernova
- B la contrazione gravitazionale
- C la formazione della gigante rossa
- D l'espansione legata alla fusione nucleare dell'idrogeno

c. Il buco nero:

- A si forma col raffreddamento di una nana bianca
- B si forma dalla morte di stelle come il Sole
- C si forma dalla morte di stelle con massa maggiore di 25 masse solari
- D non si può prevederne la formazione in base alle attuali leggi scientifiche

d. Gli atomi più pesanti dell'elio si sono formati:

- A con il *Big Bang*
- B con le fusioni nucleari avvenute nelle stelle
- C con l'espansione dell'universo
- D con le fissioni nucleari delle stelle

e. Per avviare la fusione nucleare dell'elio servono temperature di:

- A 10 milioni di gradi
- B 20 milioni di gradi
- C 200 milioni di gradi
- D 100 milioni di gradi

f. Gli atomi di idrogeno ed elio si sono formati:

- A all'inizio dell'universo
- B nel nucleo delle stelle
- C nelle supernove
- D nelle stelle di neutroni

g. Dopo aver attraversato lo stadio evolutivo di gigante rossa, il Sole diventerà:

- A una nana bianca
- B una supernova
- C un buco nero
- D una stella di neutroni

[tre risposte A, due B, una C e una D]

8 Indica la risposta corretta.

a. La forza che trasforma le nebulose in stelle è:

- A la forza di gravità
- B la forza di espansione
- C la forza centrifuga
- D la forza di accelerazione

b. Nonostante l'enorme valore della forza di gravità, i gas che formano il Sole non collassano nel nucleo perché:

- A i gas non possono in alcun caso addensarsi
- B l'energia termonucleare prodotta nel nucleo tende a far espandere i gas
- C l'attrazione dei pianeti che ruotano intorno al Sole contrasta l'attrazione del Sole stesso
- D si ha la trasformazione dell'idrogeno, più leggero, in elio, più pesante

c. Gli atomi più pesanti dell'elio si sono formati con:

- A il *Big Bang*
- B l'espansione dell'universo
- C le fusioni nucleari nelle stelle
- D le fissioni nucleari nelle stelle

d. La Terra non è diventata una stella perché:

- A era costituita da atomi diversi dal Sole
- B si è formata prima del Sole
- C è molto solida al suo interno
- D ha una massa troppo piccola

e. Le prime particelle apparse nell'universo sono:

- A elettroni
- B atomi
- C protoni
- D neutroni

f. La nebulosa planetaria si origina da:

- A scoppio del *Big Bang*
- B gigante rossa
- C gas dell'atmosfera che ruota attorno a un pianeta
- D buco nero

g. Di quale colore sono le stelle più calde?

- A rosse
- B azzurre
- C bianche
- D gialle

[due risposte A, due B, due C e una D]

9 **Vero o falso?**

a. Un buco nero è una regione di spazio dell'universo priva di materia. V F

b. Una gigante azzurra è una stella molto calda e molto luminosa. V F

c. Una nana bianca è una stella piccola, poco luminosa, al termine del suo ciclo evolutivo. V F

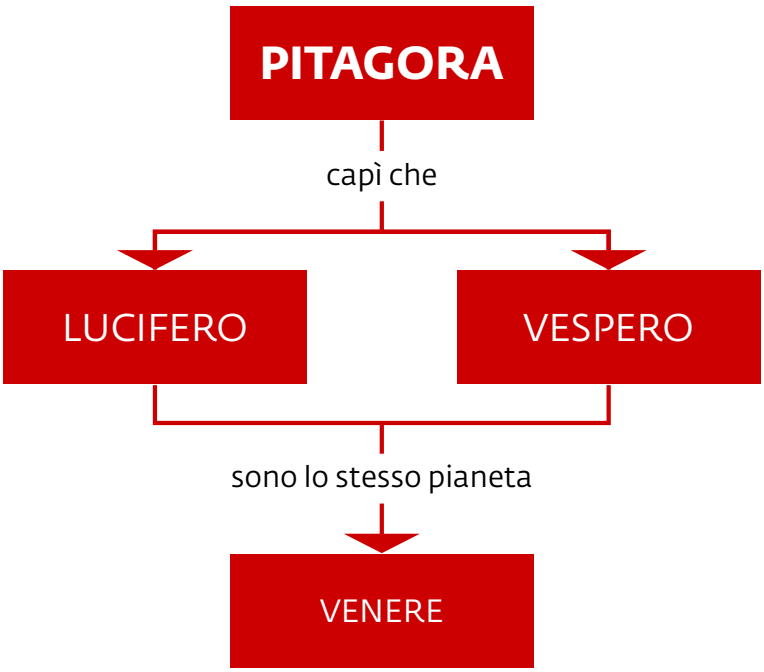
d. Una stella di neutroni è una giovane stella appena nata. V F

e. Una stella in formazione viene chiamata supernova. V F

[due affermazioni vere e tre false]

IN SINTESI

I PIANETI



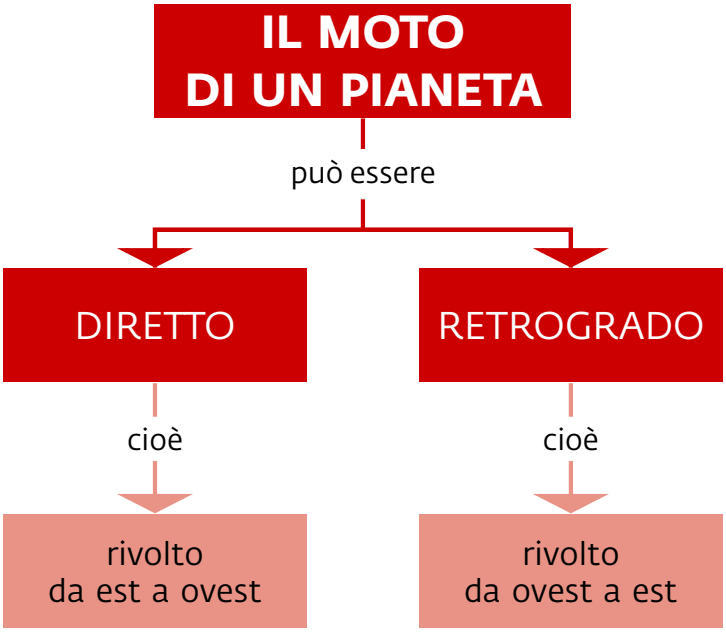
IN SINTESI

I PIANETI



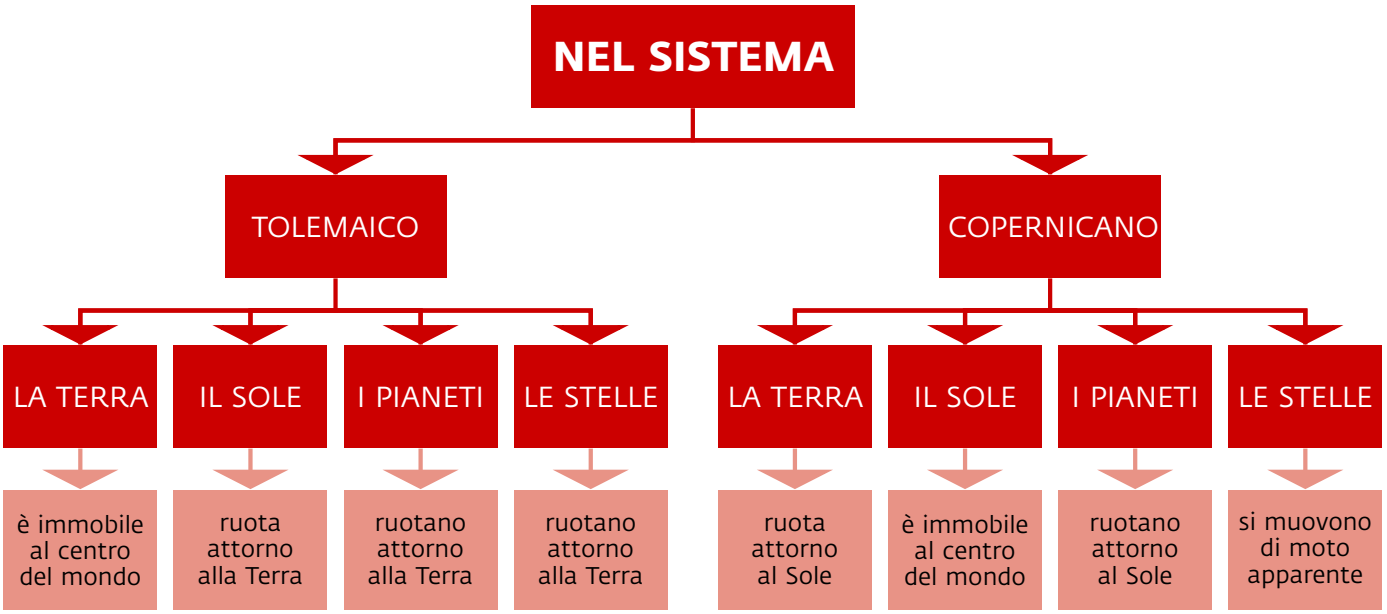
IN SINTESI

I PIANETI



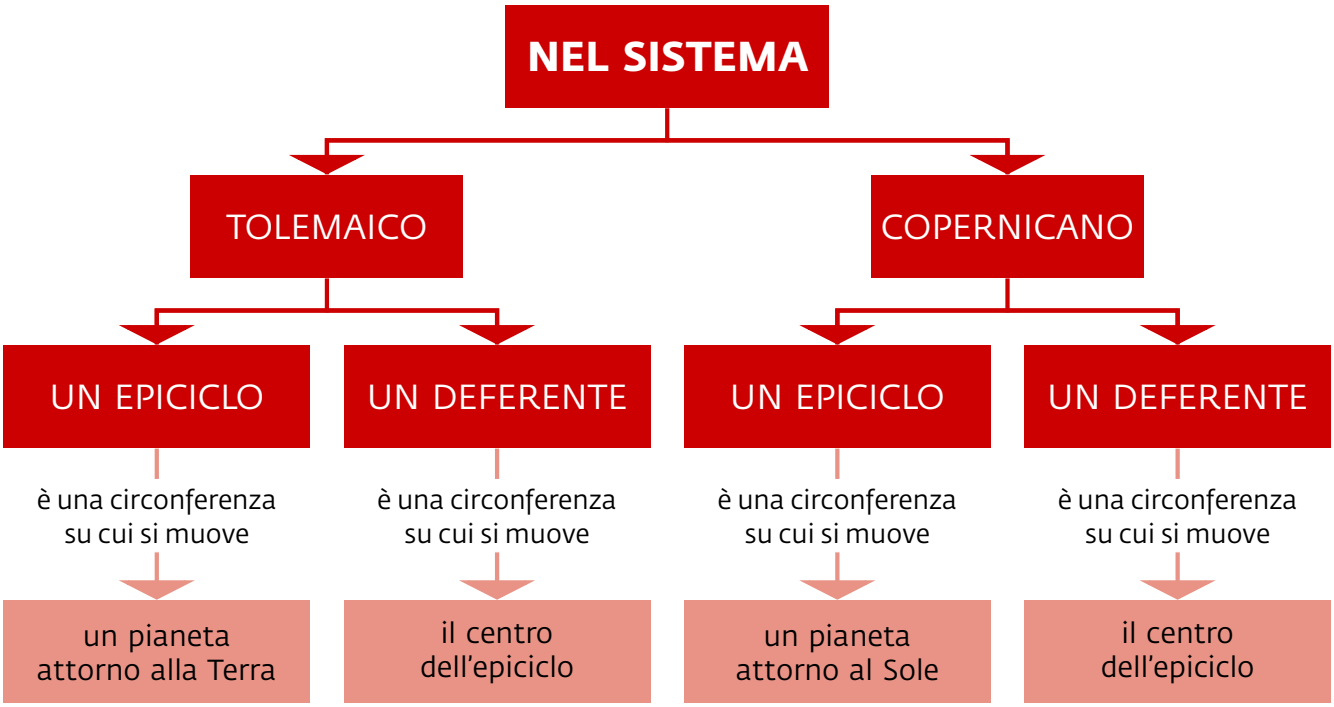
IN SINTESI

I PIANETI



IN SINTESI

I PIANETI



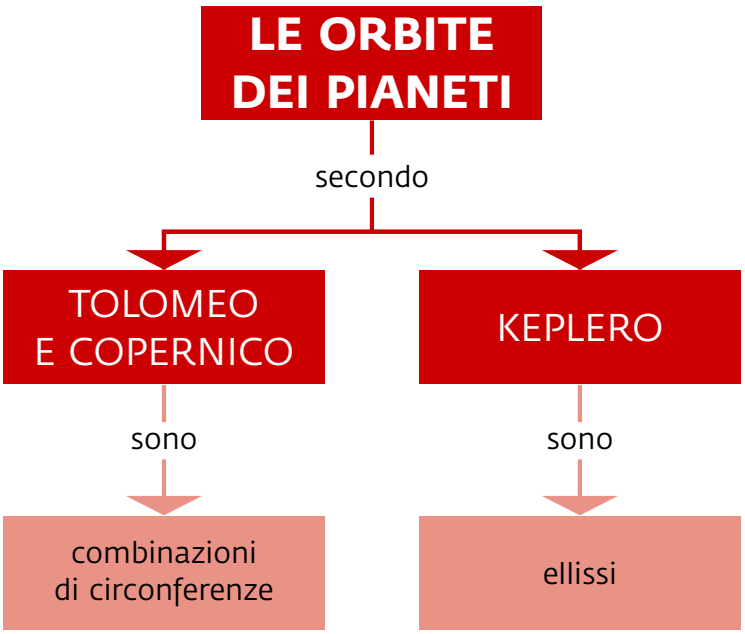
IN SINTESI

I PIANETI



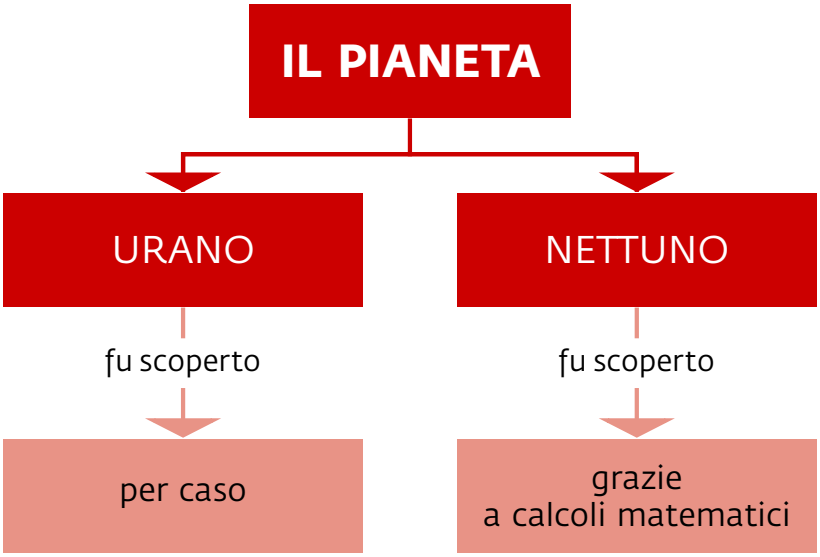
IN SINTESI

I PIANETI



IN SINTESI

I PIANETI



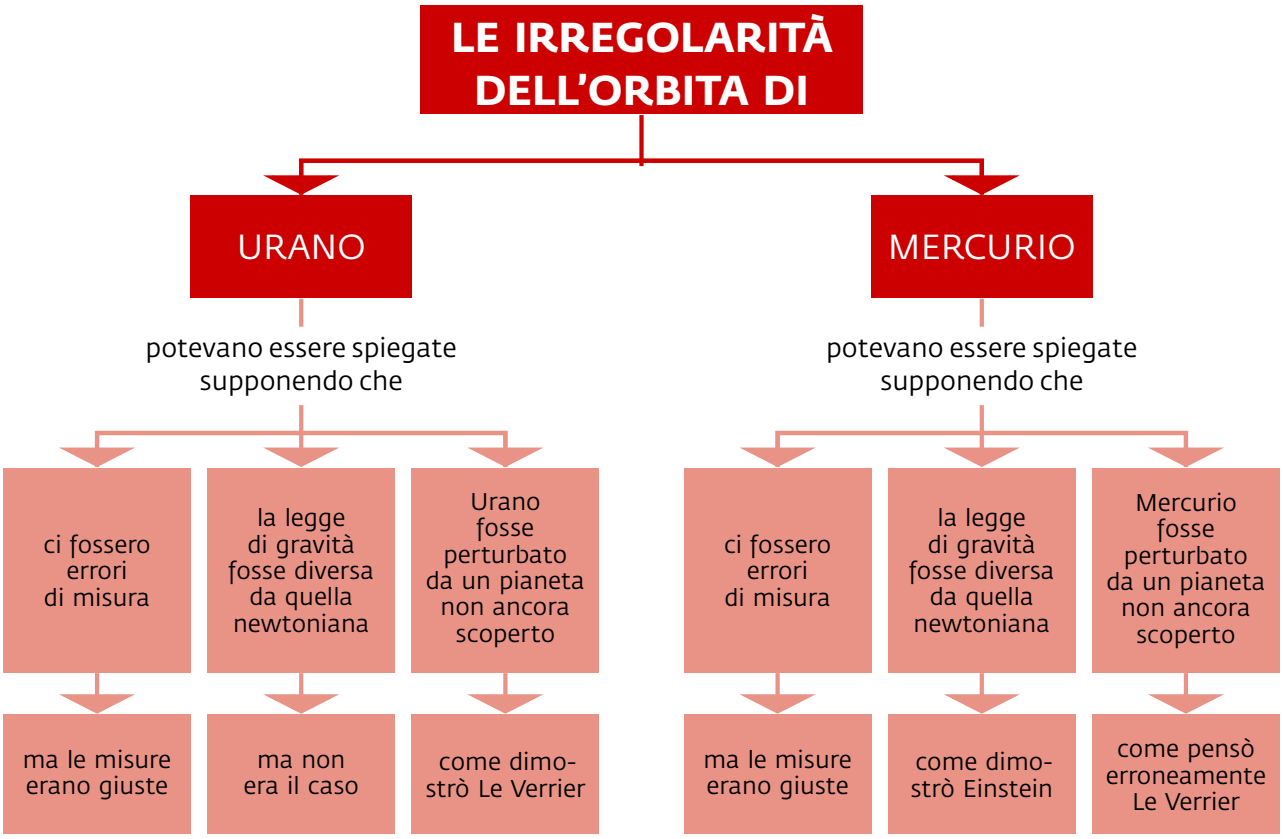
IN SINTESI

I PIANETI



IN SINTESI

I PIANETI



4 Le stelle

Che cosa sono davvero le stelle? Perché brillano? E come cambiano nel corso della loro vita?

In questo capitolo scopriremo che cosa sono le stelle, quali sono le loro principali caratteristiche e come nascono, vivono e muoiono. Impareremo anche a riconoscere le costellazioni e a capire come abbiamo imparato a leggere il cielo stellato.

1 Il cielo stellato

Quando arriva la notte e il cielo è limpido, sopra di noi compare uno spettacolo che ha accompagnato l'umanità fin dalle sue origini: il cielo stellato. A occhio nudo, in condizioni favorevoli, possiamo distinguere alcune migliaia di stelle. In realtà, quelle che vediamo sono solo una piccolissima parte delle stelle presenti nella nostra Galassia.



(a) Una lunga esposizione trasforma il cielo in un insieme di scie luminose.



(b) Le scie mostrano il movimento apparente delle stelle nel cielo.

▲ **Figura 1**
Le stelle sembrano attraversare il cielo durante la notte, ma è la Terra che ruota su se stessa.

Le stelle ci appaiono come punti luminosi distribuiti sulla volta celeste. Sembra quasi che siano incastonate su un'enorme sfera che ruota lentamente sopra le nostre teste. Ma è un'illusione dovuta al movimento della Terra. Il nostro pianeta ruota infatti attorno al proprio asse, da ovest verso est, e per questo le stelle ci sembrano muoversi nel cielo da est verso ovest.

Se osserviamo una fotografia del cielo ottenuta con una lunga esposizione, questo movimento diventa evidente: le stelle non appaiono più come punti, ma come lunghe scie luminose. Alcune sembrano ruotare attorno a un punto quasi immobile, vicino alla **Stella Polare**. È la direzione verso cui punta, quasi, l'asse di rotazione terrestre (figura 1). Ma che cosa sono, in realtà, quelle luci?

Una stella è una enorme sfera di gas molto caldo che produce energia al proprio interno e la irradia nello spazio sotto forma di luce e di altre radiazioni. Il Sole, che ci

sembra così diverso dalle altre stelle perché è molto più vicino, è in realtà una stella come le altre.

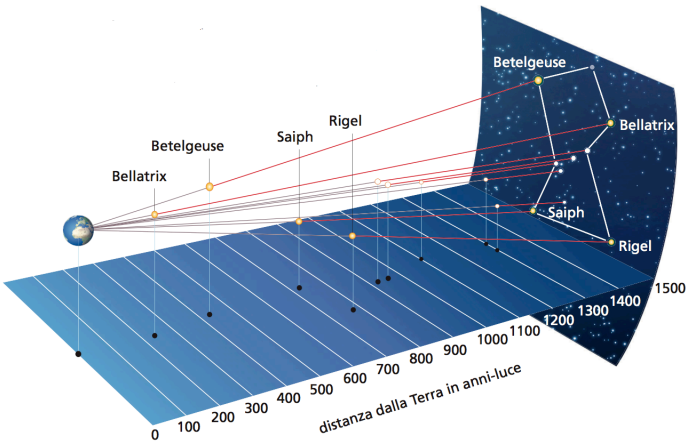
Le stelle, però, non sono tutte uguali. Possono essere molto più grandi o molto più piccole del Sole, più calde o più fredde, più luminose o più deboli. Alcune vivono per miliardi di anni, altre consumano rapidamente il proprio combustibile e hanno una vita molto più breve.

Per capire davvero che cosa distingue una stella dall'altra dobbiamo quindi guardare più da vicino le loro caratteristiche e, soprattutto, seguire la loro lunga storia: dalla nascita alla morte.

Prima di occuparci delle proprietà delle stelle, però, vale la pena fermarsi ancora un momento a osservare come gli uomini hanno imparato a orientarsi e a riconoscere le diverse regioni del cielo.

Le costellazioni

Fin dall'antichità gli uomini hanno cercato di riconoscere nel cielo figure e forme familiari. Unendo idealmente alcune stelle, hanno immaginato animali, eroi, oggetti e personaggi mitologici. Sono nate così le costellazioni.



▲ **Figura 2**
Come ci appare la costellazione di Orione e come sono realmente disposte nello spazio le stelle che la compongono.

Le stelle che formano una costellazione, però, non sono necessariamente vicine tra loro. Possono trovarsi a distanze molto diverse dalla Terra e anche essere separate da enormi quantità di spazio. È la nostra prospettiva a farle apparire vicine sulla volta celeste. La figura 2 mostra bene questo effetto: quello che dalla Terra sembra una figura ben definita, nello spazio perde completamente la sua forma.

Le costellazioni sono comunque molto utili. Sono una sorta di **mappa del cielo**: permettono di riconoscere facilmente le diverse regioni della volta celeste e di trovare altre stelle e oggetti astronomici. Oggi gli astronomi dividono il cielo in 88 costellazioni, che servono come riferimento per indicare la posizione degli oggetti celesti.

Alcune costellazioni sono molto importanti anche per orientarsi. Nell'emisfero settentrionale, per esempio, la **Stella Polare** indica quasi esattamente la direzione del nord. È una stella della costellazione dell'Orsa Minore e può essere individuata facilmente partendo dalle stelle del Grande Carro, parte ben riconoscibile dell'Orsa Maggiore.

Anche il Sole, nel corso dell'anno, sembra spostarsi lentamente rispetto alle stelle. In realtà è la Terra che, mentre compie il suo moto attorno al Sole, cambia continuamente la direzione in cui osserviamo lo sfondo stellato. Il percorso apparente del Sole sulla volta celeste prende il nome di **eclittica**.

Lungo questa fascia del cielo si trovano alcune delle costellazioni più conosciute: sono quelle che formano lo **zodiaco**. I loro nomi ci sono familiari, ma il loro significato astronomico è molto semplice: indicano le regioni del cielo attraversate apparentemente dal Sole durante l'anno. Le costellazioni, dunque, non sono famiglie di stelle legate tra loro nello spazio. Sono piuttosto il modo in cui noi, osservatori sulla Terra, abbiamo imparato a **leggere e organizzare il cielo**. Dietro quelle figure familiari, però, si nasconde un universo molto più grande: stelle lontanissime tra loro, galassie, nebulose e altri mondi che solo l'astronomia moderna ci ha permesso di conoscere.

2 Le caratteristiche di una stella

Una stella, a prima vista, è solo un puntino luminoso nel cielo. Eppure, osservando attentamente quella piccola luce possiamo scoprire moltissime cose: quanto è lontana, quanto è luminosa, quanto è calda, di che cosa è fatta e quanto è grande.

Il fatto sorprendente è che non possiamo avvicinarci alla maggior parte delle stelle, né tantomeno andare a misurarle direttamente. Tutto quello che sappiamo arriva fino a noi attraverso la loro luce.

Quanto è lontana?

La prima informazione che ci interessa è la distanza. Le stelle sono così lontane che usare i chilometri diventerebbe rapidamente scomodo. Per questo in astronomia si utilizzano unità particolari.

Per indicare le distanze all'interno del Sistema Solare si usa spesso l'**unità astronomica**, cioè la distanza media tra la Terra e il Sole: circa 150 milioni di chilometri. Quando parliamo di stelle, però, ci servono unità molto più grandi. Una di queste è l'**anno-luce**: la distanza percorsa dalla luce in un anno, circa $9{,}46 \cdot 10^{12}$ km.

L'anno-luce è anche un modo suggestivo per ricordarci che osservare il cielo significa guardare nel passato. Se una stella si trova a 100 anni-luce da noi, la luce che vediamo oggi è partita da quella stella circa 100 anni fa.

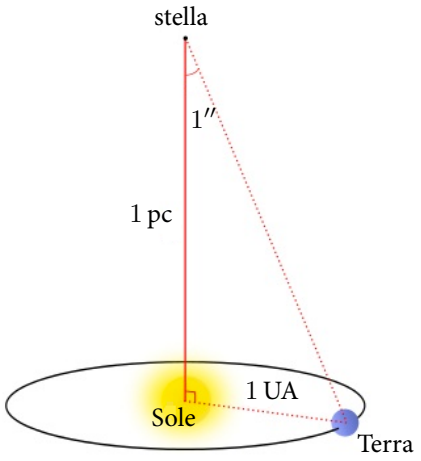
Per capire come possiamo misurare la distanza di una stella immaginiamo di tenere un dito davanti al viso. Se chiudiamo prima un occhio e poi l'altro, il dito sembra spostarsi rispetto allo sfondo. Più il dito è vicino, più lo spostamento apparente è evidente.

Con le stelle accade qualcosa di simile. Al posto dei nostri occhi possiamo usare due posizioni diverse della Terra lungo la sua orbita intorno al Sole. Osservando una stella a distanza di sei mesi, la vediamo da due punti diversi e possiamo accorgerci di un piccolissimo spostamento rispetto alle stelle molto più lontane. Questo fenomeno si chiama **parallasse**.

La parallasse delle stelle è piccolissima. Per misurarla gli astronomi usano il **secondo d'arco**, un angolo 3600 volte più piccolo di un grado (figura 3).

Da qui nasce il nome **parsec**: è la distanza alla quale una stella avrebbe una parallasse di un secondo d'arco. Un parsec vale circa 3,26 anni-luce, cioè a circa 31 mila miliardi di chilometri. Per distanze ancora maggiori si usano il kiloparsec (1000 parsec) e il megaparsec (un milione di parsec).

La parallasse funziona bene per le stelle relativamente vicine. Per quelle più lontane lo spostamento apparente diventa troppo piccolo per essere misurato facilmente e gli astronomi devono ricorrere ad altri metodi.



▲ **Figura 3**
La distanza di una stella può essere determinata con il metodo della parallasse.

Quanto è luminosa?

Guardando il cielo ci accorgiamo che alcune stelle sembrano molto brillanti e altre appena visibili. Ma attenzione: una stella può apparire brillante semplicemente perché è vicina.

Immaginiamo due lampadine identiche: quella che teniamo in mano ci appare molto più luminosa di quella che si trova a un chilometro di distanza. Con le stelle succede la stessa cosa.

Per questo gli astronomi distinguono la **luminosità apparente**, cioè quanto una stella ci appare brillante, dalla sua **luminosità intrinseca**, cioè quanta energia emette realmente. Conoscendo la distanza possiamo quindi capire se una stella che ci appare molto brillante è davvero molto luminosa oppure se è semplicemente vicina.

Quanto è calda?

Qui entra in gioco il colore. Le stelle non sono tutte dello stesso colore: alcune sono rossastre, altre gialle, altre ancora bianche o azzurre. Il colore ci dà una preziosa indicazione della loro temperatura superficiale.

In generale, le stelle più fredde tendono al rosso, mentre quelle più calde tendono al bianco-azzurro. Il Sole, con una temperatura superficiale di circa 5800 kelvin, si trova in una zona intermedia. Il colore è quindi una specie di **termometro astronomico**.

Di che cosa è fatta?

Possiamo fare ancora di meglio. La luce di una stella può essere scomposta nei suoi diversi colori, proprio come accade quando un prisma produce un arcobaleno. Otteniamo così lo **spettro** della stella.

Nello spettro compaiono particolari righe che permettono di riconoscere gli elementi chimici presenti. Ogni elemento lascia infatti una sorta di firma luminosa caratteristica. Grazie a queste righe possiamo scoprire che una stella contiene idrogeno, elio, ossigeno, carbonio, ferro e molti altri elementi, senza averne mai raccolto nemmeno un grammo. È uno dei risultati più affascinanti dell'astronomia: la luce ci permette di fare chimica a distanza.

Lo spettro ci racconta anche altre cose. Può darci informazioni sulla temperatura della stella e persino sul suo movimento: se la stella si avvicina o si allontana da noi, le righe del suo spettro si spostano leggermente per effetto Doppler.

Quanto è grande?

Una stella può essere molto più grande o molto più piccola di un'altra. Alcune sono poco più grandi della Terra, mentre altre sono talmente gigantesche che, se si trovassero al posto del Sole, arriverebbero a inglobare le orbite dei pianeti più interni. Ma come facciamo a misurare le dimensioni di qualcosa che vediamo come un puntino?

Ancora una volta ci viene in aiuto la luce. Se conosciamo quanto è luminosa una stella e quanto è calda, possiamo stimarne le dimensioni. E così, dietro a un puntino apparentemente identico a tutti gli altri, possiamo scoprire un'enorme varietà di stelle: piccole o gigantesche, fredde o roventi, deboli o straordinariamente luminose.

Una fotografia molto più ricca di quanto sembri

Distanza, luminosità, temperatura, composizione chimica e dimensioni: sono queste alcune delle informazioni fondamentali che possiamo ricavare osservando una stella. E non abbiamo bisogno di raggiungerla. Ci basta raccogliere la sua luce e imparare a leggerla.

Ma c'è una domanda ancora più interessante: come può una gigantesca sfera di gas produrre luce e calore per milioni o miliardi di anni? Per rispondere dobbiamo entrare nel cuore di una stella e capire come funziona. È qui che comincia la storia della sua vita.

3 L'evoluzione stellare

Le stelle non sono eterne. Nascono, trascorrono gran parte della loro esistenza in una fase relativamente stabile e, prima o poi, muoiono.

Naturalmente non possiamo osservare una singola stella per milioni o miliardi di anni. La storia di una stella è troppo lunga rispetto alla durata di una vita umana. Come facciamo allora a ricostruirla?

La risposta è nel cielo stesso. Possiamo osservare contemporaneamente stelle che stanno nascendo, stelle giovani, stelle mature, stelle vecchie e i resti di stelle ormai scomparse. Mettendo insieme questi diversi "fotogrammi" possiamo ricostruire il film dell'evoluzione stellare.

È un po' come se un extraterrestre arrivasse sulla Terra e avesse solo un giorno per capire come cresce un essere umano. Incontrerebbe neonati, bambini, adulti e anziani. Non vedrebbe nessuno attraversare tutte queste fasi, ma confrontando quello che osserva potrebbe ricostruire la storia della nostra vita. Con le stelle abbiamo fatto qualcosa di molto simile.

La nascita di una stella

Una stella nasce all'interno di una grande nube di gas e polveri, una **nebulosa** (figura 4). La gravità fa lentamente addensare la materia: la nube si contrae e, mentre si concentra, diventa sempre più calda.



▲ **Figura 4**
La Nebulosa Testa di Cavallo è una nebulosa oscura situata nella costellazione di Orione.

Al centro della nube si forma una **protostella**. Se la quantità di materia è sufficiente, la temperatura del suo nucleo continua ad aumentare finché diventa abbastanza alta da permettere la **fusione nucleare**. A questo punto è nata una stella.

Nel suo nucleo, l'idrogeno viene trasformato in elio e una piccola parte della massa si trasforma in energia. È questa energia che permette alla stella di brillare. La stella raggiunge così un delicato equilibrio: la gravità tende a comprimerla verso il centro, mentre l'energia prodotta al suo interno sostiene gli strati esterni.

La lunga età adulta

Per gran parte della sua vita una stella si trova nella cosiddetta **sequenza principale**. È la fase più lunga e più stabile della sua esistenza. Durante questo periodo la stella consuma lentamente l'idrogeno presente nel nucleo. Ma non tutte le stelle lo fanno alla stessa velocità.

Le stelle più massicce sono molto più calde e luminose: consumano il loro combustibile rapidamente e vivono relativamente poco. Le stelle piccole, invece, sono meno luminose e consumano l'idrogeno molto lentamente. Possono quindi rimanere stabili per tempi enormemente più lunghi. Il Sole appartiene alla sequenza principale e si trova all'incirca a metà della sua vita.

Possiamo rappresentare le stelle con il **diagramma di Hertzsprung-Russell**, detto anche **diagramma HR**, che mette in relazione la loro luminosità e la loro temperatura.

La maggior parte delle stelle si dispone lungo una fascia ben riconoscibile, chiamata appunto **sequenza principale** (figura 5).

Quando finisce l'idrogeno

Prima o poi, però, l'idrogeno del nucleo comincia a scarseggiare. L'equilibrio che aveva mantenuto stabile la stella cambia e la stella entra in una nuova fase della sua vita.

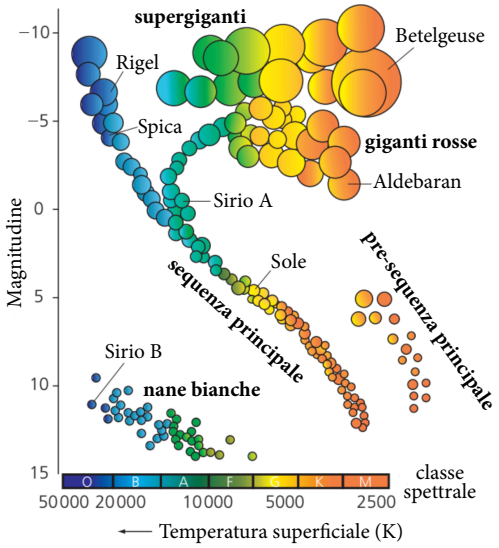
Qui il destino comincia a dipendere soprattutto dalla sua massa. Le stelle simili al Sole si gonfiano enormemente e diventano **giganti rosse**. La loro superficie si raffredda, mentre le dimensioni aumentano: una stella può diventare centinaia di volte più grande di quanto fosse nella sua fase precedente.

Le stelle molto più massicce del Sole seguono invece un percorso ancora più spettacolare. Diventano **supergiganti** e, nel loro interno, possono produrre progressivamente elementi sempre più pesanti. Ma anche per loro arriva il momento in cui la gravità prende il sopravvento.

Come muore una stella?

Il finale dipende dalla massa della stella. Una stella simile al Sole non esplode come una supernova. Espelle lentamente i suoi strati più esterni, formando una spettacolare **nebulosa planetaria**. Al centro rimane il nucleo della vecchia stella: una **nana bianca**, molto calda e molto densa, che con il passare del tempo si raffredda.

Una stella molto massiccia ha invece un destino decisamente più drammatico. Quando non riesce più a produrre abbastanza energia per sostenere il proprio peso, il nucleo collassa in una frazione di secondo e gli strati esterni vengono espulsi in una gigantesca esplosione: una **supernova**.



▲ **Figura 5**
Il diagramma HR mostra come sono distribuite le stelle in base alla loro temperatura e alla loro luminosità.

L'esplosione può essere così luminosa da rendere la stella, per un breve periodo, più brillante di un'intera galassia.

Dopo l'esplosione, il destino del nucleo dipende ancora una volta dalla sua massa. Può trasformarsi in una **stella di neutroni**, un oggetto grande appena qualche decina di chilometri ma con una massa paragonabile a quella del Sole. In alcuni casi il collasso continua fino a formare un **buco nero**.

La materia delle stelle ritorna nello spazio

La storia non finisce con la morte della stella. Durante la sua vita una stella produce nuovi elementi. Quando perde i suoi strati esterni o esplode come supernova, parte di questa materia viene restituita allo spazio e si mescola al gas e alla polvere presenti tra le stelle. Da queste nubi, milioni o miliardi di anni più tardi, possono nascere nuove stelle e nuovi sistemi planetari.

È un gigantesco ciclo cosmico: le stelle nascono dalla materia lasciata dalle stelle precedenti e, quando muoiono, restituiscono allo spazio parte di quello che hanno prodotto.

Anche il Sole appartiene a questa storia. La sua materia contiene elementi che non si sono formati al suo interno, ma che erano già presenti nella nube da cui il Sole e i suoi pianeti si sono formati.

E questo vale anche per noi. Il calcio delle nostre ossa, il ferro del nostro sangue, il carbonio delle nostre cellule e molti degli altri elementi di cui siamo fatti sono stati prodotti nelle stelle che hanno preceduto il Sole. Per questo possiamo davvero dire che, in un senso molto concreto, **siamo polvere di stelle**.

Domande e risposte

Perché le stelle sembrano tremolare, mentre i pianeti spesso no?

Le stelle sono così lontane che le vediamo come piccoli punti luminosi. La loro luce attraversa l'atmosfera e viene leggermente deviata, creando l'effetto di tremolio. I pianeti, essendo più vicini, ci appaiono come piccoli dischi e questo effetto si nota molto meno.

Perché alcune stelle sembrano più luminose di altre?

Dipende soprattutto dalla loro distanza dalla Terra e dalla quantità di luce che emettono. Una stella molto luminosa, ma lontana, può sembrarci più debole di una stella meno luminosa ma più vicina.

Perché le stelle che vediamo sono tutte puntini, anche se alcune sono enormi?

Le stelle sono a distanze enormi dalla Terra. Anche una stella gigantesca, vista da così lontano, occupa nel cielo una porzione piccolissima e ci appare come un punto luminoso.

Perché non vediamo le stelle di giorno?

Risposta: Le stelle continuano a essere nel cielo, ma la luce del Sole viene diffusa dall'atmosfera e rende il cielo molto luminoso. Per questo la debole luce delle stelle viene praticamente nascosta.

Perché le stelle che vediamo stasera non sono necessariamente ancora lì?

La luce delle stelle impiega molto tempo per arrivare fino a noi. Quando guardiamo una stella, la vediamo com'era nel passato. Se una stella molto lontana fosse cambiata o scomparsa, potremmo non averne ancora ricevuto la luce.

Perché le stelle hanno colori diversi?

Il colore di una stella dipende soprattutto dalla sua temperatura: le stelle più calde tendono al blu o al bianco, quelle più fredde al giallo o al rosso.

Le stelle nascono e muoiono?

Sì. Le stelle nascono da grandi nubi di gas e polveri e, dopo milioni o miliardi di anni, terminano la loro vita in modi diversi a seconda della loro massa.

Perché alcune stelle esplodono?

Le stelle molto massicce possono terminare la loro vita con una gigantesca esplosione chiamata supernova, liberando enormi quantità di energia.

Possiamo vedere nascere una stella?

Sì. Le stelle si formano ancora oggi all'interno di grandi nubi di gas e polveri. Possiamo osservare queste regioni e studiare le diverse fasi della loro formazione.

Una stella può diventare un buco nero?

Sì. Una stella molto massiccia può terminare la sua vita con una supernova e lasciare dietro di sé un buco nero.

Perché le stelle non si scontrano tra loro?

Perché lo spazio tra le stelle è enorme. Anche se le stelle si muovono continuamente nella galassia, gli incontri diretti sono estremamente rari.

Quante stelle possiamo vedere a occhio nudo?

In condizioni di cielo molto buio possiamo arrivare a vedere circa 3000 stelle contemporaneamente, mentre nell'intera volta celeste sono diverse migliaia.

Qual è la stella più vicina al Sole?

È Proxima Centauri, che si trova a circa quattro anni luce dalla Terra.

Le stelle hanno pianeti?

Molte stelle hanno pianeti che orbitano intorno a loro. Ne abbiamo già scoperti migliaia fuori dal Sistema solare, chiamati esopianeti.

Perché le stelle sembrano tremolare, mentre i pianeti no?

Perché la loro luce attraversa l'atmosfera terrestre, che la devia continuamente. I pianeti, essendo dischi anziché punti luminosi, sono molto più stabili.

Perché alcune stelle sembrano più luminose di altre?

Perché alcune sono più luminose, altre più vicine. La luminosità che vediamo dipende da entrambe le cose.

Perché le stelle che vediamo sono tutte puntini, anche se alcune sono enormi?

Perché sono lontanissime. Anche una stella enorme, vista da anni luce di distanza, appare come un semplice puntino.

Perché non vediamo le stelle di giorno?

Le stelle sono sempre lì, ma la luce del Sole diffusa dall'atmosfera rende il cielo troppo luminoso per distinguerle.

Perché le stelle che vediamo stasera non sono necessariamente ancora lì?

Perché vediamo le stelle nel passato. La loro luce può aver viaggiato per migliaia o milioni di anni prima di raggiungerci.

Quante sono le stelle dell'universo?

Nell'universo ci sono centinaia di miliardi di galassie, ognuna delle quali può ospitare migliaia di miliardi di stelle. Si pensa che il numero complessivo di stelle nell'universo sia dell'ordine di 10^{22}, cioè circa 10 000 miliardi di miliardi. È un numero enorme: basta pensare che i granelli di sabbia sulla Terra sono altrettanto numerosi.

Come fanno gli scienziati a sapere di cosa sono fatte le stelle?

Gli scienziati usano una tecnica chiamata spettroscopia, che consiste nell'analizzare la luce emessa dalle stelle. Quando questa luce viene scomposta nei suoi diversi colori, forma uno spettro con particolari righe che funzionano come un'impronta digitale degli elementi chimici.

Come si formano le stelle cadenti?

Le stelle cadenti si formano quando piccoli frammenti di roccia o polvere provenienti dallo spazio entrano nell'atmosfera terrestre, si scaldano e producono una scia luminosa. Si chiamano meteore e non sono vere stelle.

Luci dal passato

Il colore delle stelle

Osserva le stelle più luminose in una notte limpida e confronta il loro colore. Cerca di distinguere quelle che appaiono più bianche, più gialle, più arancioni o più rossastre.

Il colore di una stella dipende soprattutto dalla sua temperatura superficiale. Le stelle più calde tendono ad apparire bianche o azzurre, mentre quelle più fredde appaiono più gialle, arancioni o rosse.

Le stelle scintillano

Osserva una stella luminosa e confrontala con un pianeta, quando entrambi sono visibili. Guarda attentamente per alcuni minuti e nota se la loro luminosità sembra cambiare.

Le stelle sembrano scintillare perché la loro luce attraversa l'atmosfera terrestre, dove incontra strati d'aria in continuo movimento. I pianeti, invece, appaiono generalmente più stabili perché la loro immagine non è perfettamente puntiforme.

Le stelle non sono tutte ugualmente luminose

Scegli alcune stelle vicine tra loro nel cielo e confronta la loro luminosità apparente. Prova a ordinarle dalla più luminosa alla più debole.

Una stella può apparire più luminosa perché emette più energia oppure perché si trova più vicina a noi. La luminosità che osserviamo dipende quindi sia dalle caratteristiche della stella sia dalla sua distanza.

Le costellazioni

Scegli una costellazione facilmente riconoscibile e osserva la posizione delle sue stelle. Ripeti l'osservazione in momenti diversi della notte o in periodi diversi dell'anno.

Le stelle di una costellazione possono sembrare vicine tra loro nel cielo, ma in realtà possono trovarsi a distanze molto diverse dalla Terra. La forma della costellazione dipende quindi soprattutto dal nostro punto di vista.

Il movimento apparente delle stelle

Scegli una stella luminosa e confronta la sua posizione con quella di un edificio, un albero o un altro punto fisso. Ripeti l'osservazione dopo una o due ore.

Le stelle sembrano spostarsi lentamente nel cielo durante la notte. Questo movimento apparente è dovuto alla rotazione della Terra, che cambia continuamente la direzione in cui guardiamo lo spazio.

La Stella Polare

Cerca la Stella Polare e osserva la sua posizione rispetto all'orizzonte. Se possibile, ripeti l'osservazione da un luogo più a nord o più a sud e confronta la sua altezza nel cielo.

La Stella Polare appare quasi immobile perché si trova molto vicina alla direzione del polo nord celeste. La sua altezza sull'orizzonte è circa uguale alla latitudine del luogo.

Le stelle cambiano durante l'anno

Scegli una costellazione facilmente riconoscibile e osserva in quale periodo dell'anno è visibile nel cielo serale. Ripeti l'osservazione alcuni mesi dopo e confronta ciò che vedi.

Durante l'anno cambiano le costellazioni che possiamo osservare nelle ore serali. Questo accade perché la Terra compie la sua orbita attorno al Sole e, durante il percorso, la direzione verso cui guardiamo nello spazio cambia.

Stelle vicine e stelle lontane

Scegli due stelle che nel cielo sembrano molto vicine e cerca le loro distanze dalla Terra su una carta o in un'app astronomica. Confronta i valori trovati.

Due stelle che sembrano vicine nel cielo possono trovarsi a distanze molto diverse. La loro posizione apparente dipende infatti dal nostro punto di vista e non indica necessariamente che siano vicine nello spazio.

Le stelle più luminose

Individua alcune delle stelle più luminose del cielo e confrontale tra loro. Prova a stabilire quali appaiono più brillanti a occhio nudo.

La luminosità apparente di una stella dipende dalla quantità di luce che arriva fino a noi. Una stella molto luminosa può apparire più debole di un'altra se si trova molto più lontano.

Una stella che cambia luminosità

Cerca informazioni su una stella variabile facilmente osservabile e confronta la sua luminosità in momenti diversi. Puoi annotare le osservazioni e confrontarle con quelle di altre stelle vicine.

Alcune stelle non mantengono sempre la stessa luminosità. La loro luminosità può variare perché cambiano le loro dimensioni, la temperatura superficiale o altri fenomeni che avvengono nella stella.

Le stelle doppie

Osserva una stella doppia con un piccolo telescopio o un binocolo. Cerca di distinguere le due componenti e confrontane il colore e la luminosità.

Alcune stelle che vediamo vicine nel cielo sono realmente legate dalla gravità e orbitano una attorno all'altra. Altre, invece, sembrano vicine soltanto perché si trovano lungo la stessa direzione vista dalla Terra.

La distanza delle stelle

Scegli una stella e cerca la sua distanza dalla Terra. Confronta questo valore con la distanza di una seconda stella osservabile a occhio nudo.

Le distanze delle stelle sono così grandi che si usa spesso l'**anno luce** come unità di misura. Un anno luce è la distanza percorsa dalla luce in un anno.

Le stelle sopra l'orizzonte

Osserva il cielo verso nord, sud, est e ovest e confronta il numero e il tipo di stelle che riesci a vedere. Ripeti l'osservazione in momenti diversi della notte.

Non tutte le stelle sono visibili da ogni punto della Terra. Cambiando latitudine cambia la parte di cielo che si trova sopra l'orizzonte e quindi cambiano anche le stelle osservabili.

Le stelle cadenti

In una notte adatta, osserva il cielo per un periodo abbastanza lungo e cerca brevi scie luminose. Se ne osservi una, annota la direzione e l'ora in cui è comparsa.

Le cosiddette **stelle cadenti** non sono stelle che cadono sulla Terra. Sono piccole particelle che entrano nell'atmosfera a grande velocità e producono una scia luminosa.

Il cielo senza Luna

Osserva il cielo in una notte con poca o nessuna luce lunare e confrontalo con una notte di Luna piena. Se possibile, fai le osservazioni dallo stesso luogo.

Quando la Luna è poco luminosa, il cielo appare più scuro e possiamo vedere molte più stelle deboli. La luce della Luna, come quella artificiale delle città, illumina l'atmosfera e rende più difficile osservare gli oggetti meno luminosi.

Esercizi

1 Indica la risposta corretta.

a. La seconda legge di Keplero mette in relazione:

- A aree e tempi
- B tempi e aree
- C tempi e distanze
- D aree e distanze

b. Il perielio è:

- A il punto dell'orbita di un pianeta più lontano dal Sole
- B il punto dell'orbita di un pianeta più vicino al Sole
- C il punto dell'orbita in cui il pianeta è equidistante dal Sole
- D nessuna risposta è accettabile

c. La prima legge di Keplero afferma che:

- A i pianeti si muovono di moto circolare uniforme
- B il Sole si trova al centro delle orbite
- C i pianeti si muovono su orbite ellittiche
- D i pianeti mantengono sempre la stessa distanza dal Sole

d. Immagina di essere un extraterrestre che abita in una galassia molto lontana, che possiede un potente telescopio, come quelli che vengono utilizzati oggi sulla Terra. Puntando l'obiettivo verso la nostra galassia in direzione del nostro sistema solare, saresti in grado di vedere:

- A il Sole, la Terra e tutti i pianeti
- B probabilmente soltanto il Sole
- C non vedresti nulla
- D soltanto Giove

e. La prima legge di Keplero riguarda:

- A il moto di rivoluzione terrestre
- B il moto di rotazione terrestre
- C la forma della Terra
- D l'asse terrestre

f. Dalla seconda legge di Keplero si deduce che la velocità con la quale ciascun pianeta percorre la sua orbita è:

- A sempre uguale
- B minore in inverno
- C maggiore in perielio
- D maggiore in afelio

g. Quale pianeta gira più velocemente attorno al Sole?

- A Terra
- B Saturno
- C Plutone
- D Mercurio

[due risposte A, due B, due C e una D]

2 **Vero o falso?**

		V	F
a.	Cassiopea è una costellazione che appare in cielo come una W.	V	F
b.	Durante le reazioni di fusione nucleare i nuclei di idrogeno si trasformano in nuclei di elio.	V	F
c.	Giove è il pianeta più grande del sistema solare.	V	F
d.	Gli elementi presenti in quantità maggiore nelle stelle sono l'idrogeno e l'ossigeno.	V	F
e.	Il *big bang* si verifica ogni volta che una stella collassa.	V	F

[tre affermazioni vere e due false]

3 **Vero o falso?**

		V	F
a.	La stella Polare ci appare nella stessa posizione da qualunque regione della Terra noi la osserviamo.	V	F
b.	La stella Polare ci appare nella stessa posizione a qualunque ora noi la osserviamo.	V	F
c.	La Via Lattea è la nostra galassia.	V	F
d.	La Via Lattea è la galassia più grande dell'universo.	V	F
e.	La Via Lattea ha un suo moto di rotazione.	V	F

[tre affermazioni vere e due false]

4 Indica la risposta corretta.

a. Finito lidrogenos del nucleo la stella andrà incontro a:

A contrazione gravitazionale
B esplosione di una supernova
C formazione della gigante rossa
D espansione legata alla fusione nucleare dell'idrogeno

b. Le supernove sono eventi legati a:

A formazioni di stelle di grande dimensione
B morte di stelle di grande dimensione
C vita attiva di stelle di grande massa
D fusione nucleare dell'idrogeno in elio

c. L'enorme peso di una nana bianca è bilanciato da:

A pressione della contrazione gravitazionale
B pressione degli elettroni degeneri
C pressione dei neutroni degeneri
D pressione della nebulosa

d. Nelle stelle la forza di gravità è bilanciata da:

A forza centrifuga
B forza di compressione dei gas
C pressione degli elettroni degeneri
D forze di espansione generate dalle fusioni nucleari

e. La formazione degli atomi più pesanti del ferro avviene:

A durante la morte delle stelle di grandi dimensioni
B durante le reazioni di fusione nucleare delle stelle
C nelle nane bianche
D nei momenti iniziali del *big bang*

f. Le caratteristiche di una stella di neutroni sono:

A diametro: 100 km, densità: $10,\mathrm{kg/cm^3}$
B diametro: 1000 km, densità: $100000,\mathrm{kg/cm^3}$
C diametro: $100,000$ km, densità: 1 milione di $\mathrm{t/cm^3}$
D diametro: 10 km, densità: 1 miliardo di $\mathrm{t/cm^3}$

g. Una stella con massa 10 volte quella del Sole:

A avrà una vita media dieci volte maggiore del Sole
B vivrà meno del Sole
C avrà più o meno la longevità del Sole
D vivrà di più del Sole

[due risposte A, due B, una C e due D]

5 Indica la risposta corretta.

a. La forza che trasforma le nebulose in stelle è:

A la forza di gravità
B la forza di espansione gravitazionale
C la forza centrifuga
D la forza di accelerazione

b. La nana bianca può avere un diametro di:

A alcuni metri
B alcuni chilometri
C alcuni anni luce
D alcune decine di migliaia di chilometri

c. Perché nelle stelle più grandi la fusione nucleare è più veloce?

A la temperatura del nucleo è più elevata
B sono presenti atomi più pesanti
C sono presenti isotopi
D sono presenti atomi più leggeri

d. Nelle stelle la forza di gravità è bilanciata da:

A forza centrifuga
B forza di compressione dei gas
C pressione degli elettroni degeneri
D forze di espansione generate dalle fusioni nucleari

e. Per formare una stella occorre una massa minima di:

A 1 massa solare
B 0,08 masse solari
C 10 masse solari
D 100 masse solari

f. Se una stella morente ha una massa pari a 200 masse solari si formerà:

A una nana nera
B una gigante rossa
C un buco nero
D una stella di neutroni

g. La nana bianca si forma dalla morte di stelle aventi massa:

A maggiore di 15 masse solari
B minore di 8 masse solari
C maggiore di 10 masse solari
D compresa tra 15 e 30 masse solari

[due risposte A, due B, una C e due D]

6 Indica la risposta corretta.

a. La fusione nucleare degli atomi è difficile da realizzare perché:

A i protoni tendono a respingersi tra loro
B i neutroni ostacolano l'unione dei nuclei atomici
C gli elettroni si respingono reciprocamente
D la forza di gravità è troppo elevata

b. Quando si uniscono quattro atomi di idrogeno per formarne uno di elio la massa:

A aumenta
B diminuisce
C rimane uguale
D si dimezza

c. L'enorme peso di una stella di neutroni è bilanciato da:

A pressione della contrazione gravitazionale
B pressione degli elettroni degeneri
C pressione dei neutroni
D pressione della nebulosa

d. La nana bianca si trasformerà nel corso del tempo in:

A stella di neutroni
B buco nero
C supernova
D nana nera

e. La forza che trasforma le nebulose in stelle è:

A la forza di gravità
B la forza di espansione gravitazionale
C la forza centrifuga
D la forza di accelerazione

f. La stella di neutroni può avere un diametro di:

A alcuni metri
B alcuni chilometri
C alcuni anni luce
D alcune decine di migliaia di chilometri

g. Gli atomi più pesanti del carbonio si sono formati:

A nel nucleo delle stelle più piccole
B nelle stelle di neutroni
C nel nucleo delle stelle più grandi
D nelle nane bianche

[due risposte A, due B, due C e una D]

7 Indica la risposta corretta.

a. La pulsar può essere l'espressione di:

A una stella di neutroni
B un buco nero
C una stella di grandi dimensioni
D una nana nera

b. Il primo evento di una stella che ha finito l'idrogeno del nucleo è:

- A l'esplosione di una supernova
- B la contrazione gravitazionale
- C la formazione della gigante rossa
- D l'espansione legata alla fusione nucleare dell'idrogeno

c. Il buco nero:

- A si forma col raffreddamento di una nana bianca
- B si forma dalla morte di stelle come il Sole
- C si forma dalla morte di stelle con massa maggiore di 25 masse solari
- D non si può prevederne la formazione in base alle attuali leggi scientifiche

d. Gli atomi più pesanti dell'elio si sono formati:

- A con il *big bang*
- B con le fusioni nucleari avvenute nelle stelle
- C con l'espansione dell'universo
- D con le fissioni nucleari delle stelle

e. Per avviare la fusione nucleare dell'elio servono temperature di:

- A 10 milioni di gradi
- B 20 milioni di gradi
- C 200 milioni di gradi
- D 100 milioni di gradi

f. Gli atomi di idrogeno ed elio si sono formati:

- A all'inizio dell'universo
- B nel nucleo delle stelle
- C nelle supernove
- D nelle stelle di neutroni

g. Le caratteristiche di una nana bianca sono:

- A diametro: 10000,km, densità: $1000, kg/cm^3$
- B diametro: 1000,km, densità: $100000, kg/cm^3$
- C diametro: 100000,km, densità: 1 milione di t/cm^3
- D diametro: 10,km, densità: 1 miliardo di t/cm^3

[due risposte A, due B, due C e una D]

8 Indica la risposta corretta.

a. La forza che trasforma le nebulose in stelle è:

- A la forza di gravità
- B la forza di espansione
- C la forza centrifuga
- D la forza di accelerazione

b. Nonostante l'enorme valore della forza di gravità, i gas che formano il Sole non collassano nel nucleo perché:

- A i gas non possono in alcun caso addensarsi
- B l'energia termonucleare prodotta nel nucleo tende a far espandere i gas
- C l'attrazione dei pianeti che ruotano intorno al Sole contrasta l'attrazione del Sole stesso
- D si ha la trasformazione dell'idrogeno, più leggero, in elio, più pesante

c. Gli atomi più pesanti dell'elio si sono formati con:

- A il *big bang*
- B l'espansione dell'universo
- C le fusioni nucleari nelle stelle
- D le fissioni nucleari nelle stelle

d. La Terra non è diventata una stella perché:

- A era costituita da atomi diversi dal Sole
- B si è formata prima del Sole
- C è molto solida al suo interno
- D ha una massa troppo piccola

e. La nebulosa planetaria si origina da:

A scoppio del *big bang*

B gigante rossa

C gas dell'atmosfera che ruota attorno a un pianeta

D buco nero

f. Le prime particelle apparse nell'universo sono stati:

A i buchi neri

B i protoni

C i quark

D i neutroni

g. Le nebulose planetarie sono formate in parte da:

A atomi di idrogeno

B elettroni

C nuclei atomici

D atomi diversi da quelli di partenza

[una risposta A, due B, una C e tre D]

9 Vero o falso?

a. Un buco nero è una regione di spazio dell'universo priva di materia. V F

b. Una gigante azzurra è una stella molto calda e molto luminosa. V F

c. Una nana bianca è una stella piccola, poco luminosa, al termine del suo ciclo evolutivo. V F

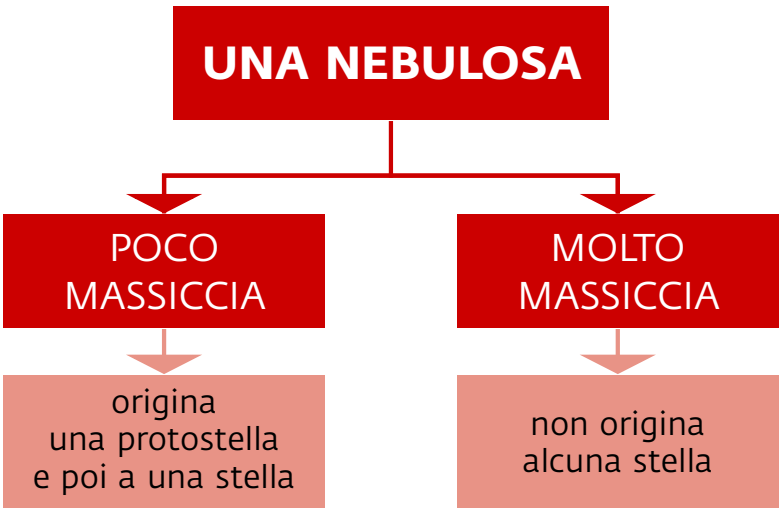
d. Una stella a neutroni è una giovane stella appena nata. V F

e. Una stella in formazione viene chiamata supernova. V F

[due affermazioni vere e tre false]

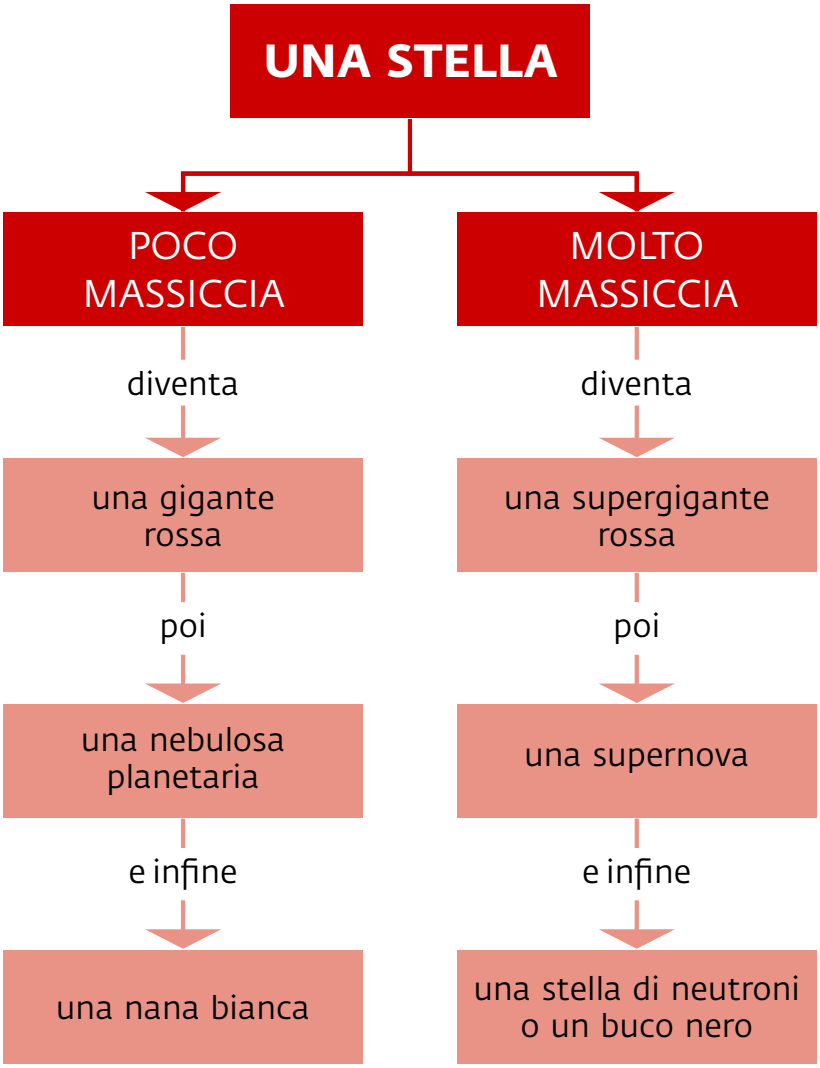
IN SINTESI

LE STELLE



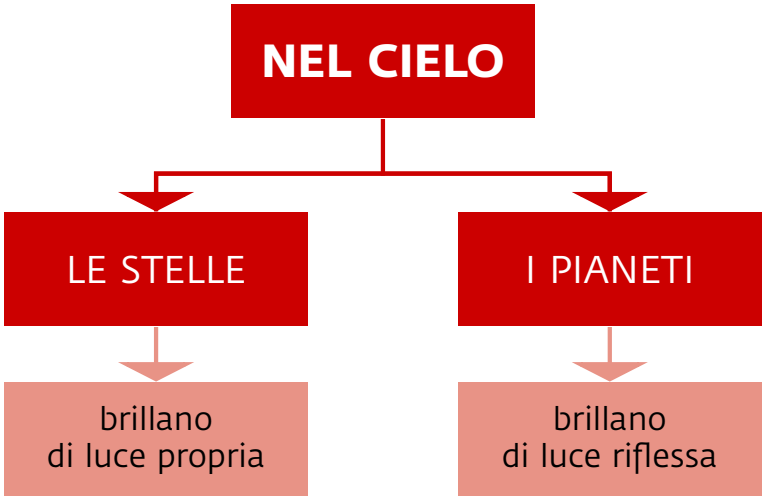
IN SINTESI

LE STELLE



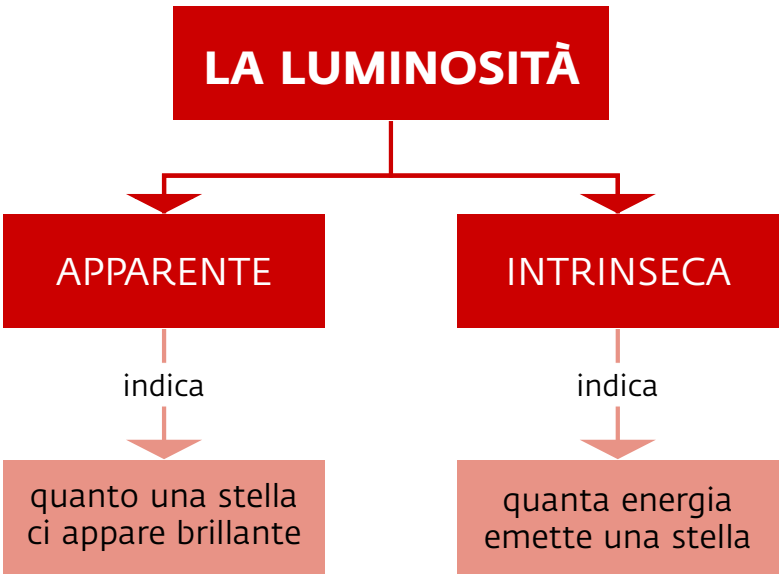
IN SINTESI

LE STELLE



IN SINTESI

LE STELLE



IN SINTESI

LE STELLE



5 Le galassie

Che cos'è una galassia? Com'è fatta e come si organizza una struttura che può contenere miliardi di stelle? E che posto occupa, in tutto questo, la nostra Via Lattea?

In questo capitolo faremo questo viaggio: partiremo dalla Via Lattea per capire che cos'è una galassia e com'è fatta, vedremo che cosa distingue le diverse galassie e come interagiscono tra loro, e allargheremo poi lo sguardo fino alla loro nascita, alla loro evoluzione e alla gigantesca struttura dell'universo di cui fanno parte.

1 La Via Lattea

Alzi gli occhi verso il cielo e vedi le stelle. Una sembra vicina, un'altra lontanissima. Alcune brillano intensamente, altre appena. Ma c'è una cosa che non possiamo capire guardando il cielo a occhio nudo: quelle stelle non sono sparse a caso nel buio. La maggior parte fa parte di enormi sistemi, tenuti insieme dalla gravità. Sono le galassie.

Una galassia è un gigantesco insieme di stelle, gas, polveri e altri materiali. Può contenerne milioni, miliardi o addirittura centinaia di miliardi. E noi non siamo semplicemente spettatori di questo spettacolo: siamo dentro una galassia. La nostra si chiama **Via Lattea**.

Ma perché la chiamiamo Via Lattea? La risposta comincia molto prima dei telescopi, quando gli esseri umani guardavano quella grande striscia biancastra attraversare il cielo e cercavano di darle un significato. Gli antichi Greci la chiamavano *galaxías*, una parola che significa più o meno "lattea". E dietro questo nome c'è un mito curioso che ha come protagonisti Zeus, Era e il piccolo Eracle, il futuro Ercole. Secondo il mito, Zeus voleva che Eracle, suo figlio avuto con una donna mortale, diventasse immortale. Per riuscirci cercò di farlo allattare da sua moglie Era mentre la dea dormiva. Quando Era si accorse dell'inganno, allontanò bruscamente il bambino. Alcune gocce del suo latte schizzarono verso il cielo e formarono quella lunga striscia biancastra che attraversa la volta celeste. Da qui sarebbe nato il nome Via Lattea.

La spiegazione vera, naturalmente, è meno mitologica e molto più vertiginosa: quella fascia luminosa è la luce di un numero enorme di stelle della nostra galassia, che vediamo dall'interno. Gli antichi vedevano nel cielo una strada fatta di latte. Noi oggi sappiamo che è una galassia. Ma il nome è rimasto. Ed è da qui che possiamo cominciare il viaggio.

Quando osserviamo la Via Lattea da un luogo abbastanza buio, lontano dalle luci delle città, possiamo vedere nel cielo una lunga fascia biancastra. Sembra quasi una nuvola luminosa. Per gli antichi era un fenomeno misterioso. Oggi sappiamo che quella fascia è costituita dalla luce di un numero enorme di stelle della nostra stessa galassia, osservate dall'interno. È un po' come stare in mezzo a una foresta e guardare gli alberi tutti

insieme: da lontano sembrano formare una superficie compatta, ma avvicinandosi si scopre che quella superficie è fatta di tantissimi elementi distinti.

La Via Lattea è una **galassia a spirale barrata**. Ha un diametro di circa 100 000 anni luce e contiene oltre 100 miliardi di stelle. Il Sole è una di queste. E intorno al Sole c'è il Sistema solare: i pianeti, i satelliti, gli asteroidi, le comete e tutto quello che conosciamo come il nostro piccolo angolo di spazio. Ma il Sistema solare, rispetto alla Via Lattea, è davvero minuscolo. Anzi, è difficile persino capire quanto.

Un modo per provarci è pensare alla distanza che percorre la luce. La luce viaggia a circa 300 000 chilometri al secondo e in un anno percorre una distanza enorme, chiamata **anno luce**. La Via Lattea è larga circa 100 000 anni luce. Significa che, anche viaggiando alla velocità della luce, per attraversarla da un'estremità all'altra servirebbero circa centomila anni. E noi siamo solo una piccola parte di questa gigantesca struttura.

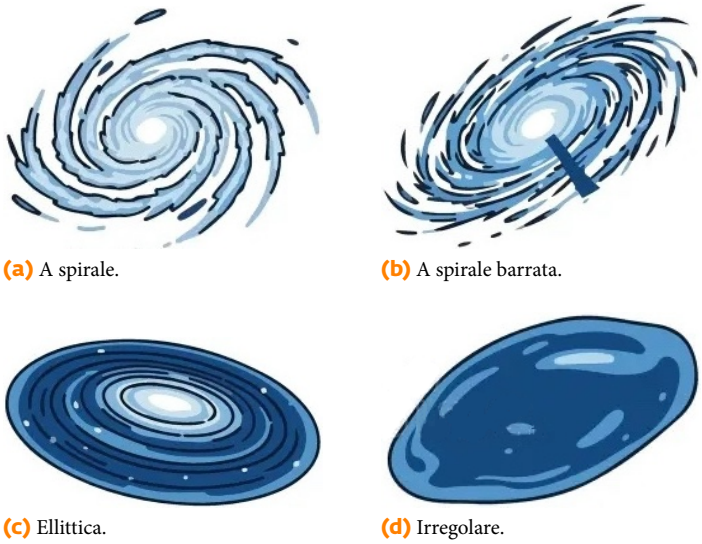
Ma una galassia non è un semplice mucchio di stelle. Potremmo immaginarla come una specie di enorme contenitore pieno di stelle, ma sarebbe un'immagine incompleta. Tra una stella e l'altra c'è spazio, moltissimo spazio. E in questo spazio apparentemente vuoto si trovano gas e minuscole particelle di polvere: è quella che viene chiamata **materia interstellare**. In alcune zone gas e polveri si concentrano formando enormi nubi: le **nebulose**. Alcune sono illuminate dalla radiazione delle stelle vicine, altre sono scure e nascondono alla vista quello che si trova dietro di loro, altre ancora sono luoghi in cui possono nascere nuove stelle.

Questo è un dettaglio importante, perché ci dice che una galassia non è una fotografia immobile. È un luogo in continua trasformazione: le stelle nascono, cambiano, muoiono. La materia viene dispersa nello spazio e può essere riutilizzata per formare nuove stelle e nuovi sistemi planetari. In un certo senso, gli atomi che compongono il nostro corpo hanno una storia molto più antica della Terra: molti degli elementi più pesanti sono stati prodotti all'interno di stelle vissute e morte molto prima che esistesse il nostro Quando guardiamo una galassia, quindi, non stiamo guardando solo un insieme di punti luminosi, ma una città cosmica in continua evoluzione.

E se la Via Lattea è una città cosmica, viene naturale chiedersi se tutte le città del cosmo siano costruite allo stesso modo. La risposta è no. Quando osserviamo altre galassie, infatti, ci accorgiamo che possono avere forme molto diverse. Alcune mostrano grandi bracci curvi, altre appaiono più arrotondate, altre ancora sembrano quasi prive di una forma ordinata. Queste differenze non sono solo estetiche: raccontano qualcosa della storia delle galassie. Per capirlo dobbiamo quindi allargare lo sguardo oltre la nostra.

2 Le galassie tra forme e incontri

Le galassie possono avere forme molto diverse. Gli astronomi le classificano principalmente in quattro grandi categorie: spirali, spirali barrate, ellittiche e irregolari. Le **galassie a spirale** hanno un nucleo centrale dal quale si sviluppano grandi bracci curvi. Sono forse quelle che più facilmente immaginiamo quando sentiamo parlare di galassie. Le **galassie a spirale barrata**, come la Via Lattea, hanno una struttura simile,



(a) A spirale. **(b)** A spirale barrata. **(c)** Ellittica. **(d)** Irregolare.

▲ **Figura 1**
Tipi di galassie.

ma al centro presentano una specie di barra allungata di stelle, dalla quale si sviluppano i bracci. Le **galassie ellittiche** hanno invece forme più arrotondate o allungate. Alcune sono relativamente piccole, altre possono essere enormi. Infine ci sono le **galassie irregolari**, che non presentano una forma ben definita. Possono avere strutture caotiche, spesso legate anche a interazioni con altre galassie (figura 1).

Queste forme non sono semplicemente diversi "modelli estetici". Raccontano qualcosa della storia di una galassia. Una galassia può cambiare forma nel corso della sua vita, soprattutto quando la gravità la mette in relazione con altre galassie. Ed è qui che scopriamo qualcosa di importante: le galassie non sono oggetti immobili che galleggiano separati nello spazio. Si muovono, si influenzano e, su tempi abbastanza lunghi, possono perfino fondersi.

Quando guardiamo una fotografia del cielo, le galassie sembrano immobili. In realtà non lo sono. Le galassie si muovono nello spazio e la loro gravità può influenzare quella delle galassie vicine. Possono avvicinarsi, deformarsi e perfino fondersi. La parola **collisione** può far pensare a due giganteschi ammassi di stelle che si schiantano l'uno contro l'altro, ma non funziona proprio così. Le stelle sono talmente lontane le une dalle altre che è molto improbabile che due stelle si scontrino direttamente durante una fusione tra galassie. È soprattutto la gravità a combinare il disastro: quando due galassie si avvicinano, la loro struttura può essere deformata, i bracci possono allungarsi, le orbite delle stelle possono cambiare e le nubi di gas possono essere compresse. In alcune regioni, questo può favorire la nascita di nuove stelle. Dopo milioni o miliardi di anni, le due galassie possono fondersi in un'unica struttura. È un processo lentissimo rispetto alla durata di una vita umana, ma su scala cosmica può essere perfettamente normale. Le galassie, insomma, crescono anche incontrandosi.

E non è solo una possibilità teorica. La Via Lattea fa parte di un gruppo di galassie chiamato **Gruppo Locale**, che comprende numerose galassie nel nostro vicinato cosmico.

Tra queste c'è **Andromeda**, una grande galassia a spirale che si trova a circa 2,5 milioni di anni luce da noi. È la grande vicina della Via Lattea e, su tempi enormemente lunghi, le due galassie sono destinate a interagire gravitazionalmente e potrebbero fondersi in un'unica grande struttura. Non è qualcosa che dobbiamo aspettarci di vedere domani, naturalmente: si tratta di un processo che richiede miliardi di anni. Ma questa previsione ci ricorda una cosa fondamentale: il cielo che vediamo oggi non è il cielo di sempre. L'universo cambia, le galassie cambiano, e anche la nostra galassia ha una storia e avrà un futuro.

Nella storia della Via Lattea c'è poi un altro elemento sorprendente. Nel suo centro si trova un oggetto straordinario: un **buco nero supermassiccio** chiamato Sagittarius A*. La sua massa è milioni di volte quella del Sole. Non dobbiamo però immaginare il buco nero come un gigantesco aspirapolvere che risucchia tutto quello che gli sta intorno. La materia e le stelle che si trovano nella regione centrale della galassia seguono le leggi della gravità proprio come gli altri oggetti cosmici. Il buco nero è invisibile direttamente, ma possiamo dedurne l'esistenza osservando il comportamento delle stelle e della materia che gli orbitano intorno. È curioso pensare che, mentre noi viviamo in una regione relativamente tranquilla della Via Lattea, al centro della nostra galassia esiste un oggetto così estremo. È come scoprire che, al centro della nostra enorme città cosmica, si nasconde uno dei fenomeni più estremi dell'universo.

Ma anche questo oggetto, per quanto straordinario, è solo una parte della storia. Abbiamo guardato dentro la Via Lattea, abbiamo confrontato la nostra galassia con le altre e abbiamo visto che le galassie possono deformarsi, incontrarsi e trasformarsi. A questo punto possiamo fare un altro passo indietro, perché una galassia non vive da sola. Anche le galassie, proprio come le stelle al loro interno, fanno parte di strutture più grandi.

3 Dalle galassie all'universo

La Via Lattea non è isolata. Appartiene al Gruppo Locale, e il Gruppo Locale è solo una piccola parte di una struttura molto più grande. Le galassie possono riunirsi in **ammassi**, formati da centinaia o persino migliaia di galassie. A loro volta, questi grandi insiemi non sono distribuiti casualmente nello spazio. Quando gli astronomi osservano l'universo su scale enormi, emerge una struttura sorprendente: le galassie tendono a disporsi lungo grandi filamenti, formando una specie di gigantesca rete. Tra un filamento e l'altro esistono regioni enormi dove la materia è molto meno concentrata: i cosiddetti **vuoti cosmici**. Questa struttura viene spesso chiamata **rete cosmica**.

Se potessimo allontanarci abbastanza dalla Terra, poi dalla Via Lattea, poi dal Gruppo Locale e continuassimo ad allargare lo sguardo, l'universo non ci apparirebbe come un insieme casuale di galassie. Vedremmo qualcosa di simile a una gigantesca ragnatela, fatta di filamenti, ammassi e grandi regioni relativamente vuote. E noi siamo appesi a un minuscolo punto di quella ragnatela.

Ma allontanarsi nello spazio significa fare anche qualcosa di ancora più sorprendente: significa guardare indietro nel tempo. Abbiamo detto che Andromeda si trova a circa 2,5 milioni di anni luce. Questo significa che la luce che vediamo oggi è partita da

Andromeda circa 2,5 milioni di anni fa. Quando guardiamo Andromeda, quindi, **la vediamo nel passato**. E questo vale ancora di più per le galassie lontanissime. Se una galassia si trova a miliardi di anni luce da noi, la luce che arriva oggi è partita miliardi di anni fa. I telescopi, quindi, non sono solo strumenti per vedere oggetti molto lontani: sono anche una specie di **macchina del tempo**. Guardando sempre più lontano, possiamo osservare l'universo quando era più giovane, vedere galassie che esistevano quando la Terra non era ancora nata, quando il Sole non si era ancora formato e, andando ancora più indietro, quando l'universo aveva una storia completamente diversa da quella che conosciamo oggi (figura 2).



▲ **Figura 2**
La Galassia Sombreroè una splendida galassia a spirale situata nella costellazione della Vergine, a circa 30 milioni di anni luce dalla Terra.

È uno dei motivi per cui studiare le galassie significa anche studiare la storia dell'universo. Le prime galassie non erano necessariamente uguali a quelle che osserviamo nel nostro universo vicino. L'universo giovane conteneva già materia che, sotto l'effetto della gravità, poteva aggregarsi e, nel corso del tempo, formare strutture sempre più grandi. Le galassie crebbero accumulando materia e attraverso interazioni e fusioni con altre galassie. Questo significa che una galassia può essere il risultato di una storia lunghissima fatta di incontri, trasformazioni e cambiamenti. Anche la Via Lattea ha avuto una storia simile. Quando guardiamo il cielo, quindi, non vediamo solo dove sono le galassie: possiamo cercare di capire come sono arrivate fin lì. È una differenza enorme. L'astronomia non si limita a fare l'inventario del cosmo: cerca di ricostruirne la storia.

E proprio osservando galassie sempre più lontane possiamo cominciare a porci una domanda quasi inevitabile: **quante galassie ci sono?** La risposta non è semplice, perché non possiamo semplicemente contarle una per una. Possiamo però osservare porzioni del cielo, rilevare le galassie più lontane e usare queste osservazioni per stimare quante potrebbero essercene nell'universo osservabile. E il risultato è vertiginoso. Le stime moderne indicano che nell'universo osservabile ci sono **centinaia di miliardi di galassie**, e alcune analisi suggeriscono numeri ancora maggiori quando si tiene conto delle galassie molto piccole e difficili da osservare.

A questo punto possiamo fare un confronto. La nostra Via Lattea contiene più di cento miliardi di stelle, e la Via Lattea è solo una galassia tra centinaia di miliardi. È difficile persino formulare mentalmente una quantità del genere. Però possiamo provare a fare un passo indietro: la Terra è un pianeta, il pianeta orbita intorno a una stella, la stella appartiene a una galassia, la galassia appartiene a un gruppo, il gruppo fa parte di una struttura cosmica più grande e quella struttura è solo una piccola parte dell'universo osservabile.

Ogni volta che allarghiamo lo sguardo, **diventiamo più piccoli**. Eppure siamo riusciti a vedere tutto questo. Forse è proprio questo l'aspetto più sorprendente. Noi viviamo

su un piccolo pianeta attorno a una stella ordinaria, in una zona periferica di una galassia tra un numero enorme di altre galassie. Eppure siamo riusciti a capire che le galassie esistono, a classificarle, a misurarne le distanze, a studiarne i movimenti, a osservare la loro evoluzione e perfino a ricostruire parte della loro storia. Abbiamo costruito strumenti capaci di raccogliere la luce che ha viaggiato per miliardi di anni. Abbiamo imparato a leggere quella luce. E così, osservando punti lontanissimi nel cielo, siamo riusciti a ricostruire una parte della storia del cosmo.

La galassia in cui viviamo, allora, può essere vista in due modi. Da una parte è **la nostra casa**: il luogo che contiene il Sole, la Terra e tutto quello che conosciamo. Dall'altra è solo una delle innumerevoli strutture che compongono il cosmo. E forse è proprio questa doppia prospettiva a rendere le galassie così affascinanti. Siamo dentro una galassia, ma possiamo guardare oltre la nostra galassia. Possiamo vedere altre galassie, studiarle e persino osservare com'erano miliardi di anni fa. E più lontano guardiamo, più ci rendiamo conto che la Via Lattea non è il punto d'arrivo. È solo una tappa.

Perché quando smettiamo di chiederci che cosa sia una singola galassia e cominciamo a domandarci che cosa contenga l'insieme di tutte le galassie, siamo già arrivati alla domanda più grande di tutte: che cos'è, davvero, l'universo?

Domande e risposte

Se guardo una galassia lontanissima, sto davvero guardando nel passato?

Sì. La luce impiega tempo per viaggiare. Se una galassia è, per esempio, a dieci milioni di anni luce, la vediamo com'era circa dieci milioni di anni fa.

Che cos'è una galassia?

Una galassia è un enorme insieme di stelle, gas, polveri, pianeti e materia oscura, tenuti insieme dalla gravità. La Via Lattea è la galassia in cui si trova il Sistema solare.

Quante galassie ci sono?

Nell'Universo osservabile potrebbero esserci centinaia di miliardi, forse circa un trilione, di galassie. Non possiamo sapere con certezza quante siano in tutto l'Universo.

Perché alcune galassie sono a spirale e altre no?

Dipende dalla loro formazione e dalla loro evoluzione. Le galassie a spirale hanno un disco che ruota e spesso possiedono bracci, mentre altre possono avere forme ovali o irregolari.

Perché la Via Lattea ha quella forma?

Risposta: La Via Lattea è una galassia a spirale barrata. La sua forma deriva dalla rotazione del disco e dalla gravità delle stelle, del gas e della materia oscura.

Dove si trova il Sistema solare nella Via Lattea?

Si trova nel disco della Via Lattea, in una regione chiamata Braccio di Orione, a circa 26 000 anni luce dal centro galattico.

Cosa c'è al centro della nostra galassia?

Al centro della Via Lattea c'è un enorme buco nero supermassiccio, chiamato Sagittarius A*, circondato da moltissime stelle e gas.

La Via Lattea si muove?

Sì. La Via Lattea ruota su sé stessa e si muove nello spazio insieme alle altre galassie del Gruppo Locale.

Andromeda si sta avvicinando?

Sì. La galassia di Andromeda si sta avvicinando alla Via Lattea a causa della gravità.

Cosa succederà quando la Via Lattea e Andromeda si incontreranno?

Tra miliardi di anni le due galassie probabilmente si fonderanno formando una galassia più grande. Le stelle sono così lontane tra loro che è improbabile che si scontrino direttamente.

Le galassie possono nascere?

Sì. Le galassie si sono formate nel corso di miliardi di anni dall'aggregazione di materia sotto l'effetto della gravità. Possono anche crescere fondendosi con altre galassie.

Come facciamo a sapere quanto è grande una galassia?

Misuriamo la sua distanza e osserviamo quanto si estende la sua luce. Confrontando queste informazioni possiamo stimarne le dimensioni.

Perché le galassie ruotano?

Perché la materia che le ha formate possedeva già un certo movimento. La gravità ha riunito questa materia, mentre il suo movimento ha fatto ruotare la galassia.

Che cos'è la materia oscura?

È una forma di materia che non emette né riflette luce, quindi non possiamo osservarla direttamente. Sappiamo che esiste perché la sua gravità influenza il movimento delle stelle e delle galassie.

Ci sono buchi neri al centro di tutte le galassie?

Molte galassie grandi sembrano avere un buco nero supermassiccio al centro. Non sappiamo però con certezza se tutte le galassie ne possiedano uno.

Alla scoperta della Via Lattea

La Via Lattea

In una notte buia, lontano dalle luci delle città, osserva la parte di cielo in cui compare una debole fascia chiara. Confronta ciò che vedi con il cielo osservabile in una zona molto illuminata.

Quella fascia è la **Via Lattea**, la galassia in cui si trova il Sistema Solare. La sua luce diffusa è prodotta dall'enorme numero di stelle che appartengono alla nostra galassia e che, viste tutte insieme, formano una debole struttura luminosa.

Le stelle della Via Lattea

Osserva una zona della Via Lattea particolarmente ricca di stelle e confrontala con una zona più scura del cielo. Prova a individuare differenze nella quantità di stelle visibili.

Le zone più scure non sono necessariamente prive di stelle. In alcuni casi contengono grandi quantità di polvere interstellare, che assorbe o diffonde la luce delle stelle situate dietro di essa.

Il centro della Via Lattea

Osserva la Via Lattea e nota che in alcune zone appare più luminosa e ricca di stelle che in altre. Confronta queste regioni in diversi periodi dell'anno.

La parte più luminosa della Via Lattea corrisponde alla direzione del centro della nostra galassia. Il Sistema solare non si trova al centro, ma in una regione periferica del disco galattico.

Le galassie non sono tutte uguali

Confronta immagini di galassie diverse osservate con telescopi. Cerca di riconoscere differenze nella forma, nelle dimensioni e nella distribuzione della luce.

Le galassie possono avere forme molto diverse. Alcune sono **spirali**, altre **ellittiche** e altre ancora hanno forme irregolari, determinate dalla loro struttura e dalla loro storia.

Una galassia lontana

Osserva, con un telescopio o attraverso immagini astronomiche, una galassia diversa dalla Via Lattea. Confronta il suo aspetto con quello della nostra galassia.

Una galassia lontana può apparire come una piccola macchia luminosa, anche se contiene miliardi o centinaia di miliardi di stelle. La sua grande distanza fa sì che tutta questa struttura venga concentrata in una piccola regione del cielo.

La galassia di Andromeda

In una notte buia cerca la galassia di Andromeda, aiutandoti con una carta del cielo o con un'app astronomica. Se possibile, osserva la sua posizione e confrontala con quella delle stelle circostanti.

Andromeda è una grande galassia a spirale vicina alla Via Lattea, ma si trova comunque a circa 2,5 milioni di anni luce. La sua luce ha quindi impiegato milioni di anni per raggiungerci: osservandola, vediamo la galassia com'era nel lontano passato.

Le galassie sono lontanissime

Osserva immagini di galassie a distanze diverse e confronta le loro dimensioni ap-

parenti. Prova a capire quali sembrano più grandi e quali più piccole.

Una galassia può apparire molto piccola non perché sia poco estesa, ma perché si trova a una distanza enorme. La luce che osserviamo ci permette quindi di studiare oggetti che si trovano a milioni o miliardi di anni luce dalla Terra.

Una galassia nel cielo

Cerca, con una mappa del cielo o un'app astronomica, una galassia osservabile dalla tua zona. Se possibile, prova a osservarla con un binocolo o un piccolo telescopio.

Una galassia contiene un numero enorme di stelle, insieme a gas, polveri e materia oscura. A causa delle enormi distanze, però, una galassia lontana appare spesso soltanto come una piccola macchia luminosa.

Le galassie nel cielo

Osserva una fotografia profonda del cielo, ottenuta con un telescopio. Cerca di distinguere le stelle della nostra galassia dalle piccole macchie luminose che corrispondono a galassie lontane.

In una piccola regione del cielo possono comparire moltissime galassie. Questo ci mostra che la Via Lattea è soltanto una delle innumerevoli galassie che popolano l'Universo.

Guardare galassie significa guardare nel passato

Osserva immagini di galassie poste a distanze sempre maggiori dalla Terra. Confronta quanto sono lontane e chiediti quanto tempo abbia impiegato la loro luce ad arrivare fino a noi.

La luce viaggia a velocità finita. Per questo una galassia lontana milioni o miliardi di anni luce viene osservata com'era milioni o miliardi di anni fa: più lontano guardiamo, più indietro nel tempo vediamo.

Le stelle che non vediamo

Osserva il cielo da un luogo buio e poi confrontalo con quello visto da una città o da una zona molto illuminata. Conta, anche approssimativamente, quante stelle riesci a distinguere nei due luoghi.

Le luci artificiali illuminano l'atmosfera e rendono più difficile vedere le stelle più deboli. Per questo lontano dalle città il cielo appare molto più ricco di stelle e la Via Lattea diventa più evidente.

La galassia di Andromeda

In una notte buia cerca, con l'aiuto di una mappa del cielo, la galassia di Andromeda. Osservala prima a occhio nudo, se le condizioni lo permettono, e poi con un binocolo.

La galassia di Andromeda è una delle galassie più vicine alla nostra e si trova a circa 2,5 milioni di anni luce. La sua luce ha quindi viaggiato per milioni di anni prima di raggiungere la Terra: quando la osserviamo, vediamo Andromeda com'era nel passato.

Esercizi

1 Vero o falso?

a. Le galassie sono enormi insiemi di stelle, gas, polveri e altra materia tenuti insieme dalla gravità. V F

b. Il Sole si trova al centro della Via Lattea. V F

c. La Via Lattea è una galassia a spirale barrata. V F

d. Le nebulose sono costituite esclusivamente da stelle molto giovani. V F

e. Osservare una galassia molto lontana significa osservarla esattamente come è nel momento presente. V F

[due affermazioni vere e tre false]

2 Indica la risposta corretta.

a. Che cos'è una galassia?

A Un insieme di pianeti che orbitano intorno a una stella

B Un enorme insieme di stelle, gas, polveri e altra materia tenuti insieme dalla gravità

C Una nube di gas che produce continuamente nuove stelle

D Un gruppo di sistemi solari molto vicini tra loro

b. Qual è la forma della Via Lattea?

A Ellittica

B Irregolare

C Spirale

D Spirale barrata

c. Che cosa indica un anno luce?

A Il tempo impiegato da una stella per compiere un'orbita

B La distanza percorsa dalla luce in un anno

C La distanza tra la Terra e il Sole

D Il tempo necessario alla luce per attraversare la Via Lattea

d. Quale affermazione sulla Via Lattea è corretta?

A Contiene soltanto il Sistema solare

B È larga circa 100 anni luce

C Contiene oltre 100 miliardi di stelle

D È la più grande galassia conosciuta

e. Che cosa sono le nebulose?

A Nubi di gas e polveri presenti nello spazio

B Gruppi di galassie molto lontane

C Stelle che hanno esaurito il loro combustibile

D Pianeti che stanno entrando nell'atmosfera di una stella

f. Perché osservare una galassia lontana significa anche osservare il passato?

A Perché le galassie lontane smettono di evolversi

B Perché la luce impiega molto tempo per raggiungerci

C Perché le galassie lontane sono sempre più antiche della Via Lattea

D Perché i telescopi trasformano le immagini attuali in immagini antiche

g. Che cosa può succedere quando due galassie si avvicinano?

A Si fermano entrambe nello spazio

B La loro gravità può deformarle e, nel tempo, portarle a fondersi

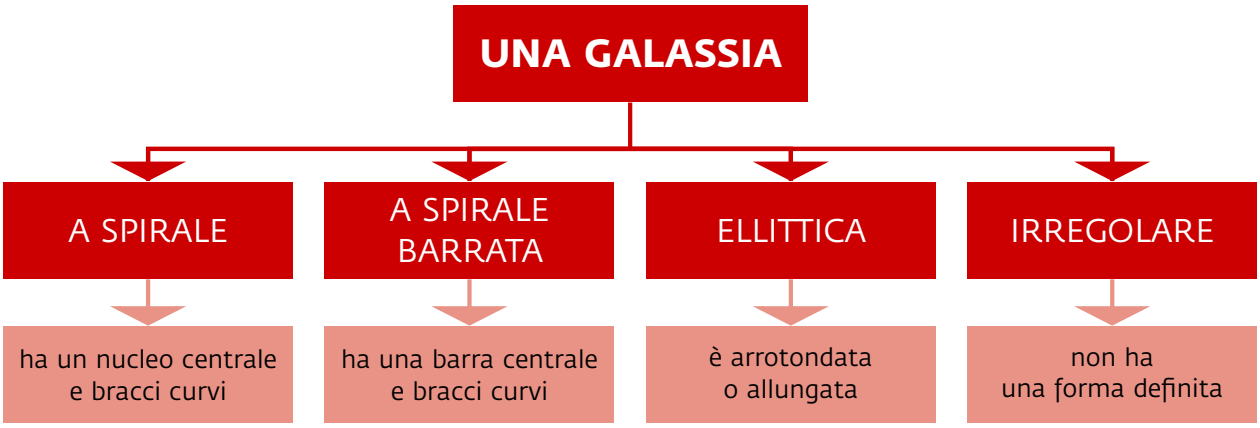
C Tutte le loro stelle si scontrano immediatamente

D Si trasformano necessariamente in due buchi neri

[due risposte A, tre B, una C e una D]

IN SINTESI

LE GALASSIE



6 L'universo

Che cosa succede quando la gravità diventa così forte da imprigionare perfino la luce? Siamo davvero soli nell'immensità dell'universo, o là fuori esistono altri mondi su cui è comparsa la vita? E, soprattutto, quale sarà il destino dell'universo? Continuerà a espandersi per sempre o arriverà un momento in cui tutto avrà fine?

In questo capitolo esploreremo alcuni degli aspetti più estremi e affascinanti del cosmo. Incontreremo i buchi neri, cercheremo le tracce di vita oltre la Terra e, infine, seguiremo l'universo nella sua storia più grande: dal Big Bang verso il suo possibile destino finale.

1 Dove Dio ha diviso per zero

I buchi neri sono gli oggetti più estremi che conosciamo. La loro gravità può diventare così intensa che, oltre una certa regione, nulla può più tornare indietro, nemmeno la luce. Per capire come sia possibile, bisogna partire da un'idea molto semplice: la gravità dipende non solo dalla massa di un corpo, ma anche da quanto quella massa è concentrata.

Biglietto di sola andata per lo spazio

Per allontanarsi da un pianeta bisogna raggiungere una certa velocità, sufficiente a vincere la sua attrazione gravitazionale. Questa è la **velocità di fuga**: sulla Terra è di circa 11 chilometri al secondo.

Quanto più un corpo è massiccio e quanto più è piccolo il suo raggio, tanto maggiore è la velocità di fuga. Se una stella molto massiccia collassa e concentra la propria massa in uno spazio sempre più piccolo, la sua attrazione gravitazionale aumenta e con essa aumenta anche la velocità necessaria per sfuggirle. A un certo punto, almeno secondo la fisica classica, la velocità di fuga potrebbe raggiungere la velocità della luce. Ma la luce non può andare più veloce della luce.

È qui che la storia diventa interessante: non siamo più davanti a un corpo da cui è semplicemente difficile scappare. Siamo davanti a una regione da cui, una volta entrati, **non si può più uscire**.

Aspirapolveri cosmici

Dato che la teoria della relatività di Einstein stabilisce che nessun oggetto può muoversi a una velocità maggiore di c, quando un corpo raggiunge una densità sufficiente la sua gravità può diventare così intensa da impedire persino alla luce di allontanarsi. Si è formato un **buco nero**, una regione dello spazio dalla quale nulla può più uscire.

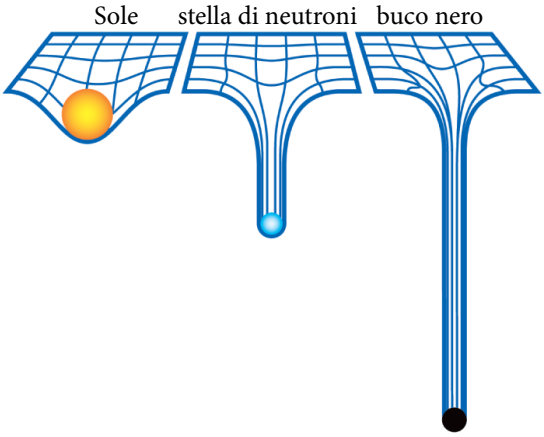
John Wheeler diceva scherzosamente che «i buchi neri non hanno i capelli»: una volta oltrepassato il loro confine, non possiamo più ricevere informazioni dall'interno. «I buchi neri si trovano dove Dio ha diviso per zero», ironizzava Steven Wright, giocando sul fatto che, secondo la relatività generale, la descrizione della gravità conduce a condizioni estreme al centro del buco nero.

Il confine oltre il quale nulla può più tornare indietro è chiamato **orizzonte degli eventi**. La dimensione di questa regione dipende dalla massa del buco nero ed è descritta, per un buco nero non rotante, dal cosiddetto **raggio di Schwarzschild**, dal nome del fisico Karl Schwarzschild.

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

La formula mostra una cosa sorprendente: qualsiasi oggetto può diventare un buco nero, se tutta la sua massa viene compressa entro un raggio sufficientemente piccolo. Per il Sole basterebbero circa tre chilometri. Per la Terra, appena nove millimetri.

L'idea che potessero esistere stelle così dense da trattenere persino la luce fu proposta già nel 1783 da John Michell. L'esistenza dei buchi neri fu poi prevista dalla teoria della relatività generale di Einstein, attraverso le cui equazioni Schwarzschild trovò nel 1916 la prima soluzione che descriveva un oggetto di questo tipo. Per molto tempo, però, i buchi neri furono considerati soprattutto una curiosità matematica.



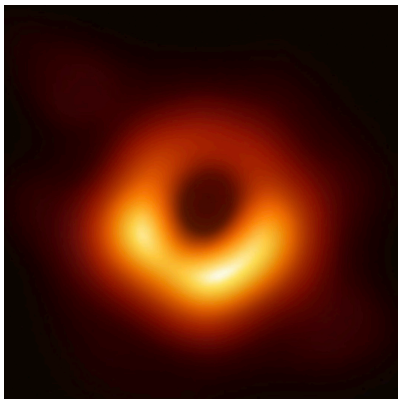
▲ **Figura 1**
La gravità curva lo spazio.tempo: dal Sole a una stella di neutroni, fino a un buco nero diventa sempre più estrema.

Le osservazioni hanno cambiato completamente la situazione. Nel 1964 fu individuata Cygnus X-1, una sorgente nella costellazione del Cigno che fornì una delle prime forti evidenze dell'esistenza di un buco nero. Il termine «buco nero» fu coniato da John Wheeler nel 1967. Cygnus X-1 fu anche al centro di una famosa scommessa tra Stephen Hawking e Kip Thorne: Hawking aveva scommesso che non fosse un buco nero e, quando le evidenze andarono nella direzione opposta, riconobbe la sconfitta pagando al collega l'abbonamento a *Penthouse* per un anno.

Dato che i buchi neri non emettono luce, gli astrofisici devono individuarli osservando gli effetti che producono sull'ambiente circostante. Per esempio, studiando stelle che orbitano attorno a un centro invisibile, è possibile dedurre la presenza di un oggetto estremamente massiccio e compatto.

Un'altra possibilità è osservare la materia che cade verso il buco nero. Gas e polveri possono formare un vortice incandescente, un **disco di accrescimento**, che emette una grande quantità di radiazione mentre la materia spiraleggia verso il centro.

È così che possiamo osservare alcuni dei buchi neri più spettacolari. Nel 2019 gli scienziati hanno svelato la prima immagine dell'ombra di un buco nero, quello supermassiccio al centro della galassia M87, nella costellazione della Vergine (figura 2). La sua massa è circa 6,6 miliardi di volte quella del Sole e si trova a circa 56 milioni di anni luce dalla Terra.



▲ **Figura 2**
La «foto del secolo»: il buco nero M87 nella Galassia della Vergine fotografato dall'Event Horizon Telescope.

L'immagine è stata ottenuta dall'*Event Horizon Telescope*, una rete internazionale di radiotelescopi sparsi in tutto il mondo e sincronizzati per funzionare come un unico telescopio grande quanto la Terra. Nel 2022 la stessa collaborazione ha prodotto l'immagine di Sagittarius A*, il buco nero supermassiccio al centro della Via Lattea, a circa 25 mila anni luce da noi.

Oggi sappiamo che i buchi neri sono molto più comuni di quanto si pensasse un tempo e ne osserviamo di masse molto diverse. Sono diventati uno degli strumenti più importanti per studiare la gravità nelle condizioni più estreme e per mettere alla prova le nostre idee sulla natura dello spazio e del tempo.

Non è un caso che il premio Nobel per la fisica del 2020 sia stato assegnato a Roger Penrose, Reinhard Genzel e Andrea Ghez per i loro contributi alla comprensione dei buchi neri e del centro della nostra galassia.

2 Siamo soli nell'universo?

L'universo contiene un numero sterminato di stelle e pianeti, eppure finora abbiamo trovato la vita solo sulla Terra. Questa semplice constatazione lascia aperta una delle domande più profonde della nostra esplorazione del cosmo: la vita è comparsa una sola volta, oppure è una conseguenza più comune di quanto immaginiamo?

Un universo pieno di possibilità

Dopo aver attraversato l'universo dall'inizio alla fine, rimane una domanda piuttosto imbarazzante: **siamo soli?**

La domanda non è nuova. Da quando abbiamo capito che le stelle sono altri soli e che il nostro Sole è una stella come tante, è diventato difficile evitare di chiedersi se, da qualche parte, esista un altro pianeta su cui qualcuno stia facendo la stessa domanda.

Per molto tempo non abbiamo avuto nemmeno la certezza che esistessero pianeti al di fuori del sistema solare. Oggi sappiamo che ce ne sono a migliaia e che la loro formazione è un fenomeno comune. Se una stella può avere pianeti e nell'universo ci sono centinaia di miliardi di galassie, ciascuna con centinaia di miliardi di stelle, il

numero dei possibili mondi è così grande che scriverlo per esteso sarebbe un buon sistema per sprecare carta.

Ma avere un pianeta non significa avere la vita. E avere la vita non significa avere qualcuno con cui parlare.

La ricetta della vita

Sulla Terra la vita è comparsa almeno tre miliardi e mezzo di anni fa, quando il nostro pianeta era ancora giovane. Da allora ha avuto a disposizione un'enorme quantità di tempo per evolversi, sperimentando soluzioni che vanno dai batteri alle balene, dagli alberi agli esseri umani.

Ma non sappiamo ancora quanto sia difficile il primo passo: quello che trasforma la materia non vivente in materia capace di riprodursi, evolversi e adattarsi. Gli ingredienti di base, in compenso, non sembrano essere particolarmente esotici. Carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto e altri elementi indispensabili alla chimica della vita si trovano nello spazio. Molecole organiche sono state osservate nelle nubi interstellari e nei meteoriti. L'acqua, poi, è tutt'altro che rara.

Il problema è capire se, date le condizioni giuste, la vita sia una conseguenza quasi inevitabile della chimica oppure un evento straordinariamente improbabile. Abbiamo un solo esempio a disposizione: **la Terra**. È un po' come cercare di capire quanto sia facile vincere alla lotteria avendo a disposizione un solo biglietto vincente.

L'equazione di Drake

Nel 1961 l'astronomo Frank Drake provò ad affrontare il problema in modo quantitativo. Immaginò di poter stimare il numero di civiltà della nostra galassia abbastanza evolute da comunicare con noi moltiplicando una serie di fattori:

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c L$$

dove R_* è il tasso di formazione delle stelle, f_p la frazione di stelle che hanno pianeti, n_e il numero di pianeti potenzialmente abitabili per ciascun sistema planetario, e gli altri fattori descrivono la probabilità che su questi mondi compaia la vita, che sviluppi un'intelligenza, che produca una civiltà capace di comunicare e, infine, che questa civiltà sopravviva abbastanza a lungo da poter essere incontrata.

Il bello dell'**equazione di Drake** è che non serve tanto a ottenere un numero preciso, quanto a capire da quali domande dipenda la risposta. Il brutto è che, quando Drake la propose, non conoscevamo praticamente nessuno dei fattori dell'equazione.

Oggi la situazione è migliorata. Sappiamo che i pianeti sono comuni. Abbiamo scoperto mondi rocciosi e pianeti che orbitano nella cosiddetta **zona abitabile**, la regione attorno a una stella nella quale, almeno in linea di principio, può esistere acqua liquida sulla superficie. Ma i fattori più importanti restano avvolti nel mistero. Non sappiamo quanto sia probabile che nasca la vita. Non sappiamo quanto sia probabile che evolva un'intelligenza tecnologica. E soprattutto non sappiamo quanto a lungo una civiltà possa sopravvivere.

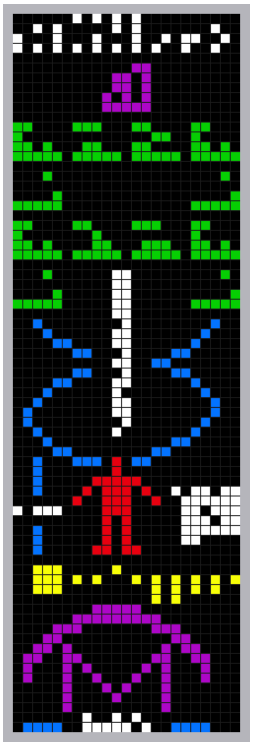
L'equazione di Drake, insomma, è un modo elegante per trasformare la nostra ignoranza in una lista di domande.

Dove sono tutti?

Se l'universo è così grande e ha avuto così tanto tempo a disposizione, perché non abbiamo ancora trovato nessuno? Nel 1950 il fisico Enrico Fermi se lo chiese durante una conversazione con alcuni colleghi. La domanda è passata alla storia con una formulazione semplicissima: «Dove sono tutti?». È il **paradosso di Fermi**.

Una civiltà tecnologica abbastanza avanzata potrebbe, almeno in teoria, diffondersi nella galassia in un tempo molto più breve dei miliardi di anni che abbiamo a disposizione. Se altre civiltà fossero nate prima della nostra e avessero avuto un vantaggio di milioni o addirittura miliardi di anni, dovremmo aspettarci di vedere qualche traccia della loro presenza. E invece il cielo tace.

Non significa necessariamente che siamo soli. Potremmo essere circondati da civiltà che non sappiamo riconoscere. Potrebbero comunicare in modi che non siamo ancora in grado di intercettare. Potrebbero essere troppo lontane. Potrebbero essere già scomparse. Oppure potrebbero non essere mai esistite.



▲ **Figura 3**
Nel 1974 gli scienziati inviarono nello spazio un messaggio per gli alieni: l'immagine raffigurava la doppia elica del DNA, un uomo, il sistema solare e un telescopio.

Ascoltare il cielo

Per scoprirlo abbiamo cominciato ad ascoltare. Dal 1960 diversi programmi scientifici hanno cercato segnali artificiali provenienti da altre stelle, in particolare onde radio che mostrino caratteristiche difficilmente spiegabili con un fenomeno naturale.

L'idea è semplice: se una civiltà tecnologica vuole farsi sentire, potrebbe utilizzare le onde elettromagnetiche per trasmettere informazioni nello spazio. Ma lo spazio è un posto molto rumoroso. Le stelle emettono radiazione, le galassie producono onde radio, le pulsar battono come fari cosmici e persino le apparecchiature terrestri possono produrre segnali capaci di confondere le osservazioni.

Per questo la ricerca di vita extraterrestre non consiste nel puntare un'antenna verso il cielo e aspettare che qualcuno dica «ciao». È un lavoro molto più paziente: osservare, filtrare, confrontare, verificare e soprattutto cercare di capire se un segnale abbia una spiegazione naturale.

Finora non abbiamo ricevuto una telefonata da E.T. Ma abbiamo appena cominciato ad ascoltare (figura 3).

Non cercare gli alieni: cerca la vita

C'è poi un modo ancora più prudente per affrontare la domanda. Invece di cercare civiltà extraterrestri, possiamo cercare **vita extraterrestre**.

Un batterio su Marte sarebbe già una scoperta straordinaria. Una traccia biologica nell'atmosfera di un pianeta lontano lo sarebbe altrettanto. Alcuni gas, infatti, possono essere prodotti da processi biologici e, se osservati nella giusta combinazione, potrebbero diventare una sorta di impronta digitale della vita.

I telescopi moderni possono analizzare la luce proveniente dalle atmosfere dei pianeti extrasolari e cercare proprio queste tracce. È una ricerca difficilissima. Un pianeta può avere un'atmosfera strana per molte ragioni che non hanno nulla a che vedere con la vita, e distinguere una vera **biosignatura** da un semplice fenomeno chimico non è affatto facile. Ma sarebbe sufficiente una sola scoperta. Perché trovare la vita una seconda volta cambierebbe per sempre il significato della prima.

La domanda più importante

Se un giorno trovassimo vita su un altro mondo, scopriremmo che la vita non è un fenomeno unico. Avremmo due esempi indipendenti di pianeti sui quali la materia ha trovato un modo per organizzarsi, riprodursi ed evolvere. Sarebbe una delle scoperte più importanti nella storia della scienza.

Trovare una civiltà tecnologica sarebbe ancora più straordinario. Potremmo scoprire che altre civiltà sono esistite prima di noi, che alcune sono ancora attive oppure che l'intelligenza tecnologica è molto più rara di quanto immaginiamo. Potremmo anche non trovare mai nessuno.

Per ora, infatti, l'unica risposta possibile alla domanda «siamo soli?» è semplice: **non lo sappiamo**.

Sappiamo però che la Terra non è un luogo separato dal resto del cosmo. Gli elementi che compongono il nostro pianeta e il nostro corpo sono stati prodotti attraverso la storia delle stelle, e la vita è comparsa in un universo molto più antico della Terra. Cercare altre forme di vita significa quindi cercare di capire quanto sia comune, nell'universo, il percorso che ha portato fino a noi.

La ricerca continua. E per capire da dove veniamo, prima di chiederci dove potremmo andare, dobbiamo tornare all'inizio della storia dell'universo.

3 Dal Big Bang al grande freddo

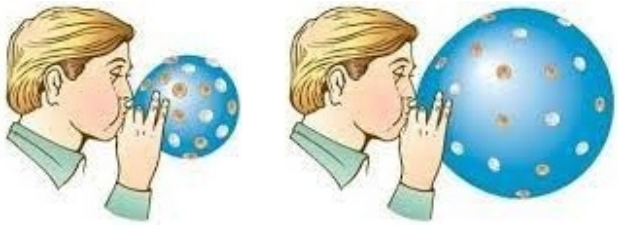
«Non penserete davvero che l'universo sia nato con un **grande botto**?». Con queste parole, pronunciate nel 1949 durante una trasmissione radiofonica della BBC, l'astronomo Fred Hoyle introdusse per la prima volta l'espressione Big Bang. Hoyle ironizzava così sull'idea che l'universo fosse il risultato dell'espansione di materia ed energia a partire da una singolarità iniziale.

In principio era Einstein

La storia della teoria del Big Bang inizia nel 1916, quando Albert Einstein formulò la teoria della relatività generale. Einstein si rese subito conto che le sue equazioni prevedevano che l'universo fosse destinato a espandersi o a collassare su sé stesso. Una conclusione che contrastava con l'idea allora consolidata che l'universo fosse stazionario: che non avesse, cioè, né inizio né fine. Einstein corse ai ripari e nel 1917 modificò le sue equazioni introducendo una costante, detta **costante cosmologica**, che permetteva di ottenere un universo stazionario. «**Fu l'errore più grande della mia vita**», ammetterà Einstein anni dopo.

Il «grande botto»

Il primo a risolvere le equazioni di Einstein così com'erano fu un matematico, Aleksandr Fridman, che nel 1922, ignorato da tutti, previde un universo in espansione. Nel 1927 un altro matematico, Georges Lemaître, riscoprì le soluzioni di Friedman e concluse che, se l'universo si espande, allora all'inizio dei tempi tutta la materia doveva essere raggruppata in un punto, una specie di "atomo primordiale". Era nata la teoria del Big Bang, ma ci sarebbero voluti più di vent'anni perché gli scienziati la prendessero sul serio (Lemaître era un sacerdote, e la sua teoria sembrava troppo simile alla Genesi biblica).



(a) I punti disegnati sul palloncino rappresentano le galassie dell'universo.

(b) Se gonfiamo il palloncino, le "galassie" si allontanano le une dalle altre.

▲ **Figura 4**
Rappresentazione della legge di Hubble.

Due anni più tardi, nel 1929, l'astronomo (e pugile) Edwin Hubble scoprì che le galassie si allontanano progressivamente l'una dall'altra In formule, la **legge di Hubble** stabilisce che

$$v = H\,d$$

dove v è la velocità allontanamento tra due galassie, d la loro distanza reciproca e H è una costante, detta **costante di Hubble**, che vale circa 70 km al secondo per megaparsec (un parsec è pari a circa 3,26 anni luce). Per capire il fenomeno, immaginiamo di disegnare dei punti su un palloncino sgonfio: i punti saranno vicini, ma gonfiando il palloncino la sua superficie si espande e i punti si allontanano. Nell'universo accade qualcosa di simile: l'universo sta al palloncino come le galassie stanno ai punti (figura 4).

Se consideriamo l'universo che si espande con velocità v, possiamo risalire nel tempo fino al momento in cui era concentrato in un unico punto. L'inverso di H fornisce così una stima del tempo trascorso dal Big Bang fino a oggi, cioè dell'età dell'universo, che risulta essere di circa 14 miliardi di anni.

Alfa, beta, gamma

Nel 1948 il fisico George Gamow si chiese se le condizioni estreme, per densità e temperatura, dell'universo primordiale potessero spiegare il fatto che la massa dell'universo è formata per circa un quarto da elio (un gas così chiamato perché scoperto nel Sole, nella seconda metà dell'Ottocento): una percentuale troppo alta per pensare che sia stata prodotta dalle stelle.

Assieme a un suo studente, Ralph Alpher, Gamow dimostrò che la sua idea ara giusta, segnando un altro punto a favore della teoria del Big Bang. Gamow, a cui non mancava il senso dell'umorismo, invitò il fisico Hans Bethe, che pure non vi aveva contribuito, a condividere la scoperta. L'articolo fu firmato con le prime tre lettere dell'alfabeto greco: alfa, beta, gamma, una sorta di ABC delle origini.

Gamow non si limitò a studiare la materia: intuì che l'esplosione iniziale dell'universo doveva aver lasciato una traccia sotto forma di radiazione cosmica di fondo. Attenuata, raffreddata, ma presente. È come trovarsi in un forno che si è raffreddato dopo essere stato caldo e incandescente, restando appena tiepido.

La conferma arrivò anni dopo, grazie ad Arno Penzias e Robert Wilson, due ingegneri della Bell Telephone, il gigante americano delle telecomunicazioni. Nel 1964 i due stavano sperimentando un'antenna per trasmettere segnali radiotelevisivi via satellite. L'antenna si trovava in campagna, perché fosse lontana da disturbi. Eppure un disturbo c'era, un rumore di fondo che non riuscivano a eliminare. Disperati, i due finirono addirittura per incolpare dei **piccioni** che avevano fatto il nido sull'antenna. Poi però capirono di aver trovato, per caso, l'eco del Big Bang, **il primo vagito dell'universo**: la misteriosa radiazione cosmica di fondo. La scoperta era un nuova prova a favore della teoria. Prova che avrebbe portato Penzias e Wilson al premio Nobel, nel 1978.

Fiat lux!

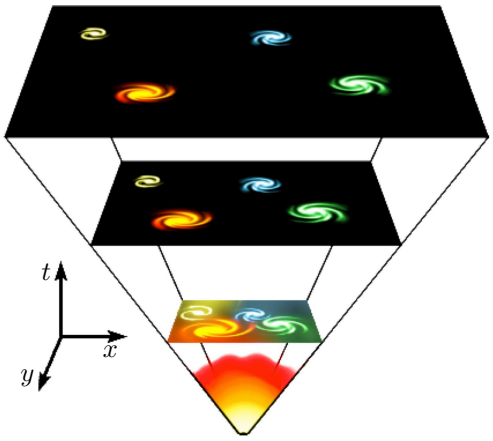
Per tracciare le tappe essenziali nella storia dell'universo partiamo proprio dal Big Bang. All'inizio c'era un **buio pesto**. Non perché mancassero i fotoni, che si erano formati insieme alla materia, ma perché questi si scontravano continuamente con gli elettroni, stretti l'uno all'altro come acciughe in una scatola. Una frazione di secondo dopo l'esplosione iniziale, l'universo iniziò ad espandersi, passando da un punto a una dimensione grande quanto una mela. Un minuto dopo, la temperatura era ancora così alta che i nuclei di idrogeno, cioè i protoni, cominciarono a fondersi formando l'elio.

Circa 380 mila anni dopo il Big Bang, l'universo, che si era espanso alla velocità della luce, si lasciò finalmente vedere: le sue dimensioni erano appunto di 380 mila anni luce. Con queste dimensioni un po' allargate, infatti, gli elettroni potevano essere catturati dai protoni e legarsi insieme a formare l'idrogeno, l'elemento più diffuso dell'universo. I fotoni non erano dunque più costretti a rimbalzare continuamente sugli elettroni presenti e potevano uscire, seguendo lo spazio che si espandeva: è il famoso *fiat lux* («sia fatta la luce») della Genesi.

Polvere (di stelle) sei...

Nove miliardi di anni fa nacque la nostra galassia, la Via Lattea, insieme alle stelle che hanno forgiato gli atomi di cui siamo fatti. Quando una stella muore, infatti, espelle gli strati più esterni, che non le servono più, soffiando via gli elementi che ha prodotto con le sue reazioni termonucleari. Questi elementi daranno origine a nuove stelle e a nuovi pianeti su cui, se il caso vuole, si svilupperà la vita. Proprio come è successo qui sulla Terra (figura 5).

«**Siamo fatti della stessa materia delle stelle**», scriveva Carl Sagan. «Le stelle sono dentro di noi: l'azoto nel nostro DNA, il calcio nei nostri denti, il ferro nel nostro sangue e il carbonio nella nostra torta di mele. Siamo l'incarnazione locale di un cosmo cresciuto fino all'autocoscienza. Abbiamo iniziato a capire le nostre origini: **siamo materia stellare che medita sulle stelle**».



▲ **Figura 5**
Rappresentazione artistica che illustra l'espansione di una porzione di un universo bidimensionale.

Cinque miliardi di anni, fa si formò il sistema solare. Dopo un miliardo di anni, la Terra iniziò a raffreddarsi: si formarono la crosta e gli oceani, e apparvero le prime forme di vita.

Poi, due miliardi e mezzo di anni fa, sul nostro pianeta accadde un evento drammatico. In quel periodo l'atmosfera terrestre era formata da azoto e anidride carbonica. Sulla Terra non c'erano né piante né animali, ma solo organismi microscopici, in grado di sopravvivere in assenza di ossigeno. Fu allora che apparvero i cianobatteri, specie di alghe verdi e azzurre che popolarono le acque degli oceani. Queste alghe inspiravano anidride carbonica ed espiravano ossigeno, che era tossico per quasi tutte le altre forme di vita allora presenti. L'aumento di ossigeno provocò la prima grande estinzione di massa nella storia della Terra, nota come **catastrofe dell'ossigeno**, e portò alla nascita di organismi capaci di vivere in presenza di ossigeno, gettando le basi delle attuali forme di vita. Circa 300 milioni di anni fa sulla Terra apparve la Pangea, il supercontinente che includeva tutte le terre emerse e che, disgregandosi, avrebbe generato i continenti attuali.

Circa 65 milioni di anni fa ci fu il **grande impatto**, uno degli eventi più catastrofici della storia del nostro pianeta. Probabilmente era una bella giornata, perché il clima del Cretaceo era mite. D'estate, la temperatura della superficie marina superava i 38 gradi, più che in molte piscine riscaldate. Non c'erano occhi umani in grado di testimoniare il cataclisma di quel giorno, ma dev'essere stato uno spettacolo impressionante. Una palla di fuoco solcò il cielo e un meteorite grande come una città precipitò sulla penisola dello Yucatàn, in Messico, lasciando una fossa enorme, nota come cratere di Chicxulub. L'impatto ebbe una potenza di 100 miliardi di tonnellate di tritolo, pari

a **due milioni di bombe** come quella più potente mai fatta esplodere dall'uomo, che esplosero tutte contemporaneamente nello stesso posto.

La forza dell'impatto disintegrò il meteorite: innumerevoli frammenti di roccia furono espulsi dal cratere e scagliati nell'atmosfera, raggiungendo luoghi distanti migliaia di chilometri dal luogo della collisione. Ricadendo al suolo, i detriti si trasformarono in una pioggia di proiettili incandescenti. Una gigantesca nube di polvere avvolse l'intero pianeta. Ne seguì un gelido inverno nucleare che spazzò via il 70 per cento delle specie sul pianeta e mise fine al regno dei dinosauri, che era durato 160 milioni di anni.

Sei milioni di anni fa gli antenati degli scimpanzé e quelli dell'uomo separarono i loro percorsi evolutivi: quattro milioni di anni dopo vide la luce il genere umano, con la specie *Homo habilis* e poi, 200 mila anni fa, comparve finalmente l'*homo sapiens*, la nostra specie.

Quale sarà il futuro dell'universo, della Terra e di noi? Gli scienziati qualche idea se la sono fatta. (**Avvertenza**: le informazioni che seguono potrebbero turbare i più sensibili. L'autore declina ogni responsabilità.)

...e polvere ritornerai

Il destino del Sole, e quindi della Terra, è tra i più certi. Abbiamo studiato molte stelle simili al nostro Sole e conosciamo bene le loro fasi evolutive. La vita del Sole dura circa dieci miliardi di anni. Nato cinque miliardi di anni fa, è diventato sempre più luminoso. Inizialmente brillava al 70% dell'attuale intensità e alla fine sarà tre volte più luminoso di oggi. Una stella come il Sole, infatti, resta in equilibrio grazie all'energia prodotta nel nucleo, che contrasta la gravità che vorrebbe farla collassare. Con il tempo, il combustibile nucleare si consuma, la stella si contrae e brucia più intensamente. Questo aumento di luminosità avrà conseguenze catastrofiche per la vita sulla Terra. Anche se i problemi inizieranno molto prima, per la delicatezza dell'equilibrio chimico-fisico di cui la vita ha bisogno.

Tra un miliardo di anni il Sole sarà il 10 per cento più luminoso di oggi, con effetti devastanti sul nostro pianeta. L'evaporazione degli oceani aumenterà, saturando l'atmosfera di vapore acqueo e moltiplicando l'effetto serra: il calore solare intrappolato renderà il clima sempre più estremo. **Gli oceani bolliranno**, alimentando un circolo vizioso di calore e evaporazione. Entro tre miliardi di anni, con un Sole quasi due volte più luminoso, l'acqua liquida scomparirà del tutto dalla superficie terrestre. L'atmosfera diventerà una fornace soffocante, con temperature intorno ai mille gradi, ben oltre quelle già infernali di Venere. **Ogni forma di vita finirà**. La Terra, ridotta a un **sasso sterile e rovente**, continuerà a girare intorno al Sole, indifferente a quello che ha perso.

Ma anche il Sole non resterà com'è. Terminato il combustibile nel nucleo, comincerà a cambiare in modo drammatico. Si espanderà, trasformandosi in una gigante rossa. Il suo diametro crescerà fino a inglobare i pianeti più vicini. Mercurio e Venere saranno divorati. Forse la Terra verrà risparmiata dall'essere inghiottita, ma sarà completamente arsa: la sua superficie fusa, la crosta vaporizzata.

Poi il Sole perderà gran parte della sua massa, espellendo gli strati esterni nello spazio. Resterà un piccolo nucleo denso e rovente: una nana bianca, grande quanto la Terra ma con metà della massa originaria del Sole. Intorno a lei orbiteranno i resti del sistema solare: pianeti ghiacciati, lune deserte, asteroidi dispersi. La luce si affievolirà lentamente, per miliardi di anni, finché anche la nana bianca si raffredderà, spegnendosi.

E l'uomo? Per sopravvivere oltre la vita della Terra, l'umanità dovrà compiere un salto evolutivo: diventare una civiltà interstellare. Questo significa colonizzare pianeti situati al di fuori del sistema solare, trovare nuovi mondi abitabili, costruire ecosistemi artificiali, adattarsi a condizioni aliene.

L'idea di posare il piede su pianeti lontani, dopo aver viaggiato a bordo di un'astronave, si ritrova spesso nella fantascienza, ma ha affascinato anche molti scienziati. Tuttavia, la possibilità di raggiungere altre stelle è frenata dalle **enormi distanze**. Per esempio, la stella più vicina alla Terra, Proxima Centauri, dista quattro anni luce da noi. Per raggiungerla con la tecnologia attuale occorrerebbero 80 mila anni. Per rendere il viaggio fattibile in pochi decenni bisognerà costruire un'astronave che si avvicini il più possibile alla velocità della luce, che è la velocità massima raggiungibile in natura. Ma anche così, viaggi di questo tipo sarebbero lunghissimi. In termini astronomici, Proxima Centauri si trova dietro l'angolo di casa nostra. Basta pensare che la nostra galassia ha un diametro di oltre 100 mila anni luce.

Per sostenere gli esseri umani durante viaggi nello spazio così lunghi dovremmo costruire un'astronave abbastanza grande da fornire un sistema ecologico di animali e piante completamente rinnovabile. D'altra parte, l'astronave dovrebbe essere abbastanza piccola da riuscire a raggiungere una velocità sufficientemente alta, per ridurre i tempi di esposizione dei viaggiatori alla radiazione cosmica e la possibilità di guasti. Questo circolo vizioso rende il progetto molto difficile, con possibilità di successo esigue.

Finirà anche quella minuscola porzione dell'universo che chiamiamo casa: la Via Lattea, la nostra galassia. Si muove a oltre 500 chilometri al secondo, lanciata nel buio cosmico verso una direzione ignota. Ma anche la nostra vicina più prossima, la galassia di Andromeda, è in movimento. Si trova a poco più di due milioni di anni luce da noi, e si sta dirigendo proprio verso la Via Lattea. Fra circa quattro miliardi di anni, le due galassie si scontreranno. Non ci saranno esplosioni spettacolari o cieli in fiamme: le galassie, per quanto piene di stelle, sono quasi del tutto vuote. Lo spazio tra le stelle è così vasto che, nella maggior parte dei casi, non ci saranno collisioni dirette tra corpi celesti. Il risultato sarà comunque radicale. Dopo un lento processo durato circa due miliardi di anni, le due galassie si fonderanno in una nuova struttura, più grande e più massiccia. Sarà la fine della Via Lattea, almeno per come la conosciamo oggi.

That's all, folks!

E l'universo? Come e quando finirà? L'universo è in continua espansione, e lo fa sempre più in fretta. Quando avrà il doppio dell'età attuale, le distanze cosmiche saranno più che raddoppiate. Quando avrà il triplo dell'età, saranno più che triplicate, e così via, in una fuga senza fine. Se ci fossimo ancora, assisteremmo a uno spettacolo deso-

lante: le galassie svanirebbero una dopo l'altra, trascinate oltre l'orizzonte osservabile. Il cielo diventerebbe sempre più vuoto, più silenzioso, più buio. L'universo, un tempo pieno di luce, finirebbe nella solitudine e nel gelo.

Finiranno anche le stelle. Alla fine della loro vita, ogni stella lascia dietro di sé solo una piccola parte della massa originaria, sotto forma di resti inerti: nane bianche, stelle di neutroni o buchi neri. La materia disponibile per formare nuove stelle diminuirà sempre di più, finché non ne nasceranno più. Ci vorranno circa 100 mila miliardi di anni perché l'ultima stella si spenga. Da quel momento, l'universo entrerà in una lunga agonia: il **Big Freeze**. Il cosmo sarà popolato solo da oggetti spenti e buchi neri, che a loro volta evaporeranno lentamente per effetto della radiazione di Hawking, un processo quantistico, teorizzato da Stephen Hawking, secondo cui i buchi neri perdono energia emettendo particelle e, con il tempo, svaniscono. Ecco la vera **fine del mondo**. Nessuna stella, nessun pianeta, neppure buchi neri. Solo particelle elementari, perse nel buio eterno, simili a quelle comparse subito dopo il Big Bang. Un universo congelato nella sua morte termica.

Meglio non esserci, a quel punto. E se questa prospettiva ci spaventa, possiamo consolarci: sono solo teorie (ed è vero), o forse va bene così. Tanto, non possiamo impedirlo.

Domande e risposte

Quanto è grande l'universo?

Non lo sappiamo con certezza. Sappiamo però che l'universo osservabile ha un diametro di circa 93 miliardi di anni luce. E potrebbe essere molto più grande di quello che possiamo vedere.

L'universo ha un centro?

No, almeno non nel senso che immaginiamo. L'espansione avviene ovunque: ogni galassia vede le altre allontanarsi. Non c'è un punto privilegiato che possiamo indicare come "il centro dell'Universo".

L'universo ha un bordo?

Non sappiamo se l'Universo sia finito o infinito. Ma anche se fosse finito, non è detto che abbia un bordo: lo spazio potrebbe essere curvo e chiuso su sé stesso, senza un confine.

Quanto è vecchio l'universo?

Circa 13,8 miliardi di anni. È l'età che ricaviamo dalle osservazioni dell'espansione dell'universo e della radiazione cosmica di fondo.

Che cosa c'era prima del Big Bang?

Non lo sappiamo. E potrebbe essere una domanda senza senso fisico: secondo alcuni modelli, il tempo stesso ha avuto origine con il Big Bang, quindi non esisterebbe un "prima".

L'universo si sta espandendo dentro qualcosa?

No. Non è necessario immaginare un enorme spazio esterno dentro cui l'universo si allarga. È lo spazio stesso a espandersi.

Come facciamo a sapere che l'universo si espande?

La luce delle galassie lontane è spostata verso il rosso: più una galassia è lontana, più rapidamente sembra allontanarsi da noi. È uno dei segnali più importanti dell'espansione cosmica.

Perché le galassie si allontanano?

Non è semplicemente perché "volano via" nello spazio. Su grandi scale è lo spazio tra le galassie che si dilata, trascinandole con sé.

L'universo finirà?

Potrebbe continuare a espandersi per sempre. Se l'espansione continuerà come oggi, l'universo diventerà progressivamente più freddo, buio e vuoto. È lo scenario noto come morte termica dell'universo.

Che cos'è l'energia oscura?

È il nome che diamo a qualcosa che sembra provocare l'accelerazione dell'espansione dell'universo. Sappiamo che il suo effetto esiste, ma non sappiamo ancora che cosa sia realmente.

Quanti universi potrebbero esistere?

Non lo sappiamo. Alcune teorie fisiche permettono l'esistenza di molti universi, forse addirittura infiniti. Ma per ora il multiverso è un'ipotesi, non qualcosa che abbiamo osservato.

Siamo soli nell'universo?

Non lo sappiamo. Ci sono miliardi di galassie e un numero enorme di pianeti,

quindi le possibilità sono molte. Ma finora non abbiamo trovato alcuna prova certa di vita extraterrestre.

Come facciamo a cercare la vita extraterrestre?

Cerchiamo soprattutto segnali che potrebbero indicare condizioni favorevoli alla vita o la presenza di organismi. Studiamo pianeti lontani, analizziamo le loro atmosfere e ascoltiamo eventuali segnali artificiali provenienti dallo spazio.

Potremo mai viaggiare fino a un'altra stella?

Con la tecnologia attuale, i viaggi verso altre stelle sono proibitivi: anche la stella più vicina, Proxima Centauri, dista oltre quattro anni luce. Ma nuove idee sui sistemi di propulsione potrebbero, un giorno, permettere di raggiungerle.

Qual è la cosa più lontana che possiamo vedere?

Possiamo vedere la radiazione cosmica di fondo, proveniente da un'epoca in cui l'universo aveva appena 380 000 anni. È la luce più antica che possiamo osservare e ci arriva da ogni direzione del cielo.

Dai buchi neri al Big Bang

Viaggiare nell'universo con un'app

Apri un'app astronomica e cerca la Terra, il Sistema Solare e poi alcune stelle e galassie. Prova ad allontanarti sempre di più e osserva come cambia ciò che compare intorno a te.

Passando dalla Terra al Sistema Solare, dalla Via Lattea alle altre galassie, possiamo renderci conto delle enormi dimensioni dell'universo. Le app astronomiche permettono di esplorare queste distanze anche senza poterle percorrere realmente.

Guardare sempre più lontano

Con un'app o una mappa del cielo cerca oggetti sempre più lontani dalla Terra. Annota la loro distanza e confronta i valori trovati.

La luce impiega tempo per attraversare lo spazio. Per questo, osservando oggetti sempre più lontani, vediamo anche epoche sempre più antiche dell'universo.

Le galassie lontane

Cerca in un'app astronomica o in un archivio di immagini alcune galassie molto lontane. Confronta il loro aspetto e prova a ordinarle in base alla distanza.

Le galassie possono trovarsi a milioni o miliardi di anni luce dalla Terra. Osservarle significa quindi vedere la luce che hanno emesso in un passato molto lontano.

L'universo che cambia

Apri una simulazione dell'universo in espansione e fai scorrere il tempo avanti e indietro. Osserva come cambiano le distanze tra le galassie.

Le galassie, su grande scala, si allontanano tra loro perché lo spazio stesso è in espansione. In passato l'Universo era molto più caldo e denso: questa è una delle idee fondamentali alla base del Big Bang.

Il Big Bang in una simulazione

Cerca una simulazione dell'evoluzione dell'Universo e osserva le diverse fasi della sua storia. Parti dalle prime fasi e arriva fino alla formazione delle stelle e delle galassie.

Il Big Bang non fu un'esplosione avvenuta in un punto dello spazio. Fu l'inizio dell'espansione dell'universo, che da uno stato estremamente caldo e denso ha continuato a evolversi fino a raggiungere le condizioni attuali.

La radiazione fossile

Cerca una mappa della **radiazione cosmica di fondo** e osservane i colori e le piccole variazioni. Confronta la mappa con una normale fotografia del cielo stellato.

La radiazione cosmica di fondo è una debole radiazione proveniente da ogni direzione del cielo. È ciò che rimane della luce emessa quando l'universo era molto giovane, circa 380 000 anni dopo il Big Bang.

Un cielo pieno di galassie

Cerca una fotografia profonda del cielo ottenuta con un telescopio spaziale. Scegli una piccola regione dell'immagine e conta quante galassie riesci a distinguere.

In una piccola porzione di cielo possono comparire migliaia di galassie. Questo ci dà un'idea di quanto sia popolato e vasto l'universo osservabile.

Cercare un buco nero

Usa un'app astronomica o una mappa del cielo per cercare la posizione di un oggetto associato a un buco nero. Osserva le immagini disponibili e prova a capire quali elementi permettono agli astronomi di individuarlo.

Un buco nero non è direttamente visibile perché la sua gravità è così intensa che nemmeno la luce può uscire dal suo orizzonte degli eventi. Possiamo però osservare gli effetti che produce sulla materia e sulla luce che lo circondano.

Il buco nero al centro della Via Lattea

Cerca un'immagine o una simulazione del centro della Via Lattea e osserva la regione in cui si trova Sagittarius A*. Confronta la sua posizione con quella del Sistema Solare nella galassia.

Al centro della Via Lattea si trova un enorme buco nero supermassiccio chiamato **Sagittarius A***. Il Sistema Solare si trova molto lontano dal centro galattico, in una regione periferica del disco della Via Lattea.

Vedere un buco nero

Cerca un'immagine della regione che circonda un buco nero e osserva la forma dell'anello luminoso. Prova a distinguere la zona luminosa dalla regione centrale più scura.

Il buco nero non è ciò che vediamo direttamente nell'immagine. La luce proviene invece dal gas molto caldo che gli orbita attorno, mentre la regione scura centrale è collegata all'ombra del buco nero e alla curvatura della luce causata dalla sua gravità.

Quando le stelle diventano buchi neri

Usa una simulazione dell'evoluzione stellare e segui la vita di una stella molto massiccia. Osserva cosa può accadere alla stella nelle fasi finali della sua evoluzione.

Le stelle molto massicce possono terminare la loro vita con una gigantesca esplosione, una **supernova**. Se il nucleo che rimane è abbastanza massiccio, può collassare fino a formare un buco nero.

L'universo osservabile

Cerca una rappresentazione dell'universo osservabile e prova a confrontare la distanza delle galassie più lontane con quella della Via Lattea. Osserva quanto rapidamente aumentano le distanze passando da una scala all'altra.

L'universo osservabile è soltanto la parte dell'universo da cui la luce ha avuto il tempo di raggiungerci. Non significa necessariamente che oltre quel limite non esista altro: significa che, da qui, non possiamo ancora ricevere informazioni provenienti da regioni più lontane.

Buchi neri

1 **Vero o falso?**

a. La velocità di fuga dalla superficie terrestre è di circa 11 km/s. V F

b. Se la massa di un corpo rimane costante ma il suo raggio diminuisce, la velocità di fuga diminuisce. V F

c. Il raggio di Schwarzschild di un buco nero dipende dalla sua massa. V F

d. L'orizzonte degli eventi è una superficie solida che delimita il buco nero. V F

e. La luce che attraversa verso l'esterno l'orizzonte degli eventi può raggiungere un osservatore lontano. V F

[Due affermazioni vere e tre false]

2 **Vero o falso?**

a. Un disco di accrescimento può emettere grandi quantità di radiazione. V F

b. Un buco nero può essere individuato osservando il moto delle stelle che gli orbitano attorno. V F

c. Il raggio di Schwarzschild del Sole è di circa 3000 km. V F

d. Il raggio di Schwarzschild della Terra è di circa 9 mm. V F

e. Un buco nero può essere osservato direttamente attraverso la luce proveniente dal suo interno. V F

[Tre affermazioni vere e due false]

3 Indica la risposta corretta.

a. Che cosa succede alla velocità di fuga se la massa di un corpo rimane costante ma il suo raggio diminuisce?

A diminuisce
B rimane invariata
C aumenta
D diventa nulla

b. Che cos'è l'orizzonte degli eventi di un buco nero?

A la superficie solida del buco nero
B il confine oltre il quale nessun segnale può raggiungere l'esterno
C il disco di gas che circonda il buco nero
D il punto in cui la gravità diventa nulla

c. Come possiamo individuare un buco nero che non emette luce?

A osservando gli effetti della sua gravità sulla materia circostante
B misurando direttamente la temperatura della sua superficie
C osservando la luce proveniente dal suo interno
D cercando una regione completamente priva di gravità

d. Nella formula

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

che cosa rappresenta M?

A la velocità della luce
B la massa del corpo
C il raggio del corpo
D la costante di gravitazione universale

e. Che cosa può formare la materia che cade verso un buco nero?

A un disco di accrescimento
B un pianeta roccioso
C una nuova stella di neutroni
D una galassia

f. Che cosa osservò l'Event Horizon Telescope nel 2019?

A la superficie del buco nero di M87
B l'ombra del buco nero supermassiccio di M87
C una stella all'interno del buco nero
D la luce emessa dall'interno del buco nero

g. Quale grandezza compare al numeratore della formula del raggio di Schwarzschild?

A la massa del buco nero

B la velocità della luce

C il quadrato della velocità della luce

D la temperatura del buco nero

[tre risposte A, due B, due C e nessuna D]

4 Il raggio di Schwarzschild del Sole è circa 3 km. Quale sarebbe il raggio di Schwarzschild di un oggetto con una massa pari a 10 volte quella del Sole? [30 km]

5 Se tutta la massa terrestre fosse compressa entro un raggio inferiore a 9 mm, che cosa diventerebbe la Terra? [un buco nero.]

6 La massa di Giove è circa 318 volte quella della Terra. Se il raggio di Schwarzschild della Terra è circa 9 mm, quale sarebbe quello di Giove? [circa 2,9 m]

7 Una stella ha una massa pari a 5 volte quella del Sole. Sapendo che il raggio di Schwarzschild del Sole è circa 3 km, quale sarebbe quello della stella? [15 km]

Siamo soli nell'universo?

8 **Vero o falso?**

a. I pianeti che orbitano attorno a stelle diverse dal Sole sono chiamati esopianeti. V F

b. La Terra è l'unico pianeta conosciuto sul quale esiste la vita. V F

c. L'equazione di Drake permette di conoscere con certezza il numero di civiltà tecnologiche presenti nella Via Lattea. V F

d. Il paradosso di Fermi riguarda l'apparente assenza di evidenze di civiltà extraterrestri nonostante l'enorme numero di stelle dell'universo. V F

e. Il programma SETI cerca esclusivamente forme di vita microbica sulla superficie di altri pianeti. V F

[Tre affermazioni vere e due false]

9 **Vero o falso?**

a. La zona abitabile è la regione attorno a una stella nella quale possono esistere condizioni adatte alla presenza di acqua liquida sulla superficie di un pianeta. V F

b. Una biosignatura è una caratteristica osservabile che potrebbe indicare la presenza di vita. V F

c. La scoperta di un singolo esopianeta dimostrerebbe automaticamente l'esistenza di vita extraterrestre. V F

d. L'equazione di Drake contiene diversi fattori legati alla formazione delle stelle, dei pianeti e delle civiltà tecnologiche. V F

e. Finora è stata osservata con certezza una civiltà tecnologica extraterrestre. V F

[Tre affermazioni vere e due false]

10 Indica la risposta corretta.

a. Come vengono chiamati i pianeti che orbitano attorno a stelle diverse dal Sole?

A asteroidi

B esopianeti

C comete

D quasar

b. A che cosa serve l'equazione di Drake?

A a calcolare la massa della Via Lattea

B a determinare l'età dell'universo

C a stimare il numero di civiltà tecnologiche sulla base di diversi fattori

D a calcolare la velocità di fuga dalla Terra

c. Che cos'è una biosignatura?

A un segnale che dimostra sempre l'esistenza di una civiltà tecnologica

B una caratteristica che può indicare la presenza di vita

C una regione priva di stelle

D una particolare forma di galassia

d. Che cosa esprime il paradosso di Fermi?

- A il contrasto tra la possibilità di numerose civiltà extraterrestri e la mancanza di evidenze certe
- B la difficoltà di osservare i buchi neri
- C la differenza tra massa e peso
- D l'espansione accelerata dell'universo

e. Che cosa cerca principalmente il programma SETI?

- A pianeti all'interno del Sistema solare
- B segnali che potrebbero avere origine tecnologica
- C nuove galassie vicine alla Via Lattea
- D onde gravitazionali prodotte dal Sole

f. Perché la presenza di acqua liquida è considerata importante nella ricerca della vita?

- A perché l'acqua è presente soltanto sulla Terra
- B perché l'acqua liquida è necessaria per tutte le stelle
- C perché l'acqua liquida svolge un ruolo fondamentale nei processi biologici terrestri
- D perché l'acqua produce direttamente ossigeno

g. Qual è, al momento, l'unico luogo dell'universo nel quale sappiamo con certezza che esiste la vita?

- A Marte
- B Europa
- C la Terra
- D Proxima Centauri b

[una risposta A, tre B, tre C e nessuna D]

11 Supponiamo, per semplicità, che in una versione ridotta dell'equazione di Drake il numero di civiltà sia dato da

$$N = R_* f_p n_e$$

Se si assume

$$R_* = 5, \qquad f_p = 0{,}8, \qquad n_e = 2$$

quale valore si ottiene per N? [N=8]

12 Un astronomo individua 4 pianeti attorno a una stella e stabilisce che 2 di essi si trovano nella zona abitabile. Quale frazione dei pianeti osservati si trova nella zona abitabile? [il 50%]

Dal Big Bang al grande freddo

13 **Vero o falso?**

a.	L'universo è in espansione.	V	F
b.	La legge di Hubble mette in relazione la distanza di una galassia con la sua velocità di allontanamento.	V	F
c.	La radiazione cosmica di fondo fu emessa nelle prime frazioni di secondo dopo il Big Bang.	V	F
d.	La radiazione cosmica di fondo fu emessa quando l'universo aveva circa 380 000 anni.	V	F
e.	Il Big Freeze descrive uno scenario nel quale l'universo continua a espandersi e diventa progressivamente più freddo e diluito.	V	F

[Quattro affermazioni vere e una falsa]

14 **Vero o falso?**

a.	Il Big Bang descrive un'esplosione avvenuta in un punto dello spazio vuoto.	V	F
b.	Georges Lemaître propose un modello di universo in espansione prima delle osservazioni di Hubble.	V	F
c.	Le stelle hanno contribuito alla formazione di molti elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio.	V	F
d.	La radiazione cosmica di fondo è una delle principali evidenze a favore del modello del Big Bang.	V	F
e.	Il Big Freeze prevede che tutte le galassie collassino progressivamente verso il centro dell'universo.	V	F

[Tre affermazioni vere e due false]

15 Indica la risposta corretta.

a. Che cosa significa dire che l'universo è in espansione?

A che tutte le galassie si allontanano da un unico punto nello spazio

B che aumentano le distanze cosmologiche tra le galassie non legate gravitazionalmente

C che le stelle diventano progressivamente più grandi

D che la Via Lattea aumenta continuamente di dimensioni

b. Che cosa descrive la legge di Hubble?

A la relazione tra massa e luminosità delle stelle

B la relazione tra distanza e velocità di allontanamento delle galassie

C la relazione tra temperatura e colore delle stelle

D la relazione tra massa e raggio dei pianeti

c. Che cos'è il fondo cosmico a microonde?

A la radiazione residua dell'universo primordiale

B la luce proveniente dal centro della Via Lattea

C la radiazione emessa dal Sole

D la luce delle galassie più vicine alla Terra

d. Quando fu emessa la radiazione cosmica di fondo che osserviamo oggi?

A circa un secondo dopo il Big Bang

B circa 380 000 anni dopo il Big Bang

C circa 100 milioni di anni dopo il Big Bang

D circa 14 miliardi di anni dopo il Big Bang

e. Chi individuò accidentalmente nel 1964 la radiazione cosmica di fondo?

A Edwin Hubble e Milton Humason

B Arno Penzias e Robert Wilson

C Georges Lemaître e George Gamow

D Albert Einstein e Karl Schwarzschild

f. Quale ruolo hanno avuto le stelle nella storia degli elementi chimici?

A hanno prodotto molti elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio

B hanno distrutto tutto l'idrogeno dell'universo

C hanno trasformato tutta la materia in energia

D hanno prodotto direttamente la radiazione cosmica di fondo

g. Che cosa prevede lo scenario del *Big Freeze*?

A una contrazione dell'universo fino a un nuovo Big Bang

B un'espansione continua accompagnata da un progressivo raffreddamento

C la formazione improvvisa di tutte le stelle

D la trasformazione di tutte le galassie in buchi neri

[due risposte A, quattro B, una C e nessuna D]

16 La legge di Hubble può essere scritta nella forma

$$v = Hd$$

Una galassia si trova a una distanza di 100 Mpc e si assume

$$H = 70\,\mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$$

Quale velocità di allontanamento si ottiene? [7000 km/s]

17 Una seconda galassia si trova a 500 Mpc. Usando lo stesso valore di H, calcola la sua velocità di allontanamento.

[35 000 km/s]

18 Una galassia si allontana a una velocità di 14 000 km/s. Assumendo

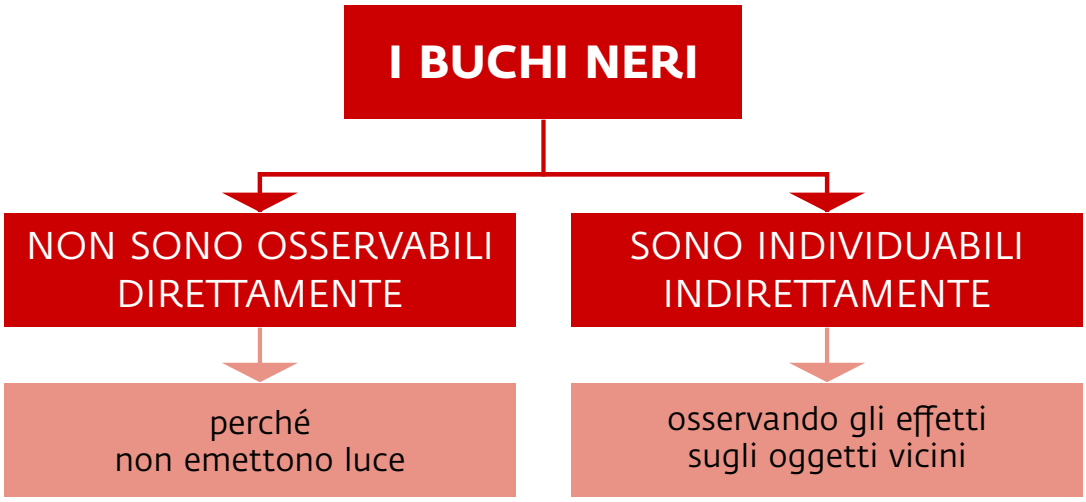
$$H = 70\,\mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$$

a quale distanza si trova la galassia?

[200 Mpc]

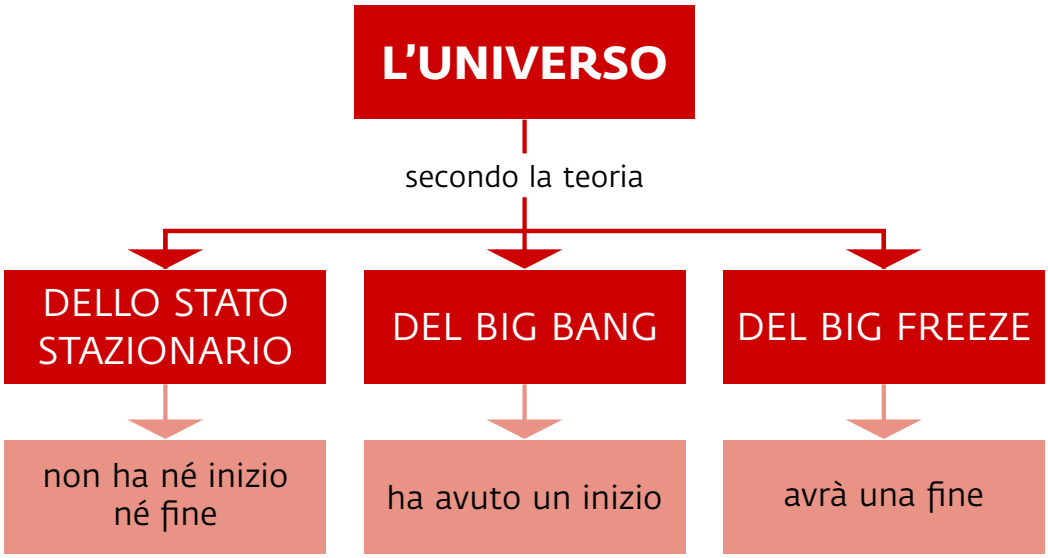
IN SINTESI

L'UNIVERSO



IN SINTESI

L'UNIVERSO



A Cronologia

Il progresso dell'astronomia è un continuo di invenzioni e scoperte. La **tabella 1** riporta alcune tappe essenziali nella storia dell'astronomia.

▼ Tabella 1
Cronologia essenziale dell'astronomia.

Anno	Evento
−3000	A Stonehenge si osserva il cielo per seguire i cicli astronomici.
−1800	I Babilonesi registrano sistematicamente i fenomeni celesti.
−240	Eratostene misura il meridiano terrestre.
−350	Aristotele sostiene che la Terra è sferica e al centro del cosmo.
150	Tolomeo costruisce il modello geocentrico dell'universo.
1054	Gli astronomi cinesi osservano una supernova.
1543	Copernico pubblica il modello eliocentrico.
1572	Brahe osserva una nuova stella e mette in crisi l'immutabilità del cielo.
1609	Keplero formula le prime due leggi del moto planetario.
1609	Galileo usa il telescopio per osservare il cielo.
1610	Galileo scopre i quattro maggiori satelliti di Giove.
1619	Keplero enuncia la terza legge del moto dei pianeti.
1632	Galileo pubblica il *Dialogo*, a sostegno della teoria eliocentrica.
1655	Huygens scopre gli anelli di Saturno.
1687	Newton formula la gravitazione universale.
1705	Halley dimostra che le comete possono tornare periodicamente.
1781	Messier pubblica il suo celebre catalogo di oggetti celesti.
1781	Herschel scopre Urano.
1838	Bessel misura la distanza di una stella con la parallasse.
1846	Galle scopre Nettuno, previsto teoricamente da Le Verrier.
1859	Kirchhoff e Bunsen inventano la spettroscopia stellare.
1877	Schiaparelli osserva i "canali" di Marte.
1905	Einstein pubblica la teoria della relatività ristretta.
1910	Hertzsprung e Russell ideano il diagramma H-R.
1915	Einstein presenta la relatività generale.
1924	Hubble dimostra che Andromeda è una galassia esterna alla Via Lattea.
1927	Lemaître propone un universo in espansione.

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

Anno	Evento
1929	Hubble scopre l'espansione dell'universo.
1930	Tombaugh scopre Plutone.
1932	Oort rileva la presenza di materia oscura nella Via Lattea.
1935	Chandrasekhar trova la massa critica delle nane bianche.
1961	Gagarin è il primo uomo nello spazio.
1965	Penzias e Wilson scoprono la radiazione cosmica di fondo.
1967	Burnell scopre le pulsar, stelle di neutroni in rapidissima rotazione.
1969	Apollo 11 porta i primi esseri umani sulla Luna.
1992	Viene scoperto il primo esopianeta.
1998	Si scopre che l'espansione dell'universo accelera.
2015	Vengono rilevate per la prima volta le onde gravitazionali.
2019	Viene ottenuta la prima immagine di un buco nero.
2021	Il telescopio Webb viene inviato nello spazio.

Si conclude dalla pagina precedente

B Costellazioni e miti

Quando guardiamo il cielo stellato tendiamo spontaneamente a cercare forme: un cacciatore, un animale, un eroe, una regina. È quello che hanno fatto per millenni gli esseri umani, trasformando gruppi di stelle in figure e racconti.

Ma c'è una cosa importante da ricordare: una costellazione è una figura vista dalla Terra, non un gruppo di stelle necessariamente legate fra loro. Le stelle che sembrano vicine nel cielo possono trovarsi a distanze enormemente diverse. La costellazione è dunque, almeno in parte, un effetto della nostra prospettiva.

Le storie che seguono appartengono soprattutto alla tradizione mitologica greca, che ha lasciato un'impronta particolarmente forte nella nomenclatura astronomica occidentale. Le stesse stelle, naturalmente, sono state interpretate in modi molto diversi da popoli e culture differenti.

Orione

È probabilmente la costellazione più riconoscibile del cielo invernale. Al centro della sua figura spicca la famosa cintura formata da tre stelle quasi allineate: Alnitak, Alnilam e Mintaka.

Per i Greci Orione era un gigantesco e abilissimo cacciatore. Le versioni del mito sono numerose e non sempre concordi. In una delle più celebri, Orione viene ucciso da uno scorpione e Zeus lo colloca in cielo insieme al suo avversario.

Astronomicamente, Orione è molto più interessante del suo stesso mito: contiene stelle enormi e luminose, come Betelgeuse e Rigel, e sotto la cintura si trova la Nebulosa di Orione, una gigantesca regione nella quale stanno nascendo nuove stelle.

E c'è una curiosità suggestiva: Orione e lo Scorpione sono collocati nel cielo in modo tale che, quando lo Scorpione sorge, Orione tramonta. Come se il vecchio cacciatore continuasse a fuggire dal suo nemico.

Andromeda

Andromeda è una costellazione dell'emisfero celeste settentrionale, legata a una delle storie più celebri della mitologia greca.

Andromeda era la figlia di Cassiopea e Cefeo. La madre aveva osato vantarsi della bellezza della figlia, provocando l'ira delle Nereidi. Per placare la divinità marina Poseidone, Andromeda venne incatenata a una roccia e offerta in sacrificio a un mostro marino. Fu Perseo a salvarla, uccidendo il mostro e liberandola.

Nel cielo, Andromeda è circondata proprio dai personaggi della storia: Cassiopea, Cefeo e Perseo sono tutte costellazioni vicine.

Ma Andromeda ha anche un'importanza astronomica enorme: nella sua costellazione si trova M31, la galassia di Andromeda, una grande galassia a spirale che appartiene al nostro Gruppo Locale e che un giorno, fra miliardi di anni, interagirà con la Via Lattea.

Cassiopea

Cassiopea si riconosce facilmente per la caratteristica forma a W o a M, a seconda della sua posizione nel cielo.

Nella mitologia era la madre di Andromeda e una regina vanitosa. Si vantò che la propria bellezza, o quella della figlia, fosse superiore a quella delle Nereidi. Per la sua superbia fu condannata a essere collocata nel cielo, dove è destinata a girare eternamente intorno al polo celeste.

Per chi osserva il cielo dall'Italia, Cassiopea è particolarmente utile anche come punto di riferimento: è una costellazione circumpolare, quindi non tramonta mai completamente e può essere osservata in diversi periodi dell'anno.

Perseo

Perseo era uno dei grandi eroi della mitologia greca. La sua impresa più famosa fu l'uccisione di Medusa, la creatura dai capelli di serpente il cui sguardo trasformava in pietra chiunque la guardasse.

Secondo il mito, Perseo riuscì a decapitarla osservandone il riflesso nello scudo lucido che gli era stato dato dagli dèi.

La costellazione di Perseo si trova accanto a Cassiopea e Andromeda. Contiene anche Algol, una delle stelle variabili più famose del cielo: la sua luminosità cambia periodicamente perché è un sistema di stelle che si eclissano a vicenda.

Pegaso

Pegaso è il cavallo alato nato, secondo il mito, dal sangue di Medusa dopo che Perseo le ebbe tagliato la testa.

La sua figura celeste è dominata dal Grande Quadrato di Pegaso, un grande quadrilatero di stelle facilmente riconoscibile.

Il mito racconta che Pegaso aiutò l'eroe Bellerofonte nella sua impresa contro la Chimera. Alla fine, però, il cavallo alato raggiunse il cielo e divenne una costellazione.

Ercole

Ercole è una delle costellazioni più grandi del cielo, anche se la sua figura non è altrettanto facile da riconoscere.

Il personaggio è l'Eracle della mitologia greca, famoso soprattutto per le dodici fatiche: dal leone di Nemea all'idra di Lerna, fino alla cattura del cane Cerbero.

In cielo Ercole si trova vicino alla Lira e alla Corona Boreale. Nella sua costellazione si trova anche M13, uno spettacolare ammasso globulare: centinaia di migliaia di stelle legate dalla gravità, concentrate in una regione relativamente piccola della nostra galassia.

Toro

Il Toro è una delle costellazioni dello zodiaco e contiene alcune delle stelle e degli oggetti più famosi del cielo.

Nella mitologia greca il toro è spesso identificato con Zeus, che avrebbe assunto questa forma per rapire Europa. Esistono però diverse interpretazioni del mito.

Nel cielo del Toro troviamo le Pleiadi, un piccolo ammasso stellare visibile anche a occhio nudo, e le Iadi. La stella più luminosa della costellazione è Aldebaran, una gigante arancione.

Le Pleiadi sono un ottimo esempio di quanto una figura celeste possa essere ingannevole: le stelle sembrano vicine tra loro, ma non costituiscono semplicemente i punti luminosi di un disegno bidimensionale.

Gemelli

I Gemelli rappresentano Castore e Polluce, i due fratelli della mitologia greca.

Secondo il mito, erano inseparabili. Polluce era immortale, mentre Castore era mortale. Quando Castore morì, Polluce chiese a Zeus di permettergli di condividere la propria immortalità con il fratello. I due furono così collocati insieme nel cielo.

Le due stelle principali della costellazione portano infatti i loro nomi: Castore e Polluce.

Leone

Il Leone è un'altra costellazione dello zodiaco. Rappresenta il Leone di Nemea, una creatura dalla pelle invulnerabile che Ercole dovette affrontare come prima delle sue dodici fatiche.

Ercole riuscì a strangolarlo e in seguito utilizzò la sua stessa pelle come protezione.

La costellazione è facilmente riconoscibile grazie alla forma caratteristica della sua parte anteriore, spesso chiamata "falce".

Scorpione

Lo Scorpione è una delle costellazioni zodiacali più spettacolari, soprattutto per la ricchezza di stelle visibili nelle sue regioni meridionali.

Nella tradizione mitologica è proprio lo scorpione che avrebbe provocato la morte di Orione. Per questo i due personaggi sono stati collocati in parti opposte del cielo.

La costellazione contiene Antares, una gigantesca stella rossa. Il suo nome significa letteralmente "rivale di Ares", cioè rivale di Marte, per il colore rossastro che la fa assomigliare al pianeta.

Sagittario

Il Sagittario rappresenta un arciere, spesso identificato nella tradizione greca con un centauro.

È una delle costellazioni più interessanti dal punto di vista astronomico perché la sua direzione punta verso il centro della Via Lattea. In quella regione il cielo è particolarmente ricco di stelle, nebulose e ammassi.

Proprio in direzione del Sagittario si trova anche Sagittarius A*, il buco nero supermassiccio al centro della nostra galassia.

Orsa Maggiore

L'Orsa Maggiore è probabilmente una delle figure più conosciute del cielo boreale. Le sette stelle del Grande Carro ne costituiscono la parte più facilmente riconoscibile.

Nella mitologia greca l'orsa viene identificata con Callisto, una ninfa trasformata in orsa da Era o da Zeus, a seconda delle versioni del mito. Zeus la collocò poi in cielo insieme al figlio Arcade, associato all'Orsa Minore.

Al di là del mito, l'Orsa Maggiore è utilissima per orientarsi: prolungando la linea formata dalle due stelle sul bordo del Grande Carro si può arrivare a individuare la Stella Polare.

Orsa Minore

L'Orsa Minore contiene una delle stelle più famose del cielo: Polaris, la Stella Polare.

Polaris sembra quasi immobile mentre le altre stelle del cielo ruotano intorno a essa, perché si trova molto vicina alla direzione del polo nord celeste.

Per questo, per secoli, è stata un riferimento fondamentale per la navigazione e l'orientamento.

Nella mitologia greca l'Orsa Minore è associata ad Arcade, figlio di Callisto, e quindi è legata alla stessa storia dell'Orsa Maggiore.

E le altre?

Il cielo contiene 88 costellazioni ufficialmente riconosciute, molte delle quali hanno nomi e storie affascinanti. Non tutte, però, sono altrettanto facili da riconoscere o altrettanto importanti per il nostro racconto.

Questa appendice non vuole quindi essere un catalogo completo. È piuttosto una piccola guida per riscoprire una cosa che l'astronomia moderna rischia talvolta di farci dimenticare: prima di essere un insieme di coordinate, il cielo è stato per millenni un luogo di storie.

Le stelle non hanno mai formato davvero un cacciatore, un orso o una principessa. Quelle figure le abbiamo costruite noi.

Eppure, ogni volta che riconosciamo Orione o Cassiopea nel cielo, stiamo guardando qualcosa che unisce due modi molto diversi di conoscere l'universo: la misura e l'immaginazione.

Indice dei nomi

A

Adams, John 57
Alessandro Magno 4
Alfonso X 54
Alpher, Ralph 124
Anassagora 2
Anassimandro 2
Archimede 35
Aristarco 7, 33–35, 50
Aristotele 2, 5, 7, 53, 139

B

Bell Burnell, Jocelyn 140
Bellarmino, Roberto 54
Bessel, Friedrich 139
Bethe, Hans 124
Bradley, James 7
Brahe, Tycho 55, 139
Bunsen, Robert 139

C

Cesare, Giulio 9
Chandrasekhar, Subrahmanyan 140
Colombo, Cristoforo 4
Copernico, Niccolò 7, 35, 53–55, 77, 139
Coriolis, Gaspard 6, 7

D

Delambre, Jean-Baptiste 4
Drake, Frank 120, 121

E

Einstein, Albert 58, 80, 117, 118, 123, 139
Eratostene 2–4, 139
Eulero 57

F

Fermi, Enrico 121
Foucault, Léon 30
Fridman, Aleksandr 123

G

Gagarin, Jurij 140
Galilei, Galileo 7, 54–56, 58, 139
Galle, Johann 57, 58, 139
Gamow, George 124
Genzel, Reinhard 119
Ghez, Andrea 119
Gregorio XIII 9
Guglielmini, Giovanni 5, 30

H

Halley, Edmond 139
Hawking, Stephen 118, 128
Herschel, William 56, 139
Hertzsprung, Ejnar 86, 139
Hoyle, Fred 122
Hubble, Edwin 123, 139, 140
Huygens, Christiaan 35, 139

I

Ipparco 4, 35

K

Keplero 7, 53–55, 76, 77, 139
Kirchhoff, Gustav 139

L

Lagrange, Joseph 57
Laplace, Pierre-Simon 57
Le Verrier, Urbain 57, 58, 80, 139
Lemaître, Georges 123, 139

M

Messier, Charles 139
Michell, John 118
Méchain, Pierre 4

N

Newton, Isaac 31, 53, 55, 57, 139
Nobel, Alfred 119, 124

O

Oort, Jan 140
Osiander, Andreas 54

P

Parmenide 2
Penrose, Roger 119
Penzias, Arno 124, 140
Pirandello, Luigi 53
Pitagora 2, 56, 71
Pitea 4
Plinio il Vecchio 4

R

Russell, Henry 86, 139

S

Sagan, Carl 125
Schiaparelli, Giovanni 139
Schwarzschild, Karl 118

T

Thorne, Kip 118
Tolomeo 7, 50, 53–55, 77, 139
Tombaugh, Clyde 140

W

Wheeler, John 118
Wilson, Robert 124, 140
Wright, Steven 118