CAPITOLO

3

I sistemi del mondo: da Aristotele a Galileo

«Cynthiae figuras aemulatur mater amorum.» «La madre degli amori imita le figure di Cinzia.» — Galileo Galilei, soluzione dell'anagramma sulle fasi di Venere (1611; traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Descrivere i moti del cielo visibili a occhio nudo: moto diurno, moto annuo del Sole, fasi lunari, moto retrogrado dei pianeti.
2. Usare gli angoli e la relazione degli angoli piccoli per ricavare dimensioni e distanze astronomiche.
3. Confrontare i sistemi di Tolomeo, Copernico e Tycho per ciò che spiegano e per ciò che prevedono.
4. Spiegare il moto retrogrado come effetto prospettico e ricavare il periodo di un pianeta dal suo periodo sinodico.
5. Riconoscere quali osservazioni di Tycho e di Galileo discriminano fra i sistemi, e quali no.
6. Leggere e valutare brevi fonti di Aristotele, Archimede, Copernico e Galileo.

INDICE DEL CAPITOLO

3.1 Il cielo a occhio nudo 2
3.2 Il cosmo dei Greci: la Terra al centro 8
3.3 Copernico: il Sole in mezzo 12
3.4 Tycho Brahe: misure nuove e un terzo sistema 15
3.5 Galileo e il cannocchiale 16

Fisica 4 · Parte II · La gravitazione · versione 1.0
Capitolo 3: I sistemi del mondo: da Aristotele a Galileo · pagine 79–104 del volume completo · estratto per lo studio

Esci in una notte limpida, lontano dalle luci della città, e guarda il cielo per qualche ora. Le stelle sorgono a est e tramontano a ovest tutte insieme, come se fossero fissate a un'unica cupola che gira. La Luna cambia forma da una sera all'altra. E alcuni punti luminosi, che sembrano stelle, nel giro di qualche settimana si spostano fra le costellazioni, e ogni tanto tornano indietro. Per più di duemila anni chi ha osservato il cielo ha cercato un modello capace di riprodurre questi moti e di prevederli.

Questo capitolo segue quella ricerca dai Greci a Galileo: è il «dibattito del XVI e XVII secolo sui sistemi cosmologici» che incontri anche in storia e in filosofia. Lo leggeremo con gli occhi della fisica. Ogni sistema del mondo è un *modello*, nel senso di «Fisica 3, capitolo 1»: lo giudicheremo per ciò che prevede, e cercheremo ogni volta l'osservazione capace di decidere fra un modello e l'altro. Scoprirai che per decenni due sistemi molto diversi spiegarono il cielo altrettanto bene.

3.1 Il cielo a occhio nudo

3.1.1 La sfera celeste e il moto diurno

Le stelle conservano le loro distanze reciproche: le costellazioni di oggi sono quelle descritte dai poeti antichi. È naturale immaginarle fissate su una sfera, la **sfera celeste**, al cui centro sta l'osservatore (Figura 3.1). È un modello geometrico: descrive dove vediamo gli astri, non quanto sono lontani.

La sfera sembra ruotare intorno a un asse che passa per i **poli celesti**; il polo nord celeste è vicinissimo alla Stella Polare, che per questo pare immobile. È il **moto diurno**: tutto il cielo gira da est verso ovest di circa 15° all'ora e compie un giro, misurato sulle stelle, in 23 h 56 min (il giorno siderale, 86 164 s). Il cerchio a uguale distanza dai due poli è l'**equatore celeste**.

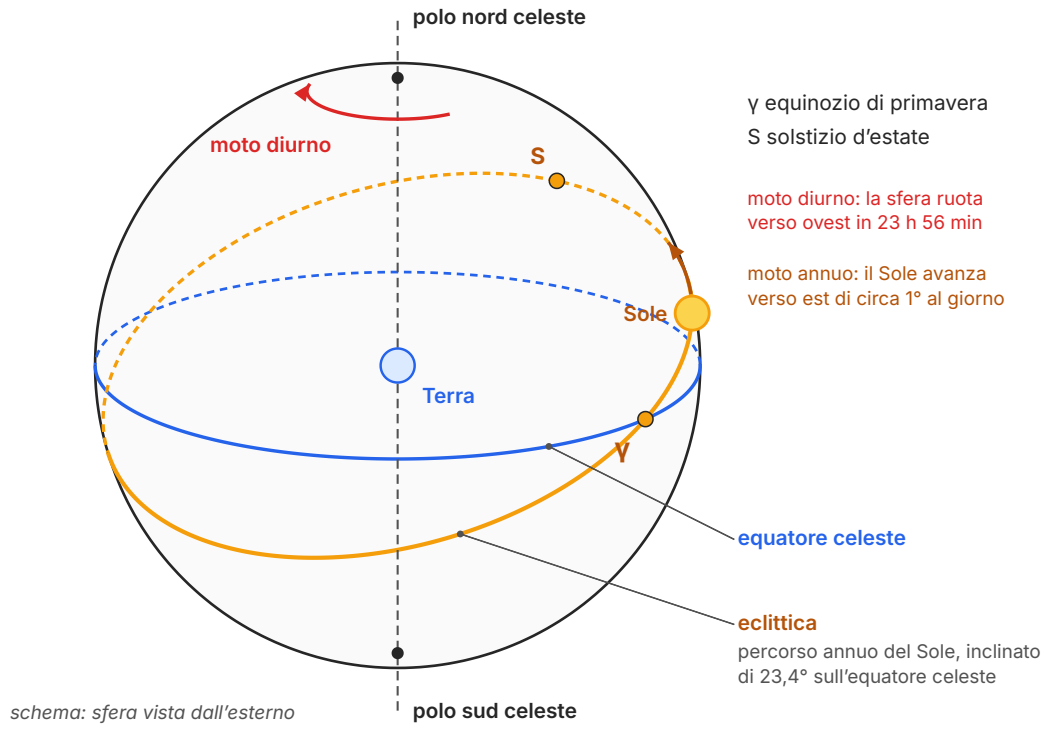


Figura 3.1 La sfera celeste vista dall'esterno (schema). L'asse del mondo passa per i poli celesti e per la Terra, al centro; la sfera compie il moto diurno verso ovest in circa 23 h 56 min. L'eclittica, il percorso annuo del Sole fra le stelle, è inclinata di 23,4° sull'equatore celeste e lo incontra nei due equinozi; ♈ è l'equinozio di primavera, S il solstizio d'estate. In tratteggio le parti nascoste della sfera.

3.1.2 Il Sole, le stagioni e la Luna

Il Sole partecipa al moto diurno, ma non è fermo fra le stelle: le costellazioni visibili subito dopo il tramonto cambiano con le stagioni, perché il Sole si sposta ogni giorno verso est di circa 1° (360° in 365,26 giorni). Il suo percorso annuo è l'**eclittica**, un cerchio massimo inclinato di 23,4° sull'equatore celeste; la fascia di costellazioni che la accompagna è lo **zodiaco**. L'inclinazione dell'eclittica riflette quella dell'asse terrestre sul piano dell'orbita: è questa che, nel corso dell'anno, fa cambiare l'altezza del Sole a mezzogiorno e la durata del giorno, e quindi produce le stagioni. Quando il Sole è a nord dell'equatore celeste è estate nel nostro emisfero; i punti d'incontro fra eclittica ed equatore sono gli equinozi, i più lontani dall'equatore i solstizi (Scienze 1, capitolo 10). Ogni sistema del mondo deve riprodurre questi fatti.

La Luna si sposta verso est fra le stelle molto più in fretta, di circa mezzo grado all'ora, il proprio diametro apparente, e torna presso le stesse stelle dopo 27,3 giorni. Le sue fasi si ripetono ogni 29,5 giorni (Scienze 1, capitolo 11) e sono pura geometria: metà della Luna è sempre illu-

minata dal Sole, e noi ne vediamo una parte diversa a seconda dell'angolo Sole–Luna–Terra (Figura 3.2). Tieni a mente questo ragionamento: Galileo lo applicherà a Venere.

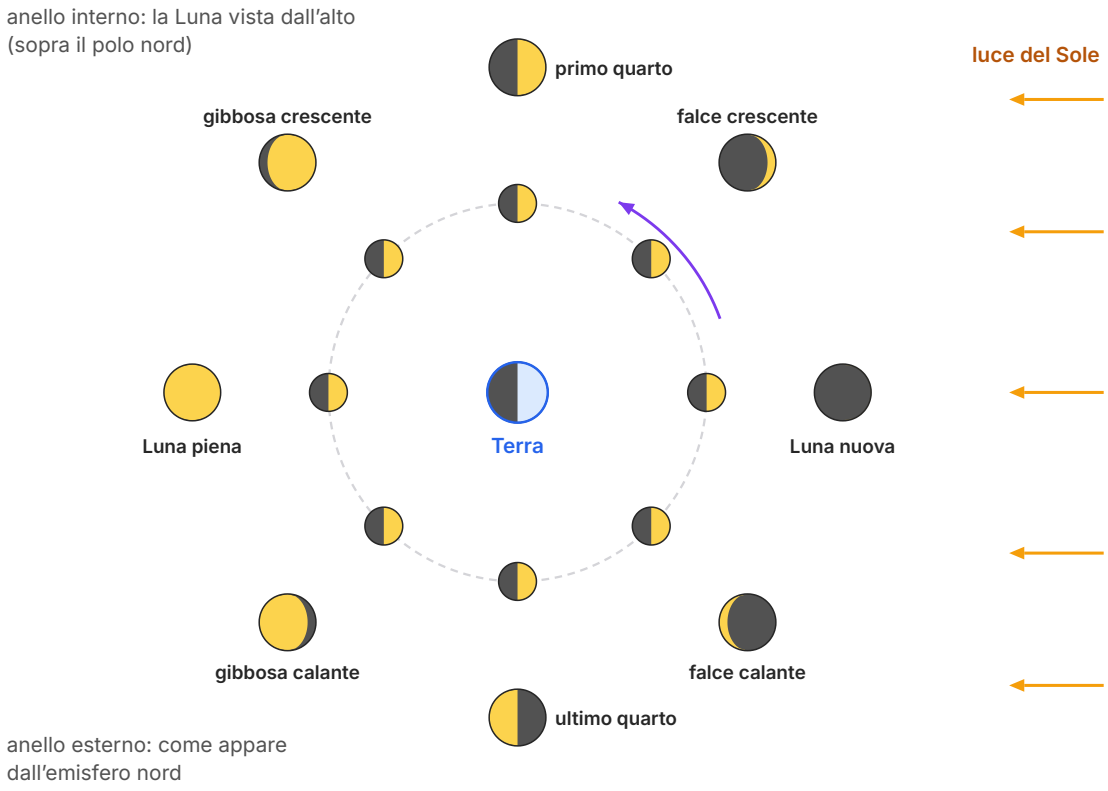


Figura 3.2 Le fasi lunari. Nell'anello interno la Luna è vista da sopra il polo nord: la metà rivolta verso il Sole, che illumina da destra, è sempre illuminata. Nell'anello esterno, l'aspetto della Luna per un osservatore dell'emisfero nord nelle otto posizioni principali. Nella versione interattiva si percorre una lunazione giorno per giorno.

3.1.3 Misurare il cielo: gli angoli

Sulla sfera celeste non si misurano distanze, ma angoli: il grado, diviso in 60 **primi d'arco** (1° = 60′), ciascuno diviso in 60 **secondi d'arco** (1′ = 60″). Il Sole e la Luna hanno un **diametro apparente**, l'angolo sotto il quale vediamo il loro disco, di circa mezzo grado; l'occhio nudo distingue a fatica due punti separati da 1′–2′.

DA RICORDARE

Dal volume del terzo anno · Il radiante e gli angoli piccoli

In «Fisica 3, capitolo 12» l'angolo al centro che sottende un arco s di una circonferenza di raggio r vale $\alpha = s/r$ radianti, e $360° = 2\pi$ rad (1 rad $\approx 57{,}3°$). Per un angolo piccolo arco e corda quasi coincidono: un oggetto di diametro D, visto da una distanza d molto maggiore, si vede sotto l'angolo

$$\alpha \approx \frac{D}{d} \qquad (\alpha \text{ in radianti})$$

ESEMPIO SVOLTO

Quanto è grande il Sole?

Problema. Il diametro apparente del Sole è $0{,}53°$, la sua distanza media 1 **unità astronomica** (1 UA $= 1{,}496 \times 10^{11}$ m). a) Calcola il diametro del Sole. b) Quanto impiega la sua luce ad arrivare fino a noi?

Soluzione. a) $\alpha = 0{,}53° \times \pi/180° = 9{,}25 \times 10^{-3}$ rad; $D = \alpha\, d = 9{,}25 \times 10^{-3} \times 1{,}496 \times 10^{11}$ m = **$1{,}4 \times 10^{9}$ m**, circa 110 diametri terrestri. b) $t = d/c = 1{,}496 \times 10^{11}$ m / $(3{,}00 \times 10^{8}$ m/s$) = 499$ s = **8,3 min**.

Controllo. Il diametro misurato è $1{,}39 \times 10^{9}$ m. Il Sole e la Luna hanno quasi lo stesso diametro apparente, ma il Sole è circa 400 volte più lontano: è circa 400 volte più grande. Con una distanza sbagliata, come vedremo con Aristarco, si ottiene un Sole sbagliato.

Per le stelle si usa l'**anno-luce** (a.l.), la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno: 1 a.l. $= 9{,}46 \times 10^{15}$ m, circa 63 000 UA.

3.1.4 I pianeti erranti e il moto retrogrado

A occhio nudo si vedono cinque punti luminosi che si spostano fra le stelle: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno, gli «erranti» dei Greci, da cui il nome **pianeti**. Restano sempre vicini all'eclittica e in media avanzano verso est, ma con due stranezze. Mercurio e Venere non si allontanano mai molto dal Sole: la loro distanza angolare dal Sole, l'**elongazione**, non supera circa $28°$ e circa $47°$, e li vediamo solo di sera o di mattina («stella della sera» e «stella del mattino» sono lo stesso pianeta, Venere). Marte, Giove e Saturno possono invece trovarsi anche in **opposizione**, dalla parte del cielo opposta al Sole, alti a mezzanotte.

La seconda stranezza: di tanto in tanto un pianeta rallenta, si ferma, torna indietro verso ovest per qualche settimana e poi riprende il cammino. È il **moto retrogrado**. Per Marte accade ogni 780 giorni circa, dura circa 70 giorni e lo riporta indietro di circa $15°$, sempre intorno all'opposizione, quando il pianeta è anche molto più luminoso. La Figura 3.3 lo mostra calcolato con un modello semplice, che capiremo con Copernico.

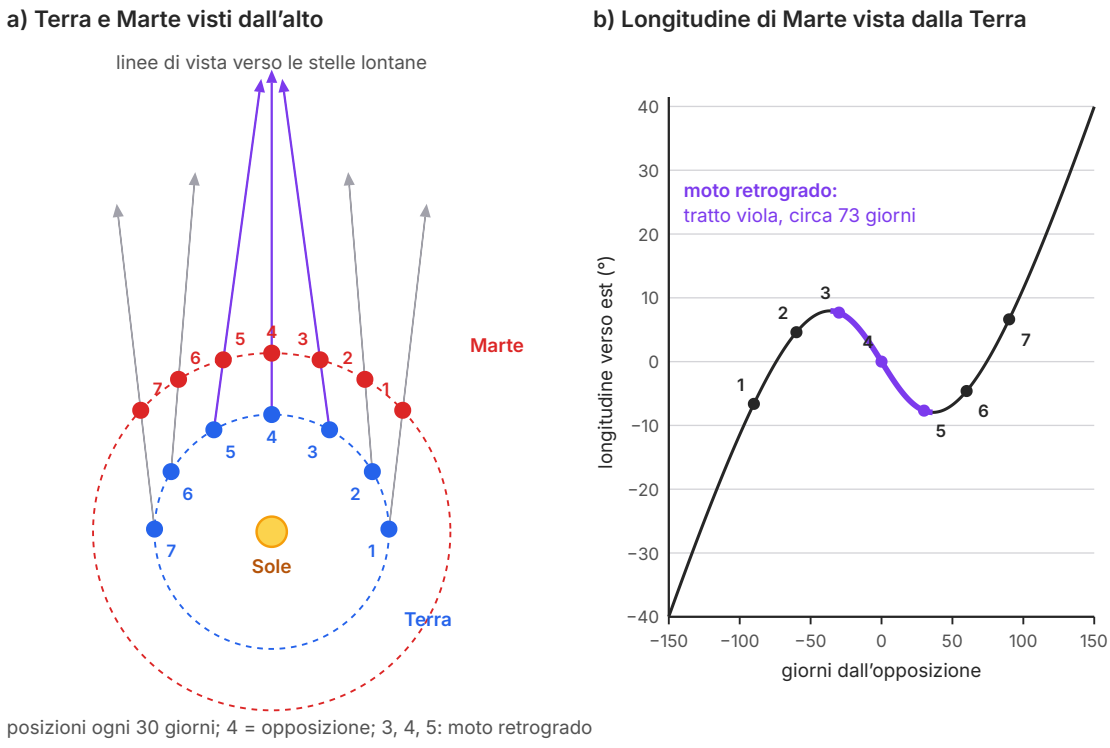


Figura 3.3 Il moto retrogrado di Marte, calcolato con orbite circolari e complanari intorno al Sole (Terra a 1 UA, periodo 1 anno; Marte a 1,524 UA, periodo 1,881 anni). a) Posizioni della Terra e di Marte ogni 30 giorni; la posizione 4 è l'opposizione; le frecce sono le linee di vista dalla Terra verso Marte e le stelle lontane. b) La longitudine di Marte vista dalla Terra, misurata verso est dalla direzione dell'opposizione: per circa 73 giorni intorno all'opposizione (tratto viola) diminuisce, e Marte arretra di circa 16° fra le stelle.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere il moto retrogrado su un grafico

Dati. Il grafico *b* della Figura 3.3. a) In quale intervallo di tempo Marte si muove verso ovest? b) Di quanti gradi arretra? c) Di quanto avanza fra le posizioni 1 e 3?

Analisi. Il moto è verso est dove la curva sale, verso ovest dove scende. a) Fra il massimo, circa 36 giorni prima dell'opposizione, e il minimo, circa 36 giorni dopo: circa 73 giorni. b) La longitudine passa da circa +8° a circa −8°: Marte arretra di circa **16**°, una trentina di diametri lunari. c) Da circa −7° a circa +8°: avanza di circa 15° in 60 giorni.

Conclusione. L'arretramento è un tratto breve dentro un moto che in media procede verso est; e nel modello del grafico il pianeta, sulla sua orbita, non torna mai indietro. Capire *da dove* nasce questa apparenza è il cuore del capitolo.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: quanto è grande la Luna nel cielo?

Materiali. Un cartoncino nero con un foro di diametro $D = (10{,}0 \pm 0{,}2)$ mm (misurato con il calibro); un'asta di legno lunga circa 1,5 m su cui il cartoncino può scorrere; un metro a nastro; una sera di Luna piena o quasi.

Procedimento. 1) Appoggia un'estremità dell'asta sotto l'occhio e puntala verso la Luna. 2) Fai scorrere il cartoncino finché il disco lunare riempie esattamente il foro. 3) Misura la distanza L fra l'occhio e il cartoncino. 4) Ripeti cinque volte, alternando chi regola e chi legge. 5) Ripeti tutto un'altra sera, con la Luna bassa sull'orizzonte.

Tabella 3.1 Misure di un gruppo con la Luna alta nel cielo: distanza L del cartoncino dall'occhio (lettura al centimetro) e diametro apparente $\alpha = D/L$.

Prova	L (cm)	α (rad)	α (°)
1	108	0,00926	0,531
2	112	0,00893	0,512
3	106	0,00943	0,541
4	110	0,00909	0,521
5	114	0,00877	0,503

Che cosa concludere. Dai dati della Tabella 3.1, il valor medio è $L = (110 \pm 4)$ cm (semidispersione massima). Quindi $\alpha = 10{,}0$ mm / 1100 mm $= 9{,}1 \times 10^{-3}$ rad $= 0{,}52°$, con incertezza relativa 2% + 4% ≈ 6%: $\alpha = (0{,}52 \pm 0{,}03)°$, circa 31′. Il rapporto $L/D = 110 \pm 6$ è anche il rapporto fra la distanza della Luna e il suo diametro; il valore vero, 384 400 km / 3474 km ≈ 111, è compatibile. Con la Luna bassa il gruppo ha trovato $L = (111 \pm 4)$ cm, lo stesso valore entro le incertezze: la Luna che all'orizzonte «sembra enorme» è un'illusione del cervello, non della geometria.

Sicurezza. Non puntare mai l'asta, un binocolo o un cannocchiale verso il Sole, nemmeno al tramonto: bastano pochi secondi per danneggiare la retina in modo permanente.

Per la relazione. Segui lo schema di «Fisica 3, capitolo 4»: tabella con unità e incertezze, α in radianti e in gradi con la propagazione delle incertezze, confronto fra Luna alta e bassa (compatibilità), cause d'errore (il bordo sfumato del disco, l'occhio non allineato con l'asta).

3.2 Il cosmo dei Greci: la Terra al centro

3.2.1 Le sfere di Eudosso e il cosmo di Aristotele

Nel IV secolo a.C. Eudosso di Cnido costruì il primo modello geometrico dei moti celesti: ogni astro è portato da un gruppo di **sfere omocentriche**, con lo stesso centro, la Terra, che ruotano con velocità costante intorno ad assi diversi (tre sfere per il Sole e per la Luna, quattro per ogni pianeta). Combinando due rotazioni Eudosso otteneva una curva a forma di otto, che riproduceva in modo approssimato il moto retrogrado. Ma su sfere centrate nella Terra ogni pianeta resta sempre alla stessa distanza da noi, mentre Marte all'opposizione è molto più luminoso: una variazione di luminosità così grande fa pensare a una variazione di distanza, che il modello non permette.

Aristotele (384–322 a.C.) fece di quelle sfere una fisica del cosmo, che hai incontrato in «Fisica 3, capitolo 1». Il cosmo è finito, sferico e diviso in due regioni: il **mondo sublunare**, fino alla sfera della Luna, fatto dei quattro elementi, dove le cose nascono e si corrompono; e il mondo celeste, fatto di etere, il cui moto naturale è circolare ed eterno. La Terra sta immobile al centro, luogo naturale dei gravi (Filosofia 3, capitolo 9).

Aristotele sapeva che la Terra è una sfera e lo dimostrava con le osservazioni. Nel *De caelo* (II 14, 297b) scrive che «nelle fasi del mese la Luna mostra ogni tipo di contorno, diritto, convesso o concavo, ma nelle eclissi la linea di confine è sempre convessa; e poiché l'eclissi avviene perché la Terra si interpone, la forma di quella linea sarà dovuta alla forma della Terra, che dunque è sferica» (traduzione della redazione). E aggiunge: spostandosi anche di poco verso sud o verso nord, alcune stelle compaiono e altre scompaiono all'orizzonte.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«Prima di Colombo si credeva che la Terra fosse piatta.»** È una leggenda nata nell'Ottocento. Dopo Aristotele la sfericità della Terra fu un dato acquisito per tutti i dotti, antichi e medievali: Eratostene ne misurò la circonferenza nel III secolo a.C. (Scienze 1, capitolo 10) e i manuali delle università medievali la insegnavano. Intorno a Colombo si discuteva delle *dimensioni* della Terra e della distanza dell'Asia, non della sua forma.

3.2.2 Tolomeo: deferenti, epicicli ed equanti

Il modello che dominò per quattordici secoli è quello di Claudio Tolomeo, che lavorava ad Alessandria nel II secolo d.C. La sua *Composizione matematica* (Μαθηματικὴ σύνταξις) è nota con il nome arabo di *Almagesto*, da un superlativo greco che significa «la più grande». Nel libro I Tolomeo argomenta che la Terra è sferica, al centro del cielo e immobile; poi, raccogliendo il lavoro di astronomi precedenti come Ipparco (II secolo a.C.), costruisce un sistema capace di calcolare in anticipo la posizione di ogni astro con una combinazione di cerchi (Figura 3.4):

- il pianeta si muove su un piccolo cerchio, l'**epiciclo**, il cui centro K percorre un cerchio più grande, il **deferente**;
- la Terra non è nel centro C del deferente, ma un poco spostata: il deferente è **eccentrico**;
- il centro K si muove con velocità angolare costante non attorno a C né attorno alla Terra, ma attorno all'**equante** E, il punto simmetrico della Terra rispetto a C.

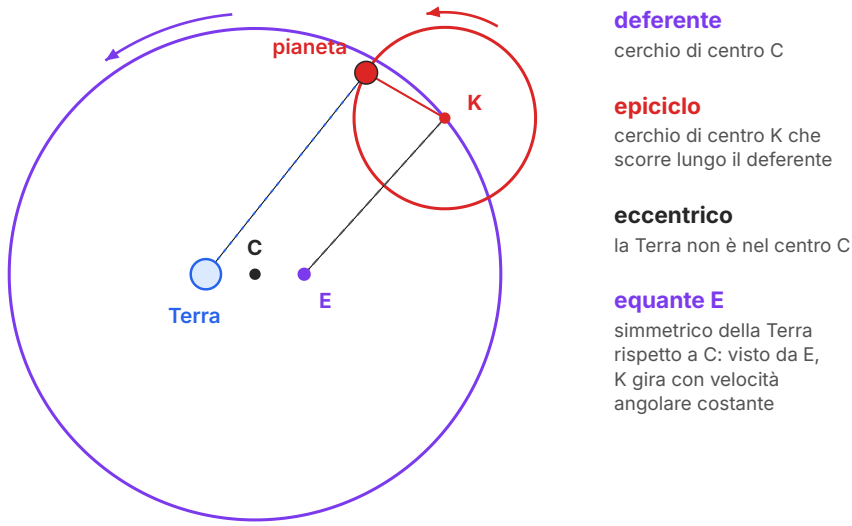


Figura 3.4 Lo schema di Tolomeo per un pianeta (non in scala). Il centro K dell'epiciclo percorre il deferente, di centro C; la Terra è spostata rispetto a C (deferente eccentrico) e l'equante E, simmetrico della Terra rispetto a C, è il punto dal quale il moto di K appare uniforme. Le frecce indicano i versi dei due moti circolari; la linea punteggiata è la linea di vista dalla Terra al pianeta.

Quando il pianeta percorre la parte dell'epiciclo più vicina alla Terra, il suo moto sull'epiciclo è opposto a quello del deferente e lo supera: visto dalla Terra, il pianeta torna indietro, e in quei giorni è anche più vicino e più luminoso. Per accordarsi con i dati, però, Tolomeo dovette aggiungere due regole senza giustificazione fisica: i centri degli epicicli di Mercurio e Venere stanno sempre sulla retta Terra–Sole, e per Marte, Giove e Saturno il raggio dell'epiciclo resta parallelo alla direzione Terra–Sole. Il Sole governava in segreto i moti di tutti i pianeti.

Il sistema funzionava: le sue tavole prevedevano le posizioni dei pianeti con errori di qualche grado al massimo, e per secoli bastarono ad almanacchi e calendari. Il suo scopo era «salvare i fenomeni» (σῴζειν τὰ φαινόμενα): un'espressione che ci arriva da Simplicio, commentatore di Aristotele del VI secolo d.C., secondo il quale già Platone aveva chiesto agli astronomi quali moti circolari e uniformi bisognasse supporre per rendere conto dei moti apparenti dei

pianeti. Un buon modello astronomico doveva *calcolare bene*; dire come fosse fatto davvero il cielo spettava alla filosofia naturale.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Pianeta viene dal greco πλανήτης, «errante», da πλανάομαι, «vagare»: le stelle che vagano fra le stelle fisse.

Epiciclo unisce ἐπί, «sopra», e κύκλος, «cerchio»: il cerchio che corre sopra un altro cerchio, il deferente (dal latino *deferre*, «trasportare»).

Eccentrico viene da ἐκ, «fuori da», e κέντρον, «centro». Lo stesso κέντρον, con γῆ, «terra», e ἥλιος, «sole», forma **geocentrico** ed **eliocentrico**.

Cosmo è il greco κόσμος, «ordine», e poi «mondo ordinato»: per i Greci l'universo era prima di tutto un ordine.

COLLEGAMENTI

Italiano · Il cosmo di Dante

La *Commedia* (Italiano 3, capitolo 4) è costruita sul cosmo aristotelico e tolemaico. Nel *Paradiso* Dante sale attraverso i cieli concentrici alla Terra della Luna, di Mercurio, di Venere, del Sole, di Marte, di Giove e di Saturno (il Sole, per gli antichi, era un pianeta), poi delle stelle fisse e del Primo Mobile, che trascina tutti gli altri nel moto diurno; oltre c'è l'Empireo, immobile. La cantica si apre con la gloria divina che «per l'universo penetra, e risplende / in una parte più e meno altrove» (*Par.* I 2–3) e si chiude con «l'amor che move il sole e l'altre stelle» (*Par.* XXXIII 145). Nel canto II Beatrice, per spiegare le macchie della Luna, propone perfino un esperimento con tre specchi e un lume.

3.2.3 Aristarco di Samo: un'ipotesi in anticipo di diciotto secoli

Nel III secolo a.C. Aristarco di Samo propose che fosse il Sole a stare fermo. Il suo scritto è perduto e lo conosciamo da Archimede, che nell'*Arenario* (Ψαμμίτης), dove calcola quanti granelli di sabbia potrebbe contenere l'universo, scrive: «Aristarco di Samo ha pubblicato alcune ipotesi dalle quali risulta che il cosmo è molte volte più grande di quello che abbiamo detto. Suppone infatti che le stelle fisse e il Sole rimangano immobili, che la Terra giri intorno al Sole lungo la circonferenza di un cerchio, con il Sole nel mezzo dell'orbita» (traduzione della redazione).

Perché un cosmo «molte volte più grande»? Perché la Terra, girando intorno al Sole, osserverebbe le stelle da punti diversi nel corso dell'anno, e le loro posizioni apparenti dovrebbero cambiare; se non si vede nulla, le stelle devono essere lontanissime. Ci torneremo con Copernico. L'ipotesi non ebbe seguito: contraddiceva la fisica di Aristotele e l'esperienza di una Terra ferma, e non migliorava le previsioni.

APPROFONDIMENTO

Aristarco misura il Sole e la Luna

Di Aristarco ci resta l'opera *Sulle grandezze e distanze del Sole e della Luna* (Περὶ μεγεθῶν καὶ ἀποστημάτων ἡλίου καὶ σελήνης), in cui tenta una misura geometrica. Quando la Luna è al primo quarto, metà illuminata e metà buia, i raggi del Sole che la illuminano sono perpendicolari alla linea Terra–Luna: Terra, Luna e Sole formano un triangolo rettangolo in L (Figura 3.5). Misurando l'angolo α fra le direzioni della Luna e del Sole si ottiene la forma del triangolo, e quindi il rapporto fra la distanza Terra–Sole (l'ipotenusa) e la distanza Terra–Luna (un cateto).

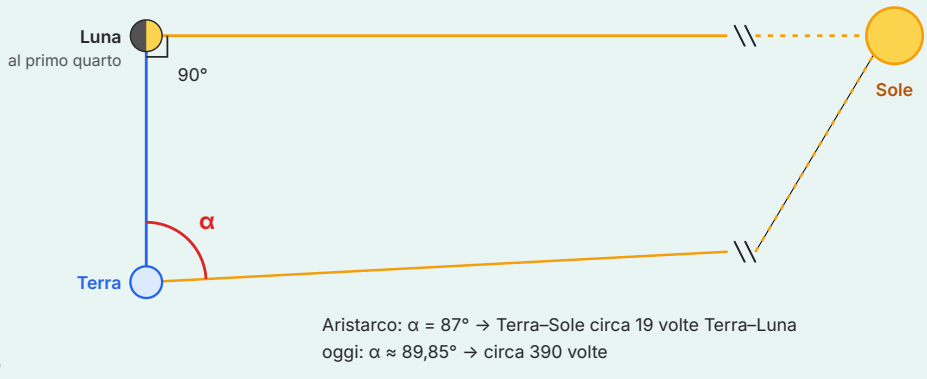


Figura 3.5 Il triangolo di Aristarco (non in scala). Al primo quarto l'angolo Terra–Luna–Sole è retto; l'angolo α misurato dalla Terra fra la Luna e il Sole determina il rapporto fra le distanze Terra–Sole e Terra–Luna: circa 19 con $\alpha = 87°$, il valore di Aristarco, circa 390 con il valore vero, circa 89,85°. Le interruzioni indicano che il Sole è molto più lontano di come è disegnato.

Aristarco stimò $\alpha = 87°$ e concluse che il Sole è fra 18 e 20 volte più lontano della Luna; il rapporto vero è circa 390. L'angolo vero differisce da 90° di appena 0,15°, e stabilire a occhio nudo l'istante esatto del primo quarto è impossibile. Il metodo era corretto, il dato no: in fisica una teoria vale quanto la misura che la nutre. Ne seguiva comunque una conclusione importante: il Sole e la Luna hanno lo stesso diametro apparente, come mostrano le eclissi totali, e quindi il Sole, 19 volte più lontano, è anche 19 volte più grande della Luna, e molto più grande della Terra.

3.3 Copernico: il Sole in mezzo

3.3.1 Il *De revolutionibus*

Niccolò Copernico (1473–1543), canonico a Frombork, nella Polonia del nord, studiò in Italia, a Bologna e a Padova, negli anni in cui l'umanesimo riscopriva i testi greci (Filosofia 4, capitolo 1). Pubblicò il suo sistema solo nell'anno della morte, il 1543, nel *De revolutionibus orbium coelestium*, «Sulle rivoluzioni delle sfere celesti», dedicato al papa Paolo III. Nel **sistema eliocentrico** di Copernico il Sole è fermo vicino al centro del mondo e la Terra è un pianeta, con una **rotazione** giornaliera da ovest verso est, che produce in apparenza il moto diurno del cielo, e una **rivoluzione** annua intorno al Sole, che produce in apparenza il moto del Sole lungo l'eclittica. (Copernico aggiungeva un terzo moto per mantenere l'asse terrestre parallelo a sé stesso, necessario solo perché immaginava la Terra trasportata da una sfera rotante.)

Il celebre passo del libro I, capitolo 10, culmina nel Sole: «*In medio vero omnium residet Sol. Quis enim in hoc pulcherrimo templo lampadem hanc in alio vel meliori loco poneret, quam unde totum simul possit illuminare?*», «In mezzo a tutti sta il Sole. Chi infatti, in questo bellissimo tempio, porrebbe questa lampada in un luogo diverso o migliore di quello da cui può illuminare tutto insieme?» (traduzione della redazione). È un argomento di bellezza, non una prova: le prove vanno cercate in ciò che il sistema spiega.

3.3.2 Che cosa spiegava, e come

Il moto retrogrado diventa un effetto di prospettiva. La Terra, più vicina al Sole, gira più in fretta di Marte; all'opposizione lo raggiunge e lo sorpassa, come un'auto che sorpassa un camion: per chi sta nell'auto il camion sembra andare all'indietro rispetto alle colline lontane. È il calcolo della Figura 3.3, che usa solo due cerchi intorno al Sole. Ne seguono senza aggiunte tre fatti: il moto retrogrado avviene sempre all'opposizione; il pianeta è allora alla minima distanza, e più luminoso; e accade su un arco tanto più piccolo quanto più il pianeta è lontano. In Tolomeo ognuno di questi fatti richiedeva un aggiustamento apposito.

Mercurio e Venere restano vicini al Sole perché le loro orbite sono interne a quella terrestre: dalla Terra non possono apparire lontani dal Sole più di un certo angolo.

Le distanze dei pianeti diventano misurabili. È la novità più profonda. In Tolomeo le dimensioni di ogni deferente erano arbitrarie: ingrandendo insieme deferente ed epiciclo le direzioni previste non cambiano. In Copernico la geometria delle osservazioni fissa invece le distanze dal Sole di tutti i pianeti in unità della distanza Terra–Sole. Per Venere basta l'elongazione massima: in quel momento la linea di vista è tangente all'orbita, e il triangolo Sole–Venere–Terra è rettangolo in Venere. I valori di Copernico sono vicini a quelli moderni (Tabella 3.2, Figura 3.6).

Tabella 3.2 Distanze medie dei pianeti dal Sole: i valori del *De revolutionibus* (arrotondati) e i valori moderni (semiassi maggiori, Appendice, Tabella A.3), con i periodi di rivoluzione intorno al Sole.

Pianeta	Copernico (UA)	Oggi (UA)	Periodo
Mercurio	0,38	0,387	88 giorni
Venere	0,72	0,723	225 giorni
Terra	1	1	1 anno
Marte	1,52	1,524	1,88 anni
Giove	5,22	5,203	11,86 anni
Saturno	9,17	9,537	29,45 anni

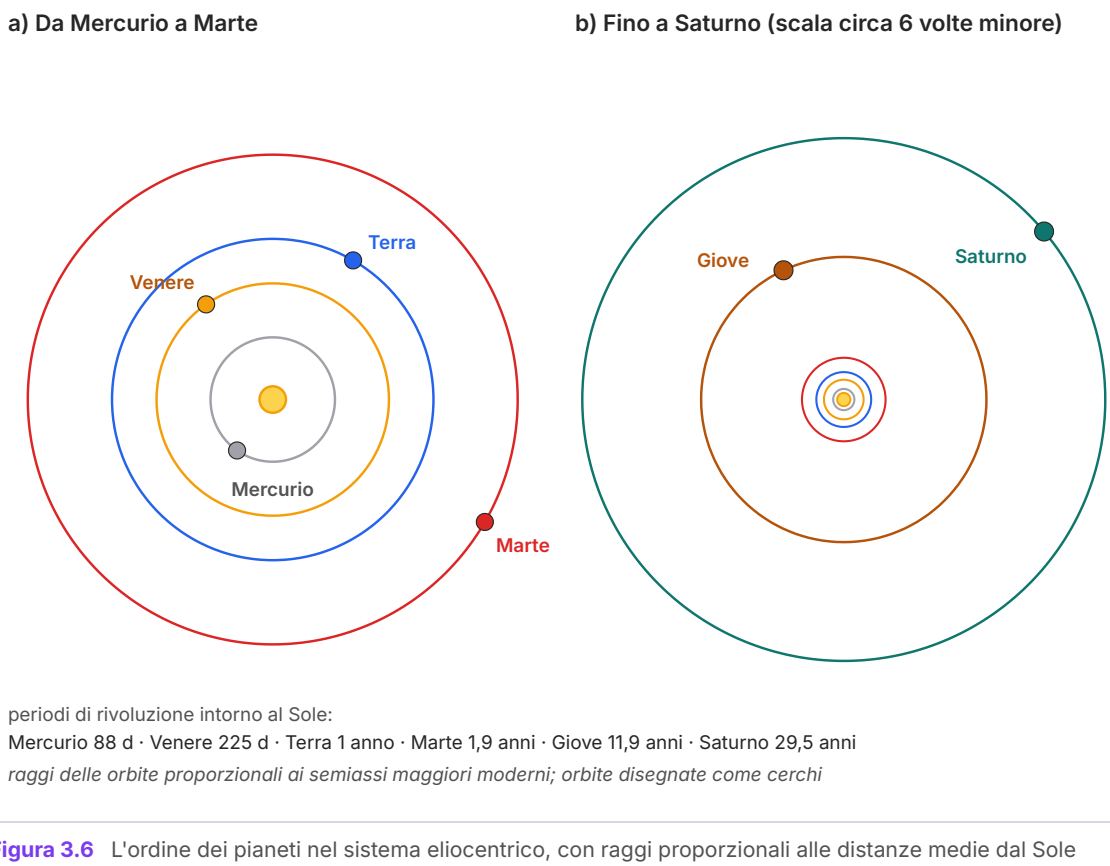


Figura 3.6 L'ordine dei pianeti nel sistema eliocentrico, con raggi proporzionali alle distanze medie dal Sole (Tabella A.3; orbite disegnate come cerchi). a) Da Mercurio a Marte. b) Fino a Saturno, in una scala circa 6 volte minore: le quattro orbite interne occupano il piccolo cerchio centrale. Sotto, i periodi di rivoluzione.

I periodi crescono con la distanza. Dalle osservazioni si misura il **periodo sinodico** S, l'intervallo fra due opposizioni successive (per Marte 780 giorni). Copernico ne ricavò il **periodo siderale** T, il tempo di un giro intorno al Sole, con un ragionamento da gara di corsa: in un giorno la Terra percorre 1/365,26 di giro, Marte $1/T$, e dopo un periodo sinodico la Terra ha guadagnato esattamente un giro. Con i tempi in giorni:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{365{,}26} - \frac{1}{T} \qquad \text{(pianeti esterni)}$$

Per Marte $1/T = 1/365{,}26 - 1/780 = 1{,}46 \times 10^{-3}$ giorni^{-1}, cioè $T \approx 687$ giorni = 1,88 anni. Per un pianeta interno, più veloce della Terra, $1/S = 1/T - 1/365{,}26$. Ne esce un ordine regolare: Mercurio, il più vicino, è il più veloce, Saturno il più lento. Per la prima volta i pianeti formavano un *sistema*, in cui nessuna parte si poteva cambiare senza cambiare le altre.

3.3.3 Che cosa non migliorava

Copernico restava fedele ai moti circolari uniformi; anzi, rifiutava l'equante proprio perché violava quell'ideale. Ma i moti dei pianeti non sono circolari uniformi intorno al Sole, come scoprirà Keplero (capitolo 4), e Copernico dovette reintrodurre epicicli ed eccentrici. Il suo sistema non era più semplice da usare né più preciso: le tavole copernicane sbagliavano, come le tolemaiche, anche di più di un grado. Nel 1543 nessuna osservazione era spiegata da Copernico e non da Tolomeo: c'era un sistema più armonioso e coerente, non più accurato.

Il libro si apriva inoltre con una prefazione non firmata, «Al lettore, sulle ipotesi di quest'opera», secondo cui le ipotesi dell'autore non dovevano essere necessariamente vere: bastava che permettessero calcoli in accordo con le osservazioni. L'aveva scritta il teologo luterano Andreas Osiander, che curava la stampa; lo rese noto Keplero nel 1609. Era la posizione del «salvare i fenomeni», e permise a molti di usare le tavole copernicane senza credere al moto della Terra.

3.3.4 Le obiezioni, e le risposte

Obiezioni fisiche. Già Tolomeo (*Almagesto* I 7) osservava che, se la Terra ruotasse, nubi e oggetti lanciati in alto resterebbero indietro. E la velocità in gioco non è piccola: un punto dell'equatore percorre $2\pi \times 6{,}37 \times 10^6$ m in 86 164 s, circa 465 m/s. La risposta arrivò solo con Galileo e il principio d'inerzia: con la nave del *Dialogo* e il principio di relatività di «Fisica 3, capitolo 13», i corpi sulla Terra condividono il suo moto e lo conservano, e nessun esperimento di meccanica fatto «sotto coverta» rivela un moto uniforme.

Un'obiezione astronomica: la parallasse. Se la Terra gira intorno al Sole, una stella vicina vista a gennaio e a luglio, da due punti lontani 2 UA, dovrebbe apparire spostata rispetto alle stelle molto più lontane (Figura 3.7). È la **parallasse annua**: l'angolo p sotto il quale dalla stella si vede il raggio dell'orbita terrestre. Nessuno riusciva a vederla, e Copernico rispose come Aristarco: le stelle sono troppo lontane. Aveva ragione, ma non poteva dimostrarlo. La parallasse

fu misurata solo nel 1838, da Friedrich Wilhelm Bessel, per la stella 61 Cygni: circa un terzo di secondo d'arco. Anche per la stella più vicina, Proxima Centauri, è appena 0,77″: è l'angolo sotto cui si vede una moneta da un euro a circa 6 km.

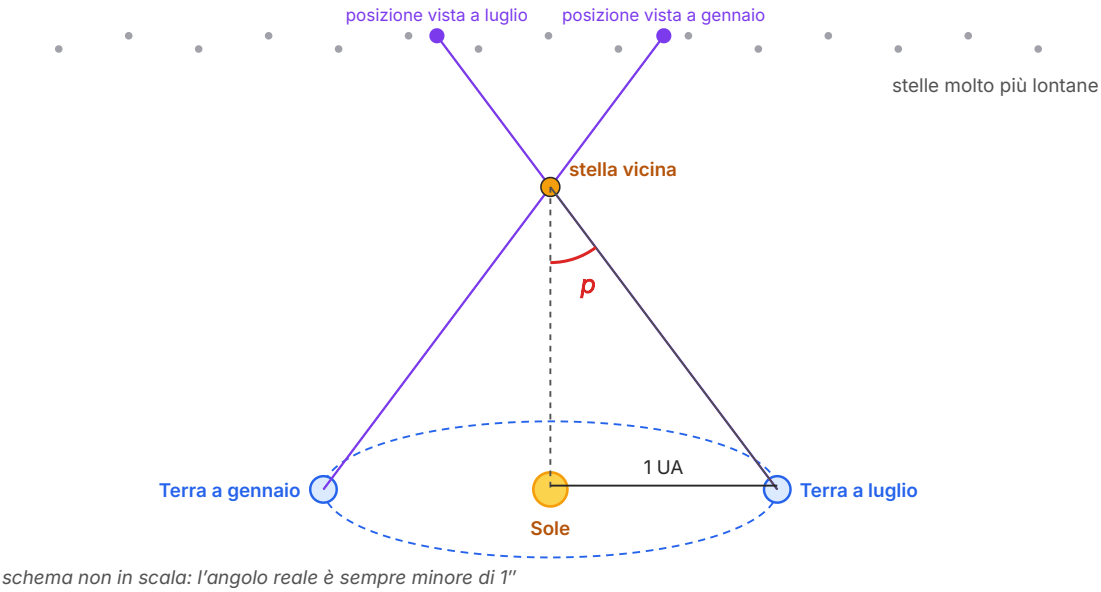


Figura 3.7 La parallasse annua (schema non in scala). Vista a gennaio e a luglio, cioè da due punti distanti 2 UA, una stella vicina si proietta su punti diversi dello sfondo di stelle molto più lontane. L'angolo p sotto il quale dalla stella si vede il raggio dell'orbita terrestre (1 UA) è la parallasse: per tutte le stelle è minore di 1″.

Per angoli così piccoli $p \approx (1\ \text{UA})/d$, con p in radianti. Per Proxima Centauri $p = 0{,}77'' = 3{,}7 \times 10^{-6}$ rad e quindi $d \approx 2{,}7 \times 10^{5}$ UA, circa 4,2 anni-luce. Senza strumenti capaci di misurare angoli centinaia di volte più piccoli di un primo, per quasi tre secoli l'assenza di parallasse fu un argomento contro la Terra in moto, e non a favore.

3.4 Tycho Brahe: misure nuove e un terzo sistema

3.4.1 Una stella nuova e una cometa

Il danese Tycho Brahe (1546–1601) non accettò mai il moto della Terra, ma trasformò l'astronomia in una scienza di misure precise. Nel novembre del 1572 apparve in Cassiopea una stella nuova, brillante quasi quanto Venere, che rimase visibile per più di un anno (oggi sappiamo che era l'esplosione di una stella, una supernova). Tycho non trovò alcuna parallasse diurna: la Luna, osservata in ore diverse della notte, si sposta rispetto alle stelle perché la guardiamo da punti diversi della Terra in rotazione, la stella nuova no. Era dunque molto più lontana della

Luna, nel mondo celeste che Aristotele voleva immutabile. Nel 1577 Tycho trovò allo stesso modo una grande cometa ben oltre la Luna, in moto attraverso le regioni dei pianeti: per Aristotele le comete erano fenomeni dell'atmosfera, e le sfere solide che portavano i pianeti, se una cometa poteva attraversarle, non potevano esistere.

Nell'osservatorio di Uraniborg, sull'isola di Hven, Tycho raccolse per vent'anni posizioni dei pianeti con grandi strumenti a traguardo, quadranti e sestanti senza lenti, con una precisione di circa 1–2 primi d'arco, vicina al limite dell'occhio. Questi dati, passati alla sua morte a Giovanni Keplero, che negli ultimi due anni aveva lavorato con lui a Praga, risolveranno il problema dei pianeti (capitolo 4).

3.4.2 Il sistema ticonico

Tycho rifiutava il moto della Terra per le obiezioni fisiche, per ragioni scritturali e per la parallasse: stelle tanto lontane da non mostrarne alcuna avrebbero dovuto essere enormi, dato che a occhio nudo appaiono come dischetti di qualche primo (oggi sappiamo che quei dischetti sono un effetto dell'occhio e dell'atmosfera). Propose allora il **sistema ticonico**: la Terra è immobile al centro, la Luna e il Sole le girano intorno, e tutti gli altri pianeti girano intorno al Sole.

Le posizioni relative di Terra, Sole e pianeti, nel sistema di Tycho, sono esattamente quelle del sistema copernicano: cambia soltanto il corpo che si considera fermo. Le direzioni in cui vediamo i pianeti sono quindi le stesse, e i due sistemi sono **osservativamente equivalenti** per le posizioni: nessuna misura di direzione, per quanto precisa, può distinguerli. Per decidere servirà un'osservazione di tipo diverso, o una fisica nuova.

3.5 Galileo e il cannocchiale

3.5.1 Il *Sidereus nuncius*

Il cannocchiale non lo inventò Galileo: nel 1608 in Olanda si vendevano già occhiali da lontano che ingrandivano circa tre volte. Galileo Galilei (1564–1642), professore di matematica a Padova, ne sentì parlare nel 1609 e costruì da sé strumenti sempre migliori, fino a una ventina di ingrandimenti. La novità fu puntarli verso il cielo in modo sistematico: nel marzo del 1610 pubblicò ciò che aveva visto nel *Sidereus nuncius*, «Messaggero delle stelle» (Italiano 4, capitolo 4).

La Luna, scrive Galileo, non è un globo perfettamente liscio, come aveva creduto una gran schiera di filosofi, ma «*inaequalem, asperam, cavitatibus tumoribusque confertam*», «disuguale, scabra, piena di cavità e di rilievi», come la faccia della Terra (traduzione della redazione). Vicino al confine fra luce e ombra vedeva punti luminosi nella parte buia: cime di montagne già illuminate dal Sole che sorge, come accade sulla Terra all'alba; con il teorema di Pitagora stimò che fossero alte qualche chilometro. Spiegò anche la luce cinerea, il debole chiarore della parte buia della Luna: è la luce del Sole riflessa dalla Terra. La Terra brilla come la Luna, la Luna ha montagne come la Terra: la separazione fra cielo e Terra perdeva il suo fondamento.

La Via Lattea si scioglieva in una moltitudine di stelle invisibili a occhio nudo; e mentre i pianeti apparivano come dischetti, le stelle restavano punti, segno che sono molto più lontane. **Giove**, dal 7 gennaio 1610, mostrò accanto a sé quattro piccole «stelle» che cambiavano posizione di notte in notte, sempre allineate con il pianeta: gli giravano intorno. Galileo le chiamò *Medicea Sidera*, «stelle medicee», in onore dei Medici; noi diciamo **satelliti medicei** (oggi Io, Europa, Ganimede e Callisto, con periodi di 1,8, 3,6, 7,2 e 16,7 giorni). Ai copernicani si obiettava che una Terra in moto avrebbe perso la Luna: ecco un pianeta che si muove portando con sé quattro lune. La Terra non era più l'unico centro di moti dell'universo.

3.5.2 Le fasi di Venere

Fra la fine del 1610 e l'inizio del 1611 Galileo vide che Venere mostra le fasi come la Luna. Per assicurarsi la priorità la annunciò dapprima con un anagramma, la cui soluzione è il motto in apertura del capitolo: Venere, «la madre degli amori», imita le fasi della Luna, «Cinzia». Ragioniamo come per la Luna (Figura 3.8). Nel sistema tolemaico l'epiciclo di Venere sta sempre fra la Terra e il Sole: Venere ci rivolgerebbe quasi sempre la parte buia e apparirebbe nuova o falcata, mai piena. Se invece Venere gira intorno al Sole, quando è dalla parte opposta del Sole ci mostra quasi tutta la faccia illuminata e appare piena; quando è dalla nostra parte, falcata. E poiché la distanza cambia molto, cambia anche il diametro apparente: Venere piena è piccola, la falce circa sei volte più larga. È ciò che Galileo vide.

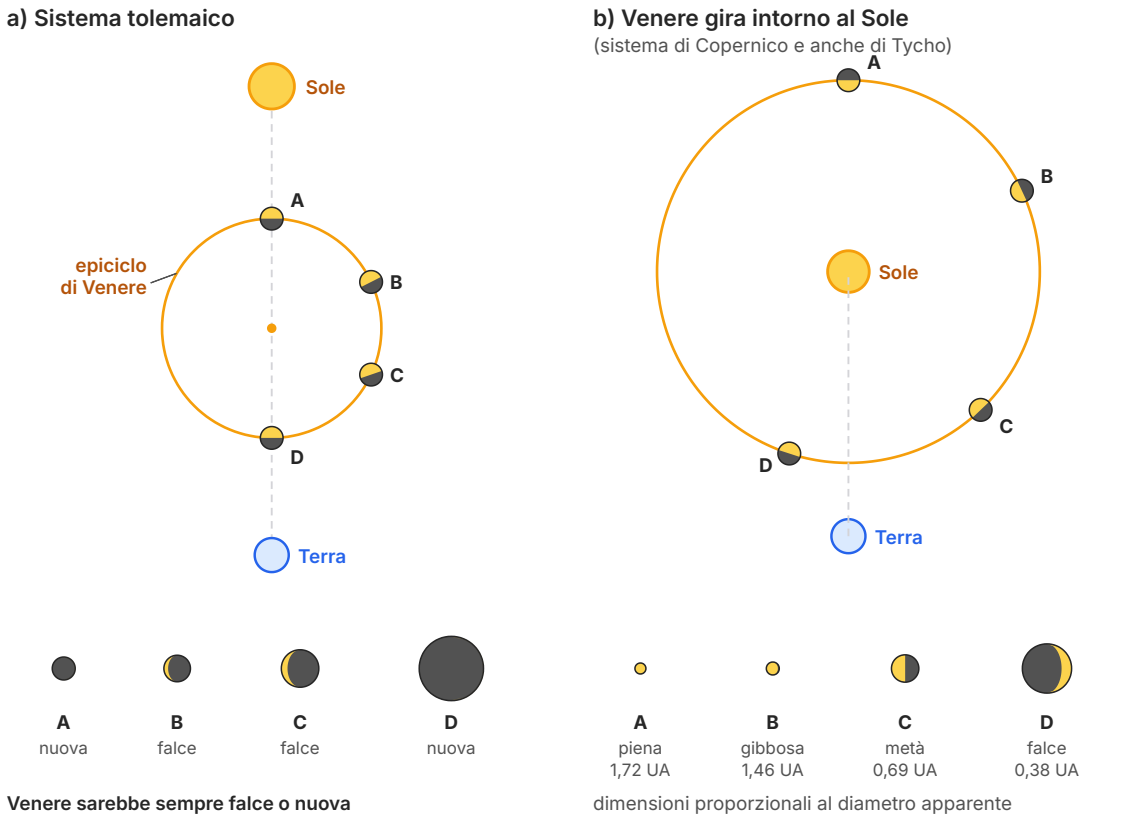


Figura 3.8 Le fasi di Venere in due sistemi. a) Nel sistema tolemaico l'epiciclo di Venere sta fra la Terra e il Sole, con il centro sulla retta Terra–Sole: dalla Terra Venere apparirebbe sempre nuova o falcata (in basso, l'aspetto nelle posizioni A–D). b) Se Venere gira intorno al Sole, come nel sistema di Copernico e anche in quello di Tycho, mostra tutte le fasi; in basso l'aspetto nelle posizioni A–D, con dimensioni proporzionali al diametro apparente calcolato dalla distanza dalla Terra (orbite circolari, Venere a 0,723 UA dal Sole). La metà di Venere rivolta verso il Sole è sempre illuminata.

Le fasi di Venere sono la prima osservazione che *falsifica* il sistema tolemaico, nel senso di «Fisica 3, capitolo 1»: una previsione chiara del modello, contraddetta dai fatti. Ma nel sistema di Tycho Venere gira intorno al Sole come in quello di Copernico, e mostra le stesse fasi: l'osservazione elimina Tolomeo, non Tycho. Dopo il 1611 molti astronomi, anche gesuiti del Collegio Romano, che avevano confermato le osservazioni di Galileo, lasciarono Tolomeo e adottarono proprio il sistema ticonico.

ERRORE FREQUENTE

«Galileo dimostrò con il cannocchiale che la Terra gira intorno al Sole.» Le sue osservazioni demolirono la fisica dei cieli di Aristotele (Luna montuosa, macchie solari, satelliti di Giove) e il sistema di Tolomeo (fasi di Venere), ma nessuna contraddiceva il sistema di Tycho, con la Terra ferma. Le prove dirette del moto della Terra vennero più tardi: la parallasse annua (Bessel, 1838) per la rivoluzione, il pendolo di Foucault («Fisica 3, capitolo 14») per la rotazione. Galileo aveva buone ragioni per essere copernicano; ma una ragione non è ancora una prova.

3.5.3 Le macchie solari, il *Dialogo* e il processo

Proiettando l'immagine del Sole su un foglio, Galileo e in quegli anni altri astronomi osservarono le **macchie solari**, che nascono, cambiano forma e scompaiono, spostandosi sul disco con regolarità: il Sole ruota su sé stesso in circa un mese. Anche il corpo più nobile del cielo cambiava.

Nel 1616 i teologi consultati dal Sant'Uffizio giudicarono contraria alla Scrittura la tesi del Sole immobile al centro del mondo, il *De revolutionibus* fu sospeso finché non fosse corretto e il cardinale Roberto Bellarmino ammonì Galileo a non sostenere più la dottrina copernicana. Nel 1632 Galileo pubblicò a Firenze, in italiano, il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, tolemaico e copernicano: quattro giornate di conversazione fra Salviati, portavoce dell'autore, Sagredo, gentiluomo curioso, e Simplicio, difensore di Aristotele. Il *Dialogo* sosteneva la Terra in moto con la nuova fisica del moto e con le scoperte del cannocchiale; nella quarta giornata proponeva le maree come prova, con una spiegazione sbagliata (le maree si spiegheranno con la gravitazione, capitolo 5). Il sistema di Tycho non vi era discusso.

Nel 1633 Galileo fu processato a Roma dal Sant'Uffizio, giudicato «veementemente sospetto di eresia», costretto ad abiurare e condannato al carcere, commutato negli arresti domiciliari: ad Arcetri, vicino a Firenze, scrisse i *Discorsi* del 1638, su cui si fonda la meccanica che hai studiato lo scorso anno. Sulle ragioni filosofiche e politiche del processo tornerai in Filosofia 4 (capitolo 4). Trentatré anni prima, nel 1600, era stato mandato al rogo a Roma Giordano Bruno, che aveva sostenuto un universo infinito con innumerevoli mondi (Filosofia 4, capitolo 2): una cosmologia filosofica, non fondata su misure, e un processo che riguardò soprattutto tesi teologiche.

3.5.4 Che cosa decide fra i sistemi

La Tabella 3.3 riassume le osservazioni del capitolo e racconta la vera storia del dibattito: nel XVII secolo le osservazioni eliminarono Tolomeo, ma lasciarono in gara Copernico e Tycho. A far pendere la bilancia fu una teoria: Keplero mostrò che con orbite ellittiche intorno al Sole il sistema eliocentrico diventava più preciso di ogni altro, e Newton che una sola legge di gravita-

zione spiega le orbite dei pianeti e la caduta dei gravi, purché sia il Sole, che ha quasi tutta la massa, a stare quasi fermo. È la strada dei prossimi due capitoli.

Tabella 3.3 Le principali osservazioni del capitolo e i tre sistemi del mondo: «sì» se il sistema le spiega o è compatibile con esse, «no» se le contraddice.

Osservazione	Tolomeo	Copernico	Tycho
moto retrogrado dei pianeti	sì, con gli epicicli	sì, effetto prospettico	sì, come Copernico
Mercurio e Venere sempre vicini al Sole	sì, con una regola aggiunta	sì, orbite interne	sì, orbite intorno al Sole
stella nuova del 1572, Luna montuosa, macchie solari	no, con la fisica aristotelica (cieli immutabili)	sì	sì
satelliti di Giove	non previsti	sì	sì
fasi complete di Venere (1610–11)	no	sì	sì
nessuna parallasse annua visibile	sì (Terra ferma)	sì, se le stelle sono lontanissime	sì (Terra ferma)
parallasse annua misurata (1838)	no	sì	no

IN SINTESI

Le idee e le relazioni del capitolo

Angoli in cielo: $1° = 60' = 3600''$; $360° = 2\pi$ rad. Per angoli piccoli $\alpha \approx D/d$ (α in radianti): un oggetto di diametro D a distanza $d \gg D$; per la parallasse $p \approx (1\text{ UA})/d$. Sole e Luna: circa 0,5°.

Distanze: 1 UA = $1{,}496 \times 10^{11}$ m (Terra–Sole); 1 a.l. = $9{,}46 \times 10^{15}$ m (percorsa dalla luce in un anno); tempo di volo della luce $t = d/c$.

Periodi: $1/S = 1/T_\text{T} - 1/T$ (pianeta esterno), $1/S = 1/T - 1/T_\text{T}$ (interno): S sinodico, T siderale, T_T = 365,26 giorni.

I sistemi: Tolomeo, Terra ferma al centro, con deferenti, epicicli, eccentrici ed equanti; Copernico, Sole fermo vicino al centro e Terra in rotazione e rivoluzione, retrogradazioni come effetto prospettico; Tycho, Terra ferma, Sole e Luna intorno alla Terra, pianeti intorno al Sole, equivalente a Copernico per le posizioni.

SINTESI

- Un sistema del mondo è un modello: si giudica da ciò che prevede, e due modelli si distinguono solo con un'osservazione su cui fanno previsioni diverse.
- A occhio nudo il cielo mostra il moto diurno della sfera celeste (23 h 56 min), il moto annuo del Sole lungo l'eclittica, inclinata di 23,4° sull'equatore celeste, il moto della Luna con le sue fasi e i moti dei cinque pianeti.
- I pianeti avanzano in media verso est, ma periodicamente compiono un moto retrogrado; quelli esterni lo fanno all'opposizione, quando sono più luminosi; Mercurio e Venere non si allontanano mai molto dal Sole.
- In cielo si misurano angoli; per angoli piccoli $\alpha \approx D/d$ in radianti. Il Sole e la Luna hanno un diametro apparente di circa 0,5°.
- Eudosso e Aristotele posero la Terra immobile al centro di sfere omocentriche; Aristotele separò il mondo sublunare, mutevole, da quello celeste, di etere e immutabile, e dimostrò la sfericità della Terra con le eclissi di Luna.
- Tolomeo (II secolo d.C.) riprodusse i moti dei pianeti con deferenti, epicicli, eccentrici ed equanti: un sistema di calcolo efficace, nella tradizione del «salvare i fenomeni».
- Aristarco di Samo (III secolo a.C.) propose una Terra in moto intorno al Sole, come riferisce Archimede, e tentò di misurare il rapporto fra le distanze del Sole e della Luna.
- Copernico (*De revolutionibus*, 1543) pose il Sole fermo vicino al centro: spiegò in modo naturale il moto retrogrado e la vicinanza di Mercurio e Venere al Sole, e ricavò distanze e periodi dei pianeti; ma usava ancora cerchi ed epicicli e non era più preciso di Tolomeo.
- L'assenza di parallasse annua richiedeva stelle lontanissime; la parallasse fu misurata solo nel 1838 (Bessel) ed è sempre minore di 1″.
- Tycho Brahe mostrò con misure precise che la stella nuova del 1572 e la cometa del 1577 stanno oltre la Luna; il suo sistema, con la Terra ferma, è osservativamente equivalente a quello copernicano.
- Con il cannocchiale (*Sidereus nuncius*, 1610) Galileo vide i monti della Luna, le stelle della Via Lattea, i satelliti di Giove; le fasi di Venere confutarono il sistema tolemaico ma non quello di Tycho.
- Il *Dialogo* (1632) difese il moto della Terra con la nuova fisica; il processo del 1633 condannò Galileo. La scelta fra Copernico e Tycho fu decisa da Keplero e da Newton.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il moto retrogrado di Marte si osserva:
   - **A.** quando Marte è in congiunzione con il Sole
   - **B.** intorno all'opposizione, quando Marte è più luminoso
   - **C.** solo nei mesi estivi
   - **D.** quando Marte inverte il verso del suo moto sull'orbita

2. ● Nel sistema di Tolomeo l'epiciclo è:
   - **A.** un cerchio su cui si muove il pianeta, il cui centro percorre il deferente
   - **B.** il cerchio su cui si muove la Terra
   - **C.** il punto da cui il moto del pianeta appare uniforme
   - **D.** la sfera delle stelle fisse

3. ●● Quale osservazione di Galileo è incompatibile con il sistema di Tolomeo ma non con quello di Tycho?
   - **A.** le montagne della Luna
   - **B.** la Via Lattea risolta in stelle
   - **C.** la serie completa delle fasi di Venere
   - **D.** le macchie solari

4. ● La parallasse annua di una stella fu misurata per la prima volta:
   - **A.** da Aristarco, nel III secolo a.C.
   - **B.** da Copernico, nel 1543
   - **C.** da Galileo, nel 1610
   - **D.** da Bessel, nel 1838

5. ●● Rispetto al sistema di Tolomeo, il sistema pubblicato da Copernico nel 1543:
   - **A.** spiegava in modo naturale il moto retrogrado, ma usava ancora cerchi ed epicicli e non era più preciso
   - **B.** era molto più preciso, perché usava orbite ellittiche
   - **C.** eliminava ogni epiciclo e ogni eccentrico
   - **D.** era confermato dalla parallasse delle stelle

6. ● Nel sistema di Tycho Brahe:
   - **A.** la Terra gira intorno al Sole e i pianeti intorno alla Terra
   - **B.** la Terra è ferma, il Sole e la Luna le girano intorno, gli altri pianeti girano intorno al Sole
   - **C.** tutti i pianeti, compreso il Sole, girano intorno alla Terra su epicicli
   - **D.** il Sole è fermo al centro e la Terra ruota ma non si sposta

7. ● L'ipotesi eliocentrica di Aristarco di Samo ci è nota soprattutto grazie a:
   A. il *De caelo* di Aristotele
   B. l'*Almagesto* di Tolomeo
   C. l'*Arenario* di Archimede
   D. il *Sidereus nuncius* di Galileo

8. ● Fra le seguenti osservazioni, quale **non** poteva essere fatta da Galileo nel 1610?
   A. i rilievi e le cavità della Luna
   B. quattro satelliti che girano intorno a Giove
   C. le stelle della Via Lattea
   D. la parallasse annua delle stelle

Vero o falso

9. ● Nel Medioevo i dotti credevano che la Terra fosse piatta. V / F

10. ● Mercurio e Venere si vedono sempre a una distanza angolare dal Sole minore di 50°. V / F

11. ● Nel *De revolutionibus* il Sole è esattamente al centro di orbite circolari percorse senza epicicli. V / F

12. ●● Nel sistema copernicano un pianeta in moto retrogrado si muove davvero all'indietro sulla sua orbita. V / F

13. ●● Il sistema di Tycho e quello di Copernico prevedono le stesse direzioni in cui si vedono i pianeti dalla Terra. V / F

Applicare

14. ● Esprimi: a) 0,52° in primi d'arco; b) 1800″ in gradi; c) 1′ in gradi e in radianti. d) Tycho misurava le posizioni con una precisione di circa 1′: a quale spostamento corrisponde 1′ alla distanza di 1 m dall'occhio?

15. ● Nella Figura 3.3: a) quali posizioni numerate cadono nel tratto di moto retrogrado? b) Fra la posizione 2 e la 6 trascorrono 120 giorni: di quanti gradi è cambiata la longitudine di Marte? c) Completa: il moto retrogrado avviene quando la Terra _____ Marte, che in quei giorni si trova alla distanza _____ dalla Terra.

16. ●● Fra due opposizioni successive di Giove passano 398,9 giorni. Con la regola di Copernico calcola il periodo di rivoluzione di Giove intorno al Sole, in giorni e in anni.

17. ● I periodi dei satelliti medicei sono: Io 1,77 giorni, Europa 3,55 giorni, Ganimede 7,15 giorni, Callisto 16,69 giorni. a) Galileo osservò che il satellite con il periodo più lungo è anche il più lontano da Giove: in quali dei sistemi studiati nel capitolo la stessa regola vale per pianeti che girano intorno al Sole, con distanze ricavate dalle osservazioni? b) Quanti giri completi compie Io in 30 giorni?

18. ●● Nella Figura 3.8b leggi le distanze di Venere dalla Terra nelle posizioni A (piena) e D (falce). Di quante volte è maggiore il diametro apparente della falce rispetto a quello di Venere piena? Galileo osservò proprio questo: perché l'osservazione è difficile da conciliare con l'idea che Venere stia sempre alla stessa distanza dalla Terra?

19. ● a) Quanti minuti impiega la luce per arrivare dalla Terra a Giove, quando Giove dista 4,2 UA (opposizione) e quando dista 6,2 UA? b) La stella più vicina, Proxima Centauri, dista 4,24 a.l.: esprimi la distanza in UA.

Problemi

20. ●● Una moneta da un euro ha diametro 23,25 mm. A quale distanza dall'occhio deve stare per coprire esattamente la Luna piena, il cui diametro apparente è 0,52°? Che cosa cambierebbe per il Sole, di diametro apparente 0,53°?

21. ●● Nel triangolo di Aristarco (Figura 3.5) poni la distanza Terra–Luna uguale a 1 e la distanza Terra–Sole uguale a 19, il valore di Aristarco. a) Calcola con il teorema di Pitagora la distanza Luna–Sole. b) Il Sole e la Luna hanno lo stesso diametro apparente: quanto vale, secondo Aristarco, il rapporto fra il diametro del Sole e quello della Luna? c) Con il diametro della Luna, 3474 km, calcola il diametro del Sole secondo Aristarco e quello che si ottiene con il rapporto vero delle distanze, circa 390. Di quale fattore sbagliava Aristarco?

22. ●●● (Con Fisica 3, capitolo 12) La Terra gira intorno al Sole su un'orbita quasi circolare di raggio $1{,}496 \times 10^{11}$ m in 365,26 giorni. a) Calcola la sua velocità orbitale in km/s e in km/h. b) Calcola la sua accelerazione centripeta. c) Calcola la velocità di un punto dell'equatore dovuta alla rotazione (raggio terrestre $6{,}37 \times 10^{6}$ m, giorno siderale 86 164 s). d) Un oppositore di Copernico obietta: «se ci muovessimo così in fretta, lo sentiremmo». Rispondi usando i risultati e il principio di relatività galileiana.

23. ●●● Galileo stimò l'altezza delle montagne lunari così: una cima appare illuminata nella parte buia, oltre il confine fra luce e ombra, alla distanza d da esso; il raggio di Sole che la sfiora è tangente alla Luna nel punto del confine. Il raggio lunare R, la distanza d e la retta che va dal centro della Luna alla cima formano allora un triangolo rettangolo, la cui ipotenusa è $R + h$. a) Disegna la figura. b) Con $R = 1740$ km e d uguale a un ventesimo del diametro lunare, calcola l'altezza h della montagna. c) Confrontala con il monte Bianco (4,8 km).

Ragionare e argomentare

24. ●●● Aristotele (*De caelo* II 14) scrive che nelle eclissi di Luna il bordo dell'ombra è sempre convesso, e che, poiché l'eclissi è dovuta all'interposizione della Terra, la Terra è sferica (testo nel paragrafo sul cosmo di Aristotele). Che cosa afferma il passo? Il ragionamento è corretto? Un disco piatto potrebbe dare la stessa ombra in una singola eclissi? Perché l'argomento diventa convincente se si considerano molte eclissi?

25. ●● Copernico (*De revolutionibus* I 10): «In mezzo a tutti sta il Sole. Chi infatti, in questo bellissimo tempio, porrebbe questa lampada in un luogo diverso o migliore di quello da cui può illuminare tutto insieme?» (traduzione della redazione). È un argomento fisico, osservativo o estetico? Indica due argomenti più forti a favore del suo sistema che Copernico poteva presentare nel 1543.

26. ●●● Per ciascuna delle seguenti osservazioni di' quali sistemi (Tolomeo, Copernico, Tycho) la spiegano: a) il moto retrogrado di Marte all'opposizione; b) Venere che appare piena e piccola; c) l'assenza di parallasse annua visibile a occhio nudo; d) la parallasse di 61 Cygni misurata nel 1838. Quale delle quattro discrimina fra Copernico e Tycho? Perché fu decisiva solo nel 1838?

27. ●● Nel *Dialogo* Salviati dichiara la sua ammirazione per Aristarco e Copernico, che hanno saputo «far la ragione tanta violenza al senso». Che cosa intende? Fai un esempio dal capitolo in cui la ragione deve correggere i sensi. È sempre un merito, in fisica, andare contro ciò che si vede? Rispondi pensando al metodo sperimentale di «Fisica 3, capitolo 1».

28. ●● Archimede riferisce che, secondo le ipotesi di Aristarco, il cosmo risulta «molte volte più grande» di quanto si credeva. Spiega il collegamento fra il moto della Terra intorno al Sole e le dimensioni del cosmo. Quale osservazione avrebbe potuto confermare l'ipotesi di Aristarco, e perché non era possibile farla nell'antichità?

29. ●●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Con le fasi di Venere Galileo dimostrò che la Terra gira intorno al Sole, e il processo del 1633 condannò una verità già provata.» Correggi la prima parte della frase spiegando che cosa dimostrano davvero le fasi di Venere, e indica quali osservazioni hanno poi provato la rivoluzione e la rotazione della Terra.

30. ●● Tolomeo (*Almagesto* I 7) obietta, in sostanza, che se la Terra ruotasse da ovest verso est, le nubi e gli oggetti lanciati in alto resterebbero indietro e si vedrebbero sempre muoversi verso ovest. Che cosa afferma l'obiezione? Rispondi con la nave di Galileo («Fisica 3, capitolo 13») e indica un esperimento che mostra davvero la rotazione della Terra.

PER APPROFONDIRE

- [KUH] T. S. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*: la storia del dibattito da Aristotele a Newton, raccontata come il passaggio da un modo di vedere il mondo a un altro.
- [COP] N. Copernico, *De revolutionibus orbium coelestium*: il libro I, che espone il sistema senza calcoli, e in particolare il capitolo 10 sull'ordine dei cieli.
- [DIA] G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*: la seconda giornata, sul moto della Terra e le obiezioni della torre e della nave.
- [ARI] Aristotele, *Il cielo*: il libro II, sulla forma e sulla posizione della Terra.

Glossario del capitolo

Deferente
Nel sistema tolemaico, cerchio percorso dal centro dell'epiciclo di un pianeta.

Diametro apparente
Angolo sotto il quale si vede il disco di un corpo; per il Sole e la Luna circa 0,5°. Per angoli piccoli vale D/d in radianti.

Eclittica
Cerchio massimo della sfera celeste percorso dal Sole in un anno, inclinato di 23,4° sull'equatore celeste.

Elongazione
Distanza angolare di un pianeta dal Sole, vista dalla Terra; per Mercurio e Venere ha un valore massimo.

Epiciclo
Nel sistema tolemaico, piccolo cerchio percorso da un pianeta, il cui centro si muove sul deferente; dal greco ἐπί e κύκλος.

Equante
Nel sistema tolemaico, punto simmetrico della Terra rispetto al centro del deferente, dal quale il centro dell'epiciclo appare muoversi con velocità angolare costante.

Moto diurno
Rotazione apparente di tutta la sfera celeste da est verso ovest in circa 23 h 56 min, dovuta alla rotazione della Terra.

Moto retrogrado
Moto apparente di un pianeta verso ovest fra le stelle, per qualche settimana; per i pianeti esterni avviene intorno all'opposizione.

Opposizione
Posizione di un pianeta esterno dalla parte opposta al Sole rispetto alla Terra.

Parallasse annua
Angolo sotto il quale da una stella si vedrebbe il raggio dell'orbita terrestre; è sempre minore di 1″ e fu misurato per la prima volta nel 1838.

Periodo siderale
Tempo impiegato da un pianeta per compiere un giro completo intorno al Sole.

Periodo sinodico
Intervallo di tempo fra due configurazioni uguali di un pianeta rispetto al Sole e alla Terra, per esempio fra due opposizioni.

Pianeta
Astro che si sposta fra le stelle fisse; dal greco πλανήτης, «errante».

Satelliti medicei
I quattro maggiori satelliti di Giove, scoperti da Galileo nel 1610, che li chiamò «stelle medicee» (*Medicea Sidera*) in onore dei Medici.

Sfera celeste
Sfera immaginaria, centrata nell'osservatore, su cui si proiettano le posizioni degli astri.

Sfere omocentriche
Nel modello di Eudosso, sfere concentriche alla Terra che ruotano con velocità costante intorno ad assi diversi e trasportano gli astri.

Sistema eliocentrico
Sistema del mondo con il Sole fermo al centro (o vicino al centro) e la Terra in moto intorno a esso; è quello di Aristarco e di Copernico.

Sistema ticonico
Sistema di Tycho Brahe: Terra ferma al centro, Luna e Sole intorno alla Terra, gli altri pianeti intorno al Sole.

Unità astronomica
Distanza media fra la Terra e il Sole: 1 UA = $1{,}496 \times 10^{11}$ m.

Soluzioni

1. B. Il moto retrogrado di un pianeta esterno avviene quando la Terra lo sorpassa, cioè intorno all'opposizione; il pianeta è allora alla minima distanza e più luminoso. Sulla sua orbita non inverte mai il moto (D).

2. A. L'epiciclo è il cerchio percorso dal pianeta; il suo centro scorre sul deferente. C descrive l'equante.

3. C. Nel sistema tolemaico Venere starebbe sempre fra la Terra e il Sole e non apparirebbe mai piena; in quello di Tycho gira intorno al Sole e mostra tutte le fasi. A, B e D contraddicono la fisica dei cieli di Aristotele, ma non la disposizione dei pianeti di Tolomeo né quella di Tycho.

4. D. Bessel, 1838, per 61 Cygni (circa un terzo di secondo d'arco).

5. A. Copernico manteneva i moti circolari uniformi e quindi epicicli ed eccentrici; le sue tavole non erano più precise di quelle tolemaiche. Le ellissi (B) sono di Keplero; la parallasse (D) fu misurata solo nel 1838.

6. B. È il sistema geo-eliocentrico di Tycho: la Terra è ferma al centro.

7. C. Archimede, nell'*Arenario*, riferisce che Aristarco supponeva immobili il Sole e le stelle fisse e la Terra in moto su un cerchio intorno al Sole.

8. D. La parallasse annua è minore di 1″: fu misurata solo nel 1838. Le altre tre osservazioni sono nel *Sidereus nuncius*.

9. F. Dopo Aristotele la sfericità della Terra fu sempre accettata dai dotti; la leggenda della Terra piatta medievale è ottocentesca.

10. V. Le loro elongazioni massime sono circa 28° (Mercurio) e circa 47° (Venere), perché le loro orbite sono interne a quella terrestre.

11. F. Il Sole è vicino al centro, non esattamente nel centro, e Copernico usa ancora epicicli ed eccentrici per riprodurre i moti osservati.

12. F. Il moto retrogrado è solo apparente: nasce dal sorpasso della Terra, mentre il pianeta continua a percorrere l'orbita sempre nello stesso verso.

13. V. Le posizioni relative di Terra, Sole e pianeti sono le stesse nei due sistemi; cambia solo il corpo considerato fermo, e quindi le direzioni osservate coincidono.

14. a) $0{,}52° \times 60'/° = 31'$ (31,2′). b) $1800'' / 3600''/° = 0{,}50°$. c) $1' = 1/60° = 0{,}0167° = 0{,}0167 \times \pi/180$ rad $= 2{,}9 \times 10^{-4}$ rad. d) $s = \alpha\, d = 2{,}9 \times 10^{-4} \times 1000$ mm $= 0{,}29$ mm: meno di un terzo di millimetro a un metro.

15. a) Le posizioni 3, 4 e 5 (fra circa −36 e +36 giorni). b) Dalla posizione 2 (circa +4,6°) alla 6 (circa −4,6°) la longitudine è diminuita di circa 9°: nel complesso, in quei 120 giorni, Marte è arretrato. c) sorpassa; minima.

16. $1/T = 1/365{,}26 - 1/398{,}9 = 2{,}7378 \times 10^{-3} - 2{,}5069 \times 10^{-3} = 2{,}309 \times 10^{-4}$ giorni^{-1}, quindi $T = 4331$ giorni $= 4331/365{,}26$ anni = **11,86 anni**, in accordo con la Tabella A.3.

17. a) Il sistema copernicano e, con la stessa geometria, quello di Tycho: più un pianeta è lontano dal Sole, più lungo è il suo periodo. Giove e i suoi satelliti sono un piccolo modello del sistema eliocentrico. b) 30 / 1,77 = 16,9: **16 giri completi**.

18. A: 1,72 UA; D: 0,38 UA. Il diametro apparente è inversamente proporzionale alla distanza: 1,72/0,38 = **4,5 volte**. Se Venere fosse sempre alla stessa distanza dalla Terra, come sulle sfere di Eudosso o su un deferente centrato nella Terra senza epiciclo, il suo diametro apparente non cambierebbe; una variazione di 4–5 volte richiede un'enorme variazione di distanza, che si ha naturalmente se Venere gira intorno al Sole.

19. a) 1 UA $= 1{,}496 \times 10^{11}$ m. $t = d/c$: $4{,}2 \times 1{,}496 \times 10^{11}$ m / $(3{,}00 \times 10^{8}$ m/s$) = 2{,}09 \times 10^{3}$ s = **35 min**; 6,2 UA:

$3{,}09 \times 10^3$ s = **52 min**. b) $4{,}24 \times 9{,}46 \times 10^{15}$ m = $4{,}01 \times 10^{16}$ m; diviso per $1{,}496 \times 10^{11}$ m: **$2{,}68 \times 10^5$ UA**.

20. $\alpha = 0{,}52° \times \pi/180° = 9{,}08 \times 10^{-3}$ rad; $d = D/\alpha$ = 23,25 mm / $9{,}08 \times 10^{-3}$ = $2{,}56 \times 10^3$ mm = **2,6 m**. Per il Sole il diametro apparente è quasi lo stesso, e la moneta lo coprirebbe a circa 2,5 m (2,51 m); ma non va mai fatto guardando il Sole: si danneggia la vista.

21. a) Luna–Sole = $\sqrt{(19^2 - 1^2)} = \sqrt{360}$ = **19,0** (18,97): quasi uguale all'ipotenusa, perché l'angolo in Terra è vicino a 90°. b) Stesso diametro apparente: i diametri stanno come le distanze, $D_S/D_L = 19$. c) Aristarco: 19×3474 km = $6{,}6 \times 10^4$ km; con il rapporto vero: 390×3474 km = $1{,}35 \times 10^6$ km (il valore misurato è $1{,}39 \times 10^6$ km). Aristarco sottostimava il Sole di un fattore circa 390/19 ≈ **20**.

22. a) $v = 2\pi r/T = 2\pi \times 1{,}496 \times 10^{11}$ m / (365,26 × 86 400 s) = $2{,}98 \times 10^4$ m/s = **29,8 km/s** = **$1{,}07 \times 10^5$ km/h**. b) $a_c = v^2/r = (2{,}98 \times 10^4 \text{ m/s})^2 / 1{,}496 \times 10^{11}$ m = **$5{,}9 \times 10^{-3}$ m/s²**, circa 1/1650 di g. c) $v = 2\pi \times 6{,}37 \times 10^6$ m / 86 164 s = **465 m/s**. d) Traccia. Non sentiamo la velocità, ma solo le accelerazioni: per il principio di relatività galileiana in un sistema in moto rettilineo uniforme nessun esperimento meccanico rivela il moto, e tutto ciò che sta sulla Terra (aria, nubi, sassi) condivide la sua velocità e la conserva per inerzia. Le accelerazioni dei moti della Terra sono piccolissime (b), e la Terra con tutto ciò che contiene è in caduta libera verso il Sole: per questo, a differenza della frenata di un autobus, non producono effetti sensibili.

23. a) Triangolo rettangolo con cateti R (dal centro al punto del confine) e d (lungo il raggio di Sole tangente), e ipotenusa $R + h$ (dal centro alla cima). b) d = 3480 km / 20 = 174 km; $(R + h)^2 = R^2 + d^2 \Rightarrow R + h = \sqrt{(1740^2 + 174^2)}$ km = 1748,7 km, quindi $h \approx$ **8,7 km**. c) Quasi il doppio del monte Bianco. (Il risultato dipende molto da d, che è difficile da stimare: le montagne lunari più alte raggiungono in effetti diversi chilometri.)

24. Traccia. Il passo afferma che la forma dell'ombra della Terra sulla Luna è sempre un arco di cerchio, e ne deduce che la Terra è una sfera. Il ragionamento è corretto ma non basta un'eclissi sola: un disco piatto rivolto verso il Sole darebbe anch'esso un'ombra circolare. Poiché però le eclissi avvengono con il Sole e la Luna in posizioni molto diverse nel cielo, cioè con la Terra illuminata da ogni direzione, e l'ombra è sempre circolare, l'unico corpo che proietta sempre un'ombra circolare è la sfera. Lo si può controllare con una lampada e oggetti di forme diverse.

25. Traccia. È soprattutto un argomento estetico e simbolico: il posto «migliore» per la lampada del mondo. Argomenti più forti: il moto retrogrado spiegato come effetto prospettico, con la sua coincidenza con l'opposizione e la massima luminosità; Mercurio e Venere sempre vicini al Sole senza regole aggiunte; le distanze dei pianeti ricavate dalle osservazioni e l'ordine regolare dei periodi, che fanno del sistema un insieme coerente.

26. a) Tutti e tre (Tolomeo con gli epicicli). b) Copernico e Tycho; non Tolomeo. c) Tolomeo e Tycho (Terra ferma) e anche Copernico, se le stelle sono lontanissime. d) Solo Copernico: la parallasse richiede che la Terra si sposti. Discrimina la d); fu decisiva solo nel 1838 perché la parallasse è minore di 1″, centinaia di volte meno di ciò che distingue l'occhio nudo e molto meno di ciò che misuravano i primi cannocchiali.

27. Traccia. Salviati intende che Aristarco e Copernico hanno creduto al ragionamento (la coerenza del sistema) contro l'evidenza dei sensi, che ci mostra una Terra ferma e un Sole in moto. Esempi: il moto retrogrado, che i sensi vedono e la ragione interpreta come apparenza; la Luna all'orizzonte che sembra più grande, ma ha lo stesso diametro apparente (laboratorio). In fisica non basta andare contro i sensi: occorre che la teoria faccia previsioni che possano essere controllate con osservazioni e misure (fasi di Venere, parallasse); i sensi si correggono con strumenti e misure, non si ignorano.

28. Traccia. Se la Terra gira intorno al Sole, nel corso dell'anno osserviamo le stelle da punti lontani fra loro 2 UA; le stelle dovrebbero mostrare uno spostamento apparente, la parallasse annua. Non vedendolo, bisogna supporre che le stelle siano così lontane che lo spostamento è impercettibile: di qui un cosmo «molte volte più grande». La conferma

sarebbe stata proprio la misura della parallasse, impossibile nell'antichità perché richiede di misurare angoli minori di 1″, mentre l'occhio nudo arriva a circa 1′.

29. Traccia. Le fasi di Venere dimostrano che Venere gira intorno al Sole, e quindi confutano il sistema tolemaico; ma sono previste ugualmente dal sistema di Tycho, nel quale la Terra è ferma, e quindi non provano il moto della Terra. Le prove dirette sono arrivate dopo: la parallasse annua delle stelle (Bessel, 1838) per la rivoluzione, il pendolo di Foucault (1851) per la rotazione. Nel 1633 il moto della Terra era quindi un'ipotesi ben argomentata, non ancora provata da osservazioni dirette.

30. Traccia. L'obiezione afferma che, se il suolo si muovesse verso est, i corpi non attaccati alla Terra resterebbero indietro. Come la goccia nella nave di Galileo, che cade ai piedi del secchiello anche se la nave si muove, l'aria, le nubi e gli oggetti lanciati condividono già il moto della Terra e lo conservano per inerzia: in un sistema in moto (quasi) rettilineo uniforme gli esperimenti di meccanica si svolgono come in uno fermo. Un esperimento che rivela la rotazione è il pendolo di Foucault, il cui piano di oscillazione ruota lentamente rispetto al suolo («Fisica 3, capitolo 14»).