

ferma. Presto l'autorevolezza degli insegnanti, dei genitori e dei testi scolastici li persuade che la Terra è, in realtà, un pianeta e che si muove; il loro senso comune viene rieducato e le argomentazioni suggerite dall'esperienza di ogni giorno perdono la loro efficacia. Ma la rieducazione è essenziale (senza di essa queste argomentazioni hanno un'immediata forza di persuasione) e inoltre le fonti pedagogiche che noi e i nostri figli accettiamo non erano a disposizione degli antichi. I greci potevano soltanto contare sull'osservazione e sulla ragione e non produssero alcuna prova del moto della Terra. Senza l'aiuto di telescopi oppure di complicate argomentazioni matematiche che non hanno alcun riferimento apparente con l'astronomia, non si può produrre nessuna prova reale che la Terra sia un pianeta in movimento.

Le osservazioni effettuabili ad occhio nudo si adattano benissimo all'universo a due sfere (l'universo accettato nella pratica dal navigatore e dall'agrimensore) e non esiste di esse alcuna spiegazione più naturale. Non è difficile capire perché gli antichi credessero nell'universo a due sfere. Il problema è di scoprire perché tale concezione sia stata abbandonata.

Capitolo secondo

Il problema dei pianeti

Il moto planetario apparente.

Se il Sole e le stelle fossero i soli corpi celesti visibili ad occhio nudo, l'uomo moderno potrebbe ancora accettare i principi dell'universo a due sfere. Li avrebbe certamente accettati fino all'invenzione del telescopio, più di mezzo secolo dopo la morte di Copernico. Esistono tuttavia altri importanti corpi celesti, i pianeti in particolare, e l'interesse dell'astronomo per questi corpi è la causa principale della rivoluzione copernicana. Ancora una volta prenderemo in considerazione delle osservazioni, prima di impegnarci in spiegazioni interpretative. E ancora una volta la discussione delle interpretazioni ci porrà di fronte ad un nuovo e fondamentale problema sulla struttura delle credenze scientifiche.

Il termine pianeta deriva da una parola greca che significa « errante » e venne usato fin dopo la morte di Copernico per distinguere quei corpi celesti che si muovevano o « erravano » fra le stelle da quegli altri le cui posizioni relative rimanevano fisse. Per i greci ed i loro successori il Sole era uno dei sette pianeti. Gli altri erano la Luna, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Le stelle e questi sette pianeti erano i soli corpi riconosciuti nell'antichità come corpi celesti. Nessun altro pianeta venne scoperto fino al 1781, quando la teoria copernicana era stata accettata da molto tempo. Le comete, ben note nel mondo antico, non erano considerate corpi celesti prima della rivoluzione copernicana (cfr. cap. VI).

Tutti i pianeti si comportano un po' come il Sole, sebbene i loro moti siano costantemente più complessi. Tutti hanno, unitamente alle stelle, un moto giornaliero in

direzione ovest e tutti si spostano gradualmente in direzione est fra le stelle, fino a tornare approssimativamente alla loro posizione originaria. Durante il loro moto, i pianeti si mantengono vicini all'eclittica, deviando talora a nord di essa e talora a sud, ma assai raramente abbandonando la fascia dello zodiaco: una striscia immaginaria di cielo che si estende per un arco di 8° da ambo le parti dell'eclittica. Questo è tutto quello che i pianeti hanno in comune e qui comincia lo studio delle caratteristiche che li diversificano.

La Luna si sposta lungo l'eclittica piú velocemente e meno regolarmente del Sole. Essa completa mediamente un ciclo attraverso lo zodiaco in 27 giorni e un terzo, ma il tempo impiegato per ogni singolo ciclo può differire da questa media fino ad uno scarto di 7 ore. Inoltre l'aspetto del disco lunare varia notevolmente durante il moto. Quando c'è la Luna nuova il disco è completamente invisibile o molto scuro; poi comincia ad apparire un sottile e luminoso quarto di Luna che cresce gradualmente, fino a che, una settimana circa dopo la Luna nuova, diventa visibile un settore semicircolare. Due settimane circa dopo la Luna nuova, appare il disco circolare pieno; in seguito il ciclo delle fasi si inverte, la Luna a poco a poco si assottiglia e ridiventa Luna nuova un mese circa dopo la precedente Luna nuova. Il ciclo delle fasi è ricorrente, come il viaggio della Luna attraverso i segni dello zodiaco; ma i due cicli lunari sono sensibilmente sfasati. La Luna nuova ricompare dopo un intervallo medio di 29 giorni e mezzo (i singoli cicli possono differire da questa media fino a mezza giornata) e, poiché tale intervallo risulta di 2 giorni piú lungo del periodo medio di un viaggio attraverso lo zodiaco, la posizione delle successive Lune nuove deve spostarsi gradualmente verso est attraverso le costellazioni. Se in un determinato mese la Luna nuova cade nella posizione dell'equinozio primaverile, la Luna stessa sarà ancora in fase calante allorquando ritornerà all'equinozio primaverile dopo 27 giorni e un terzo. La Luna nuova tarderà ancora circa 2 giorni ad apparire e, in questo intervallo di tempo, il disco lunare si sposterà dall'equinozio in direzione est di quasi 30° .

Le fasi della Luna, essendo opportunamente intervalate e facilmente osservabili, fornirono le piú antiche unità del calendario. Forme primordiali della settimana e del mese compaiono fin dal III millennio a. C. in un calendario babilonese, in cui ogni mese cominciava con l'apparizione del primo quarto ed era poi suddiviso, al settimo al quattordicesimo e al ventunesimo giorno, dalla ricorrenza dei « quarti » del ciclo lunare. Agli albori della civiltà, gli uomini conteggiarono con ogni probabilità Lune nuove e quarti di Luna per misurare intervalli di tempo, e, col progredire della civiltà stessa, cercarono a piú riprese di inserire queste unità fondamentali in un calendario organico e a lungo termine: un calendario cioè che permettesse la registrazione di avvenimenti storici e la formulazione di accordi da onorarsi in una determinata data del futuro.

Ma la semplice ed ovvia unità lunare si dimostrò inadatta a questo compito. Le successive Lune nuove possono essere separate da intervalli di 29 o 30 giorni, e soltanto una complessa teoria matematica che richiede lunghe serie di osservazioni e studi sistematici potrebbe stabilire la lunghezza di un determinato mese del futuro. Altre difficoltà derivano dalla incommensurabilità della lunghezza dei cicli medi lunare e solare. La maggior parte dei popoli (ma non tutti, giacché in località del Medio Oriente sono ancora in uso calendari lunari puri e semplici) dovettero correggere i loro calendari sulla base della variazione climatica annuale regolata dal Sole e, a questo scopo, si rese necessario escogitare qualche nuovo sistema per inserire di tanto in tanto un tredicesimo mese nell'anno base di 12 mesi lunari (354 giorni). Questi furono probabilmente i primi problemi tecnici di difficile soluzione cui gli antichi astronomi si trovarono di fronte. Piú di ogni altro problema, essi costituirono la causa delle prime osservazioni e teorie planetarie quantitative. Gli astronomi babilonesi che risolsero infine queste difficoltà fra l'VIII e il III secolo a. C., un arco di tempo per gran parte del quale la scienza in Grecia non uscì dallo stadio primordiale, raccolsero molti di quei dati di fundamenta-

le importanza che in seguito vennero inseriti nello sviluppo della struttura dell'universo a due sfere.

A differenza della Luna e del Sole, gli altri cinque pianeti appaiono come semplici punti di luce nei cieli. Chi li guardi ad occhio nudo, senza essere particolarmente addestrato, può distinguerli con sicurezza dalle stelle soltanto dopo una serie di osservazioni che riveli il loro moto graduale attorno all'eclittica. Di solito i pianeti si muovono verso est attraverso le costellazioni: questo è il loro cosiddetto «moto normale». Mediamente, Mercurio e Venere richiedono un anno di tempo per compiere il circuito completo dello zodiaco; la lunghezza del ciclo di Marte è, in media, 687 giorni; il periodo medio di Giove è 12 anni; quello di Saturno 29 anni. Ma, in ogni caso, il tempo richiesto da ogni singolo ciclo può essere assolutamente diverso dal periodo medio. Anche quando si sposta verso est attraverso le stelle, un pianeta non conserva una velocità uniforme.

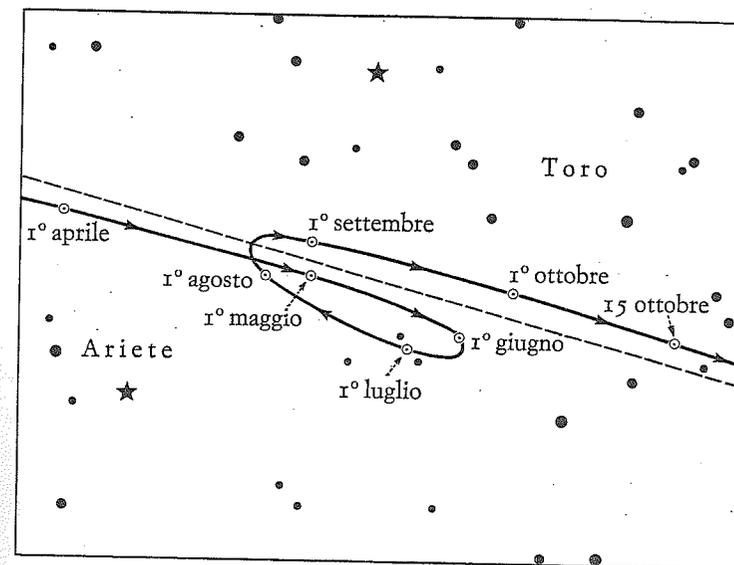
E il suo moto non è sempre diretto costantemente verso est. Il moto normale di tutti i pianeti, ad eccezione del Sole e della Luna, è di tanto in tanto interrotto da brevi tratti di moto diretto ad ovest, detto moto «retrogrado». Confrontiamo la retrocessione di Marte nella costellazione del Toro, disegnata in figura 15, con il moto normale del Sole attraverso il Toro, disegnato in figura 9. Marte inizia con il suo moto normale (in direzione est); ma, proseguendo, il pianeta rallenta finché inverte la direzione e comincia a spostarsi verso ovest, in moto retrogrado. Gli altri pianeti si comportano in modo molto simile, ripetendo ciascuno il tratto di moto retrogrado dopo un ben determinato periodo di tempo. Mercurio inverte, per breve tratto, la direzione del suo moto attraverso le stelle ogni 116 giorni; Venere retrocede ogni 584 giorni. Marte, Giove e Saturno presentano inversioni di direzione rispettivamente ogni 780, 399, 378 giorni.

Nel loro graduale moto verso est, interrotto da retrocessioni periodiche in direzione ovest, le cinque stelle erranti si comportano in modo del tutto simile. Esiste tuttavia una ulteriore caratteristica del loro moto che le sud-

divide in due gruppi: la relazione fra la loro posizione e quella del Sole. Mercurio si trova sempre in un raggio di 28° dal disco in movimento del Sole e la «longazione» massima di Venere è di 45° . Entrambi questi pianeti compiono un lento e continuo movimento di spola, da una parte all'altra del disco in moto del Sole. Per un certo periodo di tempo si muovono in direzione est unitamente al Sole; in seguito, retrocedendo, incrociano il suo disco e infine invertono la loro direzione per raggiungere nuovamente il Sole. Quando si trova ad oriente del Sole, ciascuno di questi pianeti inferiori appare come una «stella della sera», che diventa visibile poco dopo il tra-

Figura 15.

Il moto di retrocessione di Marte nelle costellazioni dell'Ariete e del Toro. La sezione di cielo è la stessa della figura 9 e della casella nella mappa stellare della figura 8. La linea tratteggiata rappresenta l'eclittica e la linea continua il percorso del pianeta. Si noti che Marte non è sull'eclittica e che, sebbene il suo moto generale sia diretto verso est fra le stelle, c'è un periodo fra la metà di giugno e i primi di agosto in cui esso si sposta verso ovest. Le retrocessioni di Marte hanno sempre approssimativamente questa forma e durata, ma non ricorrono sempre alla stessa data o nella stessa sezione di cielo.



monto e tien dietro quindi rapidamente al Sole al di sotto dell'orizzonte. Dopo la sua retrocessione verso ovest attraverso il disco del Sole, il pianeta diventa una « stella del mattino », che sorge poco prima dell'aurora e scompare poi nel suo splendore. Quando invece, fra queste due posizioni, si trovano vicini al Sole, Mercurio e Venere non sono affatto visibili. Pertanto, fino a che il loro movimento non venne studiato in funzione della sfera stellare, né l'uno né l'altro di questi pianeti inferiori fu riconosciuto, nelle due diverse apparizioni sotto l'aspetto di stella del mattino e stella della sera, come lo stesso corpo celeste. Per millenni Venere ebbe una denominazione quando sorgeva ad oriente poco prima dell'alba ed un'altra denominazione quando, dopo settimane, tornava nuovamente ad essere visibile esattamente al di sopra dell'ovest dell'orizzonte, poco dopo il tramonto.

Contrariamente a Mercurio e Venere, i pianeti superiori, e cioè Marte, Giove e Saturno, non restano nella medesima sezione di cielo del Sole. Talvolta essi sono vicinissimi o « in congiunzione » con il Sole; talvolta sono invece distanti un arco di cielo di 180° o « in opposizione » al Sole. Fra questi due estremi, essi assumono tutte le posizioni intermedie. Tuttavia, sebbene le loro posizioni non siano limitate ad una determinata sezione di cielo, il loro comportamento è legato al rapporto col Sole. I pianeti superiori retrocedono soltanto quando sono in opposizione. Ed ancora: quando retrocedono allontanandosi dal Sole attraverso il cielo, essi appaiono più luminosi che mai. Questa maggiore luminosità, che è stata di solito interpretata (a partire almeno dal IV secolo a. C.) come indice di una riduzione della distanza fra il pianeta e la Terra, è particolarmente rilevante nel caso di Marte. Di solito relativamente poco appariscente, il pianeta Marte, in opposizione, diventerà spesso più luminoso, nel cielo notturno, di ogni corpo celeste, ad eccezione della Luna e di Venere.

L'interesse per le cinque stelle erranti non è, per nessun aspetto, antico quanto quello per il Sole e la Luna; presumibilmente perché le stelle erranti non avevano nessuna chiara influenza pratica sulla vita dei popoli an-

tichi. Tuttavia in Mesopotamia, fin dal 1900 a. C., vennero registrate osservazioni dell'apparizione e della scomparsa di Venere, probabilmente come auspici o presagi del futuro, analogamente ai segni misteriosi che si leggevano nei visceri delle pecore sacrificali. Queste sporadiche osservazioni lasciano prevedere lo sviluppo che, molto più tardi, ebbe l'astrologia sistematica: un sistema cioè di previsione del futuro, la cui intima connessione con lo sviluppo dell'astronomia planetaria verrà esaminata nel prossimo capitolo. Il medesimo interesse per i presagi fu la causa evidente delle registrazioni, più sistematiche e complete, di eclissi, moti di retrocessione e di altri notevoli fenomeni planetari, effettuate da osservatori babilonesi a partire dalla metà del secolo VIII a. C. Tolomeo, il più illustre fra gli astronomi dell'antichità, si dolse più tardi che anche queste registrazioni fossero frammentarie. Tuttavia, frammentarie o meno, esse fornirono i primi dati in grado di specificare il problema generale dei pianeti, come sarebbe stato più tardi sviluppato dai greci, dopo il IV secolo a. C.

Il problema dei pianeti è già, in parte, specificato dalla descrizione dei moti planetari abbozzata nelle pagine precedenti. Come si possono ridurre i moti planetari, così variabili e complessi, ad uno schema semplice e ricorrente? Perché i pianeti retrocedono e come giustificare la loro irregolare velocità nello stesso movimento normale? Queste domande indicano la direzione della maggior parte delle ricerche astronomiche nei due millenni che vanno dall'epoca di Platone a quella di Copernico. Essendo tuttavia quasi esclusivamente qualitativa, la descrizione dei pianeti data nelle pagine precedenti non specifica interamente il problema. Pone un problema semplificato e, per alcuni aspetti, sbagliato. Come vedremo fra breve, è facile inventare teorie planetarie plausibili sul piano qualitativo: la descrizione fatta in precedenza potrebbe essere ricondotta a norma in diversi modi. D'altra parte il problema dell'astronomo non è assolutamente semplice. Egli non deve spiegare soltanto l'esistenza di un moto intermittente in direzione ovest che si sovrappone ad un moto principale in direzione est attraverso le stelle, ma anche la posi-

zione precisa che ogni pianeta occupa fra le stelle, in giorni mesi ed anni differenti per un lungo arco di tempo. Il vero problema dei pianeti, quello che conduce infine alla rivoluzione copernicana, è il problema quantitativo, espresso in lunghe tavole che specificano, in gradi e minuti, la posizione mutevole di ogni pianeta.

La posizione dei pianeti.

L'universo a due sfere, come è stato spiegato nell'ultimo capitolo, non dava nessuna informazione esplicita sulla posizione e sul moto dei sette pianeti. Perfino la posizione del Sole non veniva discussa. Per comparire «ne» l'equinozio di primavera (o in qualsiasi altro punto della sfera stellare) è semplicemente necessario che il Sole stia sulla linea ideale che va dall'occhio dell'osservatore al punto corrispondente, oppure che passa attraverso il punto corrispondente sullo sfondo delle stelle. Come gli altri pianeti, il Sole potrebbe trovarsi dentro, sopra, oppure persino al di là della sfera delle stelle. Ma, sebbene l'universo a due sfere non specifichi forma e posizione delle orbite planetarie, esso rende, in effetti, determinate scelte di posizione e orbita più plausibili che non altre, e conseguentemente guida e limita, nello stesso tempo, il modo di accostarsi dell'astronomo al problema dei pianeti. Tale problema venne posto dai risultati di certe osservazioni, ma fu inizialmente affrontato nello spirito dello schema concettuale della cosmologia a due sfere. Sia l'osservazione che la teoria portarono ad esso contributi fondamentali.

In una cosmologia a due sfere, ad esempio, le orbite planetarie dovrebbero possibilmente conservare ed estendere la simmetria fondamentale delle due sfere primarie. Idealmente le orbite dovrebbero pertanto risultare dei cerchi aventi la Terra come centro ed i pianeti muoversi in questi cerchi con la regolarità che è esemplificata nella rotazione della sfera stellare. L'ideale non è affatto conforme all'osservazione. Come ora vedremo, un'orbita circolare avente la Terra come centro e posta sul pia-

no dell'eclittica dà una buona spiegazione del moto annuale del Sole; mentre un'orbita dello stesso genere fornisce una spiegazione approssimata del moto alquanto meno regolare della Luna. Ma, con orbite circolari, non si può neppure impostare una qualche spiegazione delle macroscopiche irregolarità, come la retrocessione, osservate nel moto delle altre cinque «stelle» erranti. Ciononostante, astronomi che credevano nell'universo a due sfere poterono pensare, e lo fecero per secoli, che cerchi aventi la Terra come centro fossero le orbite naturali dei pianeti. Tali orbite almeno spiegavano i moti medi generali diretti verso est. L'osservazione di qualche deviazione da questo vuoto medio — cambi di velocità o di direzione del moto di un pianeta — significava che il pianeta stesso aveva deviato dalla sua orbita naturale, cui sarebbe di nuovo ritornato. In questo tipo di ricerca, il problema dei pianeti diventò semplicemente quello di spiegare l'eventuale osservazione di qualche deviazione dal moto medio attraverso le stelle con una deviazione corrispondente di ciascun pianeta dalla sua particolare orbita circolare.

Esamineremo alcune delle antiche spiegazioni di queste deviazioni nei prossimi tre paragrafi, ma è opportuno renderci conto in primo luogo, come fecero del resto anche gli antichi, quanto lontano sia possibile andare, pur trascurando le irregolarità planetarie ed assumendo semplicemente che tutte le orbite siano circolari, almeno in prima approssimazione. Quasi certamente, nell'universo a due sfere, i pianeti si muovono nella regione compresa fra la Terra e le stelle. La sfera stellare stessa venne spesso considerata come il confine esterno dell'universo, cosicché i pianeti non avrebbero potuto trovarsi al di là di essa. La differenza esistente fra moti planetari e stellari significava che i pianeti non erano probabilmente posti sulla sfera, ma in qualche regione intermedia dove subivano qualche influsso che non aveva invece effetto sulla sfera stellare. L'argomentazione nel suo complesso prese forza dai particolari osservabili sulla faccia della Luna, prova presunta che un pianeta, almeno, deve essere più vicino delle stelle. Pertanto gli antichi astronomi posero

le orbite planetarie in quel vasto spazio, precedentemente vuoto, esistente fra la terra e la sfera delle stelle. Verso la fine del IV secolo a. C., l'universo a due sfere si stava completando. Più tardi si sarebbe affollato.

Una volta note la posizione generale e la forma delle orbite dei pianeti, si rivelò possibile fare una supposizione plausibile e soddisfacente sull'ordine in cui essi erano sistemati. Pianeti come Saturno e Giove, il cui moto verso est era lento ed il cui moto complessivo, pertanto, procedeva con grande approssimazione a pari passo con le stelle, si suppose che fossero presso la sfera stellare e lontano dalla Terra. La Luna, d'altra parte, che perde più di 12° al giorno nella sua corsa con le stelle, è necessariamente più vicina alla superficie ferma della Terra. Alcuni filosofi antichi giustificarono apparentemente questa sistemazione ipotetica, immaginando che i pianeti fluttuassero in un gigantesco vortice etereo, la cui superficie esterna si spostava rapidamente con la sfera delle stelle, mentre quella interna rimaneva ferma a contatto con la superficie della Terra. Ogni pianeta, preso in tale vortice, perde più terreno nei confronti della sfera stellare se si trova più vicino alla Terra. Altri filosofi pervennero alla stessa conclusione con un altro tipo di argomentazione, ripresa più tardi, almeno nella sua essenza, dall'architetto romano Vitruvio (I secolo a. C.). Analizzando le differenze fra i periodi impiegati dai diversi pianeti nei loro spostamenti attorno all'eclittica, Vitruvio propose un'illuminante analogia:

Così, se sulla ruota di cui usano i vasai prendessero posto sette formiche, e nella ruota, intorno al perno che la regge, si facessero altrettanti canali crescenti verso l'esterno, nei quali esse sien costrette a girare, e la ruota si volga indietro; necessariamente le formiche, contro il giro della ruota, faranno un cammino inverso; e quella che sarà più vicina al centro andrà più presto, mentre quella che correrà al limite estremo della ruota, per quanto vada lesta, compirà il giro molto più tardi, a causa della grandezza del circuito. Similmente gli astri. Per uno sforzo contro il corso del mondo nei loro viaggi essi compiono il circuito; ma, per la rota-

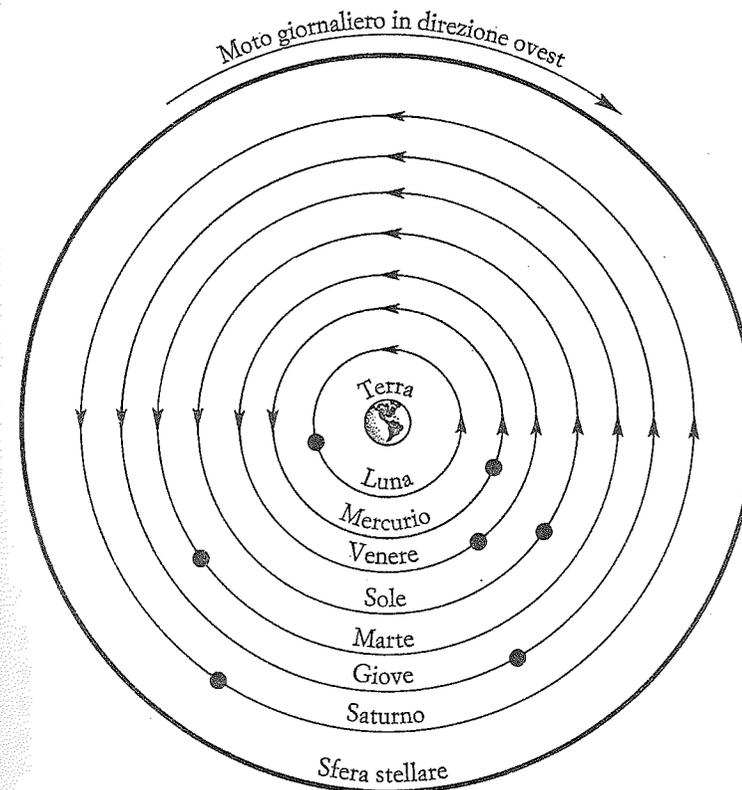
zione del cielo son riportati indietro dalla quotidiana rivoluzione del tempo¹.

Prima della fine del IV secolo a. C., argomentazioni di questo genere avevano dato all'universo un'immagine simile a quella schematizzata in figura 16. Disegni come questo, o le relative descrizioni verbali, furono comunemente adottati nei trattati elementari di astronomia e co-

¹ [POLLIO MARCO VITRUVIO, *Dell'Architettura*, versione di Ugo Fleres, Istituto Editoriale Italiano, Roma 1933, libro IX].

Figura 16.

Le orbite planetarie approssimative nell'Universo a due sfere. Il circolo più esterno è una sezione trasversale della sfera stellare sul piano dell'eclittica.



smologia fino ai primi anni del secolo XVII, molto tempo dopo la morte di Copernico. La Terra è al centro della sfera stellare che limita l'universo; immediatamente all'interno di questa sfera esteriore c'è l'orbita di Saturno, il pianeta che impiega più tempo nel suo movimento attorno allo zodiaco; poi viene Giove e quindi Marte. A questo punto l'ordine dello schema non è più ambiguo: i pianeti sono sistemati, a partire dall'esterno, secondo il loro periodo orbitale decrescente; per lo stesso principio, l'orbita lunare è la più vicina alla Terra. Ma i rimanenti tre pianeti fanno sorgere un problema: il Sole, Venere e Mercurio completano tutti il loro giro attorno alla Terra nel medesimo tempo medio, un anno, e pertanto la loro posizione non può essere determinata con il criterio adottato per gli altri pianeti. In realtà, sull'ordine da assegnare a questi pianeti, ci fu molto disaccordo nell'antichità. La sistemazione illustrata dal disegno — Sole all'esterno, poi Venere e quindi Mercurio — non fu affatto adottata all'unanimità. Tuttavia, per ragioni che rimangono oscure, costituì la sistemazione più popolare e venne adottata da Tolomeo, che, con la sua autorità, la impose a quasi tutti i suoi successori. Noi ci conformeremo pertanto, nei primi capitoli del libro, a questa disposizione tipo.

Come disegno strutturale, la figura 16 è ancora qualcosa di molto primitivo. Non dà nessuna spiegazione significativa delle dimensioni relative delle diverse orbite e non cerca affatto di spiegare le irregolarità osservate nei pianeti. Ma la concezione dell'universo cui il disegno si ispira ebbe due funzioni importanti nel successivo sviluppo dell'astronomia e della cosmologia. In primo luogo, il disegno contiene il maggior numero di informazioni strutturali sull'universo a Terra centrale diventate patrimonio comune della cultura dei non astronomi. Le conquiste ulteriori dell'astronomia antica, di cui ci occuperemo tra breve, contenevano troppe elaborazioni matematiche per essere accessibili ai profani. Come i due capitoli successivi illustrano più esaurientemente, le cosmologie più importanti sviluppate nell'antichità e nel Medioevo non seguirono l'astronomia antica molto al di là di questo punto. L'astronomia diventa ora esoterica; il suo ulterio-

re sviluppo non procura all'uomo una dimora familiare.

Inoltre il disegno strutturale della figura 16, per quanto primitivo, costituisce uno strumento di grandissima potenzialità per la ricerca astronomica. Per molti scopi esso si rivelò tanto economico quanto fruttifero. Durante il IV secolo a. C., ad esempio, i concetti cui il disegno si ispira fornirono una spiegazione completa, sul piano qualitativo, sia delle fasi della Luna che delle eclissi lunari. Durante il IV e III secolo questi stessi concetti condussero ad una serie di determinazioni relativamente precise della circonferenza della Terra; e durante il II secolo a. C. costituirono la base di una valutazione, concepita intelligentemente, delle dimensioni e delle distanze del Sole e della Luna. Queste spiegazioni e misurazioni, e particolarmente l'ultima, mettono in rilievo l'immensa ingegnosità e potenzialità dell'antica tradizione astronomica. Esse tuttavia, nel libro, sono relegate nell'Appendice tecnica (terza e quarta parte), in quanto non furono toccate dalla trasformazione della dottrina astronomica durante la rivoluzione copernicana. Ciononostante esse sono importanti per la rivoluzione. La capacità dell'universo a due sfere, una volta sviluppato, di spiegare e infine di prevedere grandi fenomeni celesti quali le eclissi, come pure la sua capacità di determinare alcune dimensioni lineari degli spazi celesti, fecero aumentare enormemente l'influenza dello schema concettuale sulla mente sia degli astronomi che dei profani.

Queste conquiste tuttavia non toccano il problema fondamentale posto dalla sistematica irregolarità del moto planetario, ed è questo problema che fornisce il perno su cui alla fine ruota la rivoluzione copernicana. Come tanti altri problemi dell'astronomia antica, sembra che esso sia stato posto per la prima volta durante il IV secolo a. C., allorché l'universo a due sfere, con la spiegazione del moto giornaliero, mise in grado gli astronomi greci di isolare per la prima volta le residue irregolarità planetarie. Durante i cinque secoli che seguirono, una serie di tentativi per spiegare queste irregolarità diede origine a parecchie teorie planetarie di un'accuratezza e potenzialità senza precedenti. Questi tentativi però costitui-

scono anche la parte piú astrusa e piú matematicamente elaborata dell'astronomia antica e vengono quindi solitamente trascurati da libri come il presente. Sebbene un compendio semplificato dell'antica dottrina dei pianeti sia apparentemente il requisito minimo indispensabile per capire la rivoluzione copernicana, può darsi che qualche lettore preferisca scorrere solo superficialmente i prossimi tre paragrafi (soprattutto il primo, in cui l'aspetto tecnico è particolarmente marcato), per riprendere la lettura con la discussione sulle credenze scientifiche che chiude il presente capitolo.

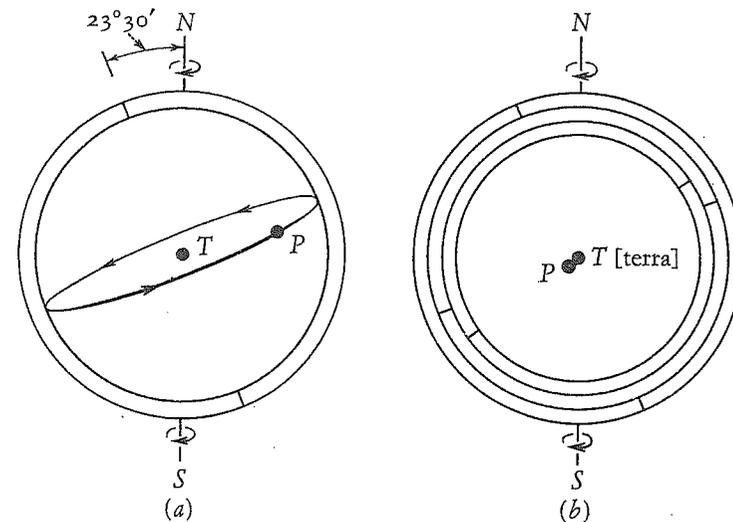
La teoria delle sfere omocentriche.

Il filosofo Platone, i cui interrogativi di ricerca dominarono tanta parte del pensiero greco successivo, sembra sia stato il primo a formulare anche il problema dei pianeti. Si narra che, all'inizio del secolo IV a. C., Platone si sia chiesto: « Quali sono i movimenti uniformi e ordinati che si devono assumere per giustificare il moto apparente dei pianeti? » e la prima risposta a questo interrogativo venne data da Eudosso, che era stato suo allievo (408-355 a. C. circa). Nel sistema planetario di Eudosso ciascun pianeta era posto sopra la sfera interna di un gruppo di due o piú sfere concentriche, fra loro collegate, la cui simultanea rotazione attorno ad assi differenti produceva il moto osservato dei pianeti. La figura 17a mostra una sezione trasversale di due sfere, fissate in questo modo tra loro, il cui centro comune è la Terra ed i cui punti di contatto sono le estremità dell'asse obliquo della sfera interna, che funge da perno. La sfera esterna è la sfera delle stelle, o almeno ha lo stesso moto di quella sfera. Il suo asse passa per il polo nord celeste e per quello sud compie una rotazione in direzione ovest attorno a questo asse ogni 23 ore e 56 minuti. L'asse della sfera interna tocca la sfera esterna in due punti diametralmente opposti, spostati di 23° e mezzo dai poli nord e sud celesti; pertanto l'equatore della sfera interna, visto dalla Terra, cade sempre sull'eclittica della sfera delle stelle, indipen-

dentemente dalla rotazione delle due sfere. Ora se il Sole è posto in un punto sull'equatore della sfera interna e questa sfera vien fatta ruotare lentamente verso est attorno al suo asse, una volta all'anno, mentre la sfera esterna compie una rotazione al giorno attorno al suo asse, la risultante dei due moti riprodurrà il moto osservato del Sole. La sfera esterna produce il moto giornaliero verso ovest che osserviamo dall'alba al tramonto; la sfera interna produce il moto annuale piú lento, in direzione est, lungo l'eclittica. Analogamente, se la sfera interna compie una rotazione in direzione est ogni 27 giorni e un terzo, e se la Luna è posta sull'equatore di questa sfera, allora il moto di questa sfera interna genera lo spostamento medio della Luna attorno all'eclittica. Le deviazioni della Luna a nord e sud dell'eclittica ed alcune irregolarità relative al tempo che la Luna impiega per effettuare rivolu-

Figura 17.

Sfere omocentriche. Nel sistema a due sfere (a), la sfera esterna produce la rotazione giornaliera e la sfera interna muove il pianeta (Sole o Luna) con velocità regolare verso est attorno all'eclittica. Nel sistema a quattro sfere (b), il pianeta P giace fuori del piano del disegno, all'incirca su di una linea che va dalla Terra T all'occhio del lettore. Le due sfere piú interne generano il moto a forma di nodo illustrato in figura 18, mentre le due sfere piú esterne producono e il moto giornaliero e lo scorrimento medio del pianeta in direzione est.



zioni successive possono essere approssimativamente riprodotte con l'aggiunta al sistema di un'altra sfera che si muova assai lentamente. Eudosso usò pure (sebbene non ve ne fosse la necessità) una terza sfera per descrivere il moto del Sole: cosicché eran necessarie sei sfere per riprodurre contemporaneamente il moto della Luna e del Sole.

Le sfere illustrate nella figura 17a eran note come sfere omocentriche, poiché hanno un centro comune: la Terra. Due o tre di queste sfere possono, con buona approssimazione, riprodurre il moto generale del Sole e della Luna; ma non sono in grado di spiegare i moti di retrocessione dei pianeti e il grandissimo ingegno di Eudosso, nel campo della geometria, si rivelò nelle modifiche che egli introdusse nel sistema trattando il comportamento apparente dei rimanenti cinque pianeti. Per ciascuno di questi, egli adottò un complesso di quattro sfere, rappresentate in sezione trasversale nella figura 17b. Le due sfere esterne si muovono esattamente come le sfere della figura 17a: la sfera più esterna ha il moto giornaliero della sfera delle stelle e la seconda sfera (a partire dall'esterno) compie una rotazione in direzione est nel tempo medio che il pianeta impiega per uno spostamento attorno all'eclittica. (La seconda sfera di Giove, ad esempio, compie una rotazione in 12 anni). La terza sfera è in contatto con la seconda in due punti diametralmente opposti sull'eclittica (l'equatore della seconda sfera), e l'asse della quarta sfera, ossia della più interna, è fissato alla terza sfera con un'inclinazione angolare che è funzione delle caratteristiche del moto che dev'essere descritto. Il pianeta stesso (Giove, nell'esempio citato) è posto sull'equatore della quarta sfera.

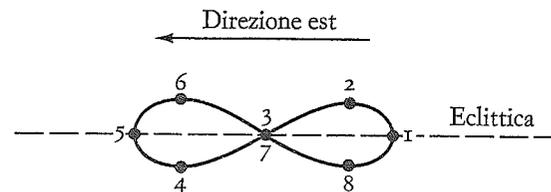
Supponiamo ora che le due sfere esterne siano tenute ferme e che le due sfere interne ruotino in direzioni opposte, completando ciascuna una rotazione attorno al proprio asse nell'intervallo di tempo che separa due successive retrocessioni del pianeta (399 giorni nel caso di Giove). Un osservatore che osservi il movimento del pianeta sul fondo della seconda sfera, tenuta temporaneamente ferma, lo vedrà muoversi lentamente disegnando

un otto i cui occhielli sono bisecati dall'eclittica. Questo moto è schematizzato in figura 18; il pianeta passa lungo gli occhielli dalla posizione 1 alla 2, dalla 2 alla 3, dalla 3 alla 4, . . . , impiegando lo stesso tempo fra ciascun punto numerato e il successivo e tornando al punto di partenza dopo l'intervallo fra le retrocessioni. Durante lo spostamento da 1 a 3 a 5, il pianeta si muove in direzione est attorno all'eclittica; durante l'altra metà di tempo, mentre si sposta da 5 a 7 e poi di nuovo all'1, il pianeta si muove in direzione ovest.

Ammettiamo ora che la seconda sfera ruoti in direzione est e trascini nel suo moto le due sfere interne ruotanti, e supponiamo che il moto generale del pianeta venga osservato sul fondale di stelle della prima sfera, tenuta ancora temporaneamente ferma. Per tutto il periodo il pianeta è portato a ruotare verso est dal moto della seconda sfera; per metà del periodo (mentre si sposta dal punto 1 al punto 5 della figura 18), il pianeta riceve una spinta motrice addizionale in direzione est dalle due sfere interne, cosicché il moto risultante è diretto ad est e persino più veloce di quello della seconda sfera. Ma durante l'altra metà del periodo (mentre il pianeta si sposta dal

Figura 18.

Il moto a forma di nodo generato dalle due sfere omocentriche più interne. Nel sistema completo a quattro sfere, questo tipo di moto nodale si compie con il moto regolare in direzione est della seconda sfera: moto che, di per se stesso, porterebbe il pianeta lungo l'eclittica a velocità uniforme. Quando si viene ad aggiungere il moto nodale, il moto generale del pianeta ha una velocità variabile e non è più legato all'eclittica. Mentre il pianeta si sposta sul nodo dal punto 1 al 5, il suo moto generale è più veloce del moto medio in direzione est generato dalla seconda sfera. Mentre il pianeta si sposta dal 5 all'1 sul nodo, il suo moto in direzione est diventa più lento di quello generato dalla seconda sfera, e, quando si trova vicino al punto 3, può in effetti spostarsi verso ovest, in retrocessione.



punto 5 al punto 1 della figura 18), il moto in direzione est della seconda sfera è contrastato da un moto diretto ad ovest dovuto alle due sfere interne e, allorché il moto diretto ad ovest è alla sua velocità massima (vicino al punto 7 in figura 18), il moto risultante del pianeta visto contro la sfera delle stelle può in effetti esser diretto verso ovest, nella direzione di retrocessione. Questa è esattamente la caratteristica dei moti planetari osservati che Eudosso cercava di riprodurre nel suo modello.

Un sistema di quattro sfere omocentriche, fra loro collegate, può riprodurre approssimativamente il moto di retrocessione di Giove ed una seconda serie di quattro sfere può spiegare il moto di Saturno. Per ciascuno degli altri tre pianeti, si rendono necessarie cinque sfere (questo sviluppo ulteriore venne realizzato dal successore di Eudosso, Callippo, attorno al 330 a. C.) e l'analisi dei moti risultanti diventa, conseguentemente, più complessa. Per fortuna, non abbiamo bisogno di andare avanti nell'esame di queste complesse combinazioni di sfere rotanti, in quanto tutti i sistemi omocentrici presentano un grave inconveniente che condusse presto, nell'antichità, al loro abbandono. Poiché la teoria di Eudosso pone ciascun pianeta su di una sfera concentrica alla Terra, la distanza fra un pianeta e la Terra non può variare. Ma i pianeti appaiono più luminosi e sembrano quindi più vicini alla Terra quando retrocedono. Nell'antichità, il sistema omocentrico venne spesso criticato per la sua incapacità di spiegare questa variazione di luminosità dei pianeti e fu abbandonato dalla maggior parte degli astronomi quasi subito dopo che fu proposta una spiegazione più convincente di ciò che si poteva osservare nei cieli.

Tuttavia, malgrado abbiano avuto vita breve come effettivo strumento astronomico, le sfere omocentriche hanno un ruolo di primo piano nello sviluppo del pensiero astronomico e cosmologico. Per un caso storico, il secolo durante il quale parve che esse fornissero la spiegazione più interessante del moto planetario comprese gran parte della vita del filosofo greco Aristotele, il quale le incorporò nella più vasta, particolareggiata e autorevole teoria cosmologica che sia stata sviluppata nell'antichità.

Nessun'altra teoria cosmologica completa come quella aristotelica incorporò mai il sistema matematico di epicicli e deferenti che, nei secoli successivi alla morte di Aristotele, fu adottato per spiegare il moto planetario. Il concetto che i pianeti siano posti in involucri sferici ruotanti, concentrici alla Terra, rimase fino all'inizio del secolo XVII una parte accettata del pensiero cosmologico. Perfino gli scritti di Copernico rivelano tracce importanti di questo concetto. Nel titolo della grande opera di Copernico, *De Revolutionibus Orbium Caelestium*, le orbis o sfere non rappresentano i pianeti stessi, ma piuttosto gli involucri sferici concentrici in cui son posti i pianeti e le stelle.

Epicicli e deferenti.

L'origine della struttura che sostituì le sfere omocentriche nella spiegazione dei particolari del moto planetario è sconosciuta; ma le sue caratteristiche furono studiate e sviluppate, per la prima volta, da due astronomi e matematici greci: Apollonio e Ipparco, la cui opera abbraccia il periodo che va dalla metà del III secolo alla fine del II secolo a. C. Nella sua forma più semplice (fig. 19a), la nuova meccanica dei pianeti, fondata su principi matematici, consiste in un piccolo cerchio, l'epiciclo, che ruota con velocità uniforme attorno ad un punto della circonferenza di un secondo cerchio rotante, il deferente. Il pianeta *P* è posto sull'epiciclo e il centro del deferente coincide con il centro della Terra.

Il sistema epiciclo-deferente è destinato a spiegare soltanto il moto relativamente alla sfera delle stelle. Sia l'epiciclo che il deferente della figura 19a sono disegnati sul piano dell'eclittica, cosicché la rotazione della sfera stellare fa effettuare all'intero diagramma (fatta eccezione per la Terra che è al centro) una rotazione al giorno e genera così il moto giornaliero del pianeta. Se l'epiciclo e il deferente della figura fossero stazionari e non avessero un ulteriore moto proprio, il pianeta resterebbe fisso sul piano dell'eclittica e avrebbe pertanto il moto di una

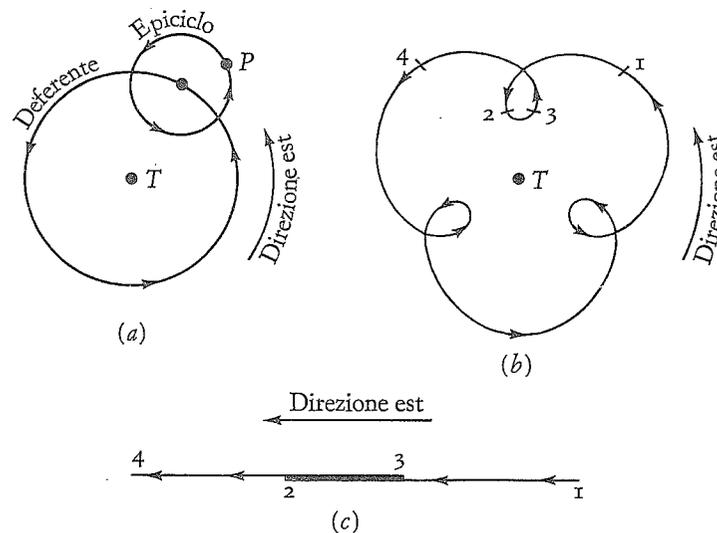
stella dello zodiaco: una rotazione circolare in direzione ovest ogni 23 ore e 56 minuti. D'ora in poi, ogniqualvolta faremo riferimento al moto del deferente o dell'epiciclo, intenderemo il moto *addizionale* di questi cerchi nel piano dell'eclittica. La rotazione giornaliera della sfera e del piano dell'eclittica saranno date per acquisite.

Supponiamo, ad esempio, che il deferente compia una rotazione all'anno e che il Sole sia posto sul deferente, nel punto occupato dal centro dell'epiciclo, mentre l'epiciclo viene rimosso. Allora la rotazione del deferente trasporta il Sole nel suo viaggio annuale lungo l'eclittica, e il moto del Sole è stato analizzato, almeno approssimativamente, in funzione del moto di un singolo deferente nel piano dell'eclittica. Questa è la tecnica su cui si è basata la spiegazione del moto medio dei pianeti in figura 16.

Immaginiamo ora che il Sole sia rimosso e l'epiciclo

Figura 19.

Schema del sistema epiciclo-deferente. Un deferente ed un epiciclo tipici sono disegnati in (a); il moto intrecciato che essi generano nel piano dell'eclittica è illustrato in (b); il terzo disegno (c) mostra una parte (1-2-3-4) del moto di (b), com'è visto da un osservatore sulla Terra centrale *T*.



ricollocato al suo posto sul deferente. Se l'epiciclo compie esattamente tre rotazioni attorno al suo centro mobile mentre il deferente ne compie una e se i due cerchi ruotano nel medesimo senso, allora il moto generale del pianeta entro la sfera delle stelle, prodotto dalla composizione dei moti dell'epiciclo e del deferente, è esattamente la curva intrecciata disegnata in figura 19b. Quando la rotazione dell'epiciclo trasporta il pianeta fuori del deferente, i moti e dell'epiciclo e del deferente concordano nello spostare il pianeta in direzione est. Ma quando il moto dell'epiciclo porta il pianeta opportunamente all'interno del deferente, l'epiciclo sposta il pianeta in direzione ovest, in opposizione al moto del deferente. Pertanto, quando il pianeta si trova nella sua posizione più vicina alla Terra, i due moti possono comporsi per generare un moto risultante diretto verso ovest o di retrocessione. In figura 19b, il pianeta retrocede ogniqualvolta viene a trovarsi sulla parte interna di uno dei piccoli occhielli: in qualsiasi altro punto si sposta normalmente in direzione est, ma con velocità variabile.

La figura 19c illustra il moto del pianeta in uno degli occhielli, com'è visto da un osservatore sulla Terra sul fondo della sfera delle stelle. Poiché osservatore e occhio si trovano sullo stesso piano, che è quello dell'eclittica, l'osservatore non può vedere l'occhiello aperto. Quello che vede è semplicemente la posizione del pianeta sul fondo costituito dall'eclittica. Così, quando il pianeta si sposta dalla posizione 1 alla 2 nelle figure 19b e 19c, l'osservatore lo vede muoversi lungo l'eclittica in direzione est. Quando il pianeta si avvicina alla posizione 2, lo si vede muoversi più lentamente, fermarsi per un istante in 2 e quindi muoversi in direzione ovest lungo l'eclittica quando si sposta da 2 verso 3. Finalmente, il movimento in direzione ovest del pianeta sull'eclittica si ferma, il pianeta torna a muoversi nuovamente in direzione est e lascia la posizione 3 sull'occhiello per dirigersi verso la posizione 4.

Un sistema costituito da un epiciclo e da un deferente muove pertanto un pianeta attorno all'eclittica, in un intervallo di tempo che, in media, eguaglia esattamente il

periodo richiesto da una rivoluzione del deferente. Il moto in direzione est viene tuttavia interrotto e il pianeta per un certo tempo si sposta verso ovest, ad intervalli regolari corrispondenti al periodo richiesto da una rivoluzione dell'epiciclo. Le velocità del moto di rivoluzione dell'epiciclo e del deferente possono essere opportunamente variate, in modo da adeguarle alle osservazioni fatte per ciascun pianeta: affinché riproducano esattamente quel moto intermittente in direzione est fra le stelle che si osserva nei pianeti. Inoltre, il sistema epiciclo-deferente riproduce un'altra importante caratteristica qualitativa dei fenomeni osservati: un pianeta può retrocedere soltanto quando il suo moto lo porta a distanza minima dalla Terra e questa è la posizione in cui il pianeta dovrebbe apparire e appare in effetti più luminoso. La sua grande semplicità e, in più, questa nuova spiegazione della variazione di luminosità dei pianeti sono le cause fondamentali della vittoria del nuovo sistema sul vecchio sistema delle sfere omocentriche.

Il sistema epiciclo-deferente descritto in figura 19 presenta una semplificazione particolare che non è caratteristica del moto di nessun pianeta. L'epiciclo vien fatto ruotare *esattamente* tre volte per ogni rivoluzione del deferente. Pertanto, ogniqualvolta il deferente completa un moto di rivoluzione, l'epiciclo riporta il pianeta nella stessa posizione occupata all'inizio della rivoluzione; i nodi di retrocessione si riformano sempre negli stessi punti; e il pianeta ha bisogno sempre del medesimo periodo di tempo per completare il suo spostamento attorno all'eclittica. Tuttavia, quando si voglia adeguarli alle osservazioni dei pianeti nella realtà, i sistemi epiciclo-deferente non si comportano mai proprio così. Si è osservato, ad esempio, che Mercurio ha bisogno mediamente di un anno di tempo per completare il suo spostamento attorno all'eclittica e retrocede ogni 116 giorni. Pertanto l'epiciclo di Mercurio deve compiere più di tre giri mentre il deferente ne compie uno; l'epiciclo completa tre rivoluzioni in 348 giorni e cioè in meno dell'anno di tempo di cui ha bisogno il deferente per una rotazione.

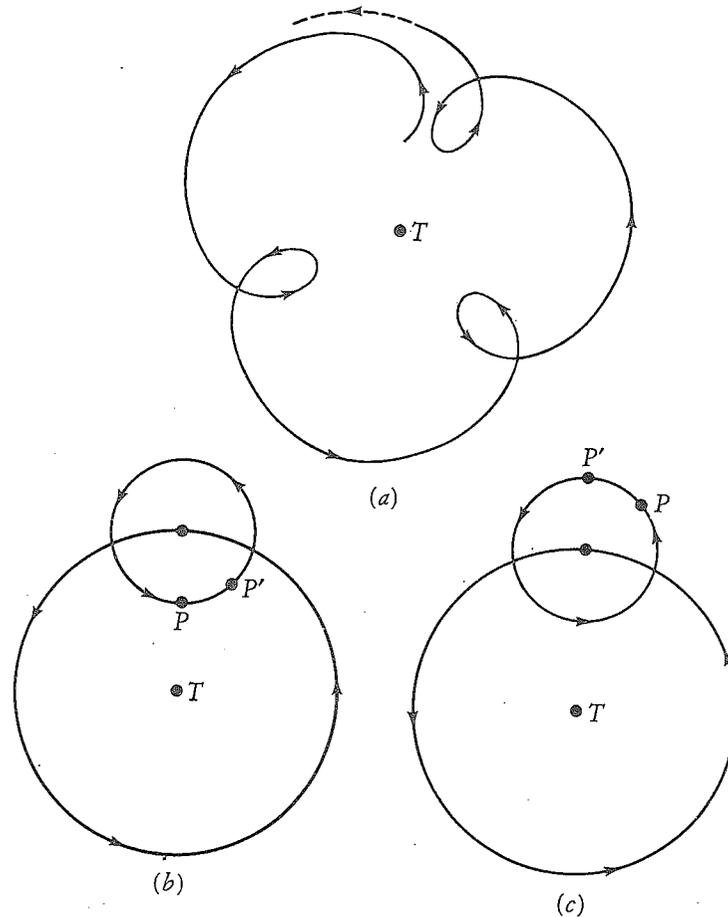
La figura 20a illustra il percorso di un pianeta guidato

in un viaggio attorno all'eclittica da un epiciclo, il quale compie più di tre giri per ogni rotazione del suo deferente. Il pianeta parte dalla metà di un nodo di retrocessione e completa il suo terzo nodo prima che il deferente finisca la sua prima rotazione; quindi, in ogni viaggio attorno all'eclittica, percorre mediamente poco più di tre nodi di retrocessione. Se il moto della figura 20a continuasse per un secondo viaggio, la nuova posizione dei nodi di retrocessione risulterebbe spostata di poco verso ovest nei confronti dei nodi del primo viaggio. Il moto di retrocessione non si verificherebbe, in viaggi successivi, nello stesso punto dello zodiaco: e questa è una caratteristica osservata dal moto dei pianeti lungo l'eclittica.

La figura 20b illustra una seconda caratteristica del moto generato da un epiciclo il quale non compia un numero intero di rotazioni per ogni rivoluzione del deferente. Il pianeta nella posizione P della figura si trova nel punto più vicino alla Terra: punto da cui cominciava il viaggio della figura 20a. Dopo una rivoluzione del deferente, l'epiciclo avrà compiuto poco più di tre giri ed il pianeta sarà arrivato nella posizione P' ; cosicché apparirà ora ad ovest del suo punto di partenza. Il deferente deve effettuare in direzione est più di una singola rivoluzione per far compiere al pianeta un giro completo attorno all'eclittica; lo spostamento corrispondente attraverso le costellazioni richiede quindi più del periodo medio. Altri invece ne richiedono meno. Dopo parecchie altre rivoluzioni del deferente, ciascuna delle quali termina con il pianeta sempre più lontano dalla terra, il pianeta potrebbe iniziare un altro viaggio dalla nuova posizione P della figura 20c. La successiva rivoluzione del deferente porterebbe allora il pianeta in P' , punto che si trova ad est di P . Poiché questa rivoluzione del deferente fa compiere al pianeta più di un giro attorno all'eclittica, questo viaggio risulta particolarmente veloce. Le figure 20b e 20c rappresentano con grande approssimazione i valori estremi del periodo necessario per uno spostamento attorno all'eclittica. Percorsi intermedi richiedono periodi intermedi. Mediamente, un percorso completo attorno all'eclittica richiede lo stesso tempo di una rotazio-

Figura 20.

Moto generato da un epiciclo e da un deferente quando l'epiciclo compie poco più di tre giri per ogni rivoluzione del deferente. Il percorso del pianeta durante un singolo percorso completo attraverso le stelle viene illustrato in (a). Questo percorso richiede più di una rivoluzione del deferente, come indica (b) che illustra la posizione del pianeta all'inizio (P) e alla fine (P') della prima rivoluzione completa del deferente. Il disegno (c) mostra la posizione del pianeta all'inizio e alla fine di un'altra successiva rivoluzione del deferente: rivoluzione che fa compiere al pianeta più di un viaggio completo attorno all'eclittica.



ne del deferente. Ma il sistema epiciclo-deferente è in grado di tener conto delle variazioni da un percorso all'altro. Esso fornisce quindi un'altra spiegazione economica di un'irregolarità osservata nel moto dei pianeti.

Per descrivere il moto di tutti i pianeti, è necessario fissare un sistema epiciclo-deferente diverso per ognuno di essi. Il moto del Sole e della Luna può essere approssimativamente riprodotto da un solo deferente, giacché questi pianeti non hanno moti di retrocessione. Il deferente del Sole compie un giro ogni anno; quello della Luna ogni 27 giorni e un terzo. Il sistema epiciclo-deferente per Mercurio è molto simile a quello illustrato in precedenza: il deferente compie un giro all'anno e l'epiciclo ogni 116 giorni. Utilizzando le osservazioni riportate nella prima parte di questo capitolo, potremmo progettare sistemi simili anche per altri pianeti. A gran parte di essi corrisponderebbero percorsi planetari intrecciati come quello in figura 20a. Se l'epiciclo è grande relativamente al deferente, aumenta la dimensione dei nodi. Se l'epiciclo ruota più rapidamente rispetto alla velocità del deferente, allora si forma un maggior numero di nodi per ogni percorso attorno all'eclittica. Vi sono approssimativamente undici nodi in ogni percorso di Giove e circa 28 in ogni percorso di Saturno. In breve: con opportune variazioni delle dimensioni e delle velocità relative dell'epiciclo e del deferente, questo sistema di moti circolari composti può essere adattato in modo da riprodurre approssimativamente le condizioni di un'immensa varietà di moti planetari. Una combinazione di cerchi, opportunamente progettata, potrà render conto qualitativamente in maniera accettabile delle enormi irregolarità del moto di un pianeta atipico come Venere (fig. 21).

L'astronomia tolemaica.

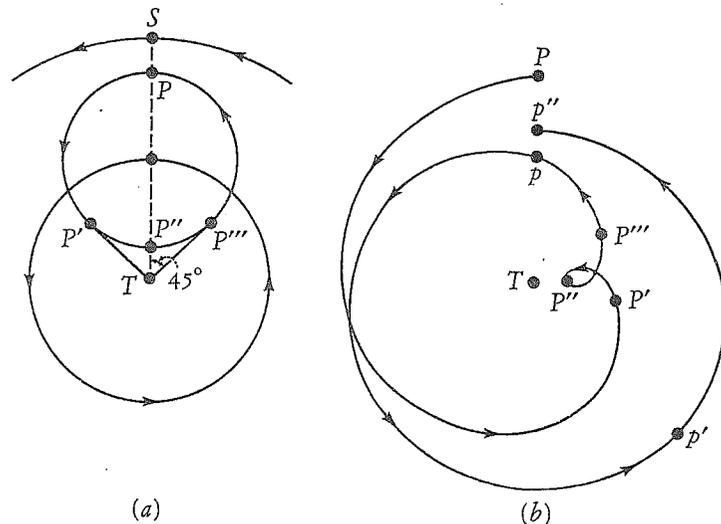
La discussione del paragrafo precedente illustra la potenzialità e la versatilità del sistema epiciclo-deferente, adottato come mezzo per ordinare e prevedere il moto dei pianeti. Ma questo è soltanto il primo passo. Una

Figura 21.

Un sistema di un epiciclo e di un deferente per Venere (*a*) e il moto che esso genera nel piano dell'eclittica (*b*).

In (*a*) si notino le seguenti caratteristiche del disegno: il deferente compie una rotazione all'anno, cosicché se il centro dell'epiciclo si trova ad un certo istante allineato con la Terra *T* e col centro del Sole *S* rimarrà per sempre su questo allineamento e Venere non apparirà mai molto distante dal Sole. Gli angoli *STP'* e *STP''* sono le angolazioni massime che si possono avere fra Sole e Venere e la condizione che queste angolazioni massime siano di 45° determina completamente le misure relative dell'epiciclo e del deferente. L'epiciclo compie una rotazione in 584 giorni; cosicché se Venere parte da *P*, vicino al Sole, arriverà in *P'* (massima distanza angolare come stella vespertina) dopo 219 giorni ($3/8$ di rivoluzione); in *P''* dopo 292 giorni ($1/2$ rivoluzione); e in *P'''* (massima distanza angolare come stella mattutina) dopo 365 giorni ($5/8$ di rivoluzione).

Il secondo diagramma illustra il percorso lungo il quale Venere è guidato dai cerchi rappresentati in (*a*). Qui *P* è il punto di partenza, come nell'altro diagramma; *P'* rappresenta la posizione di Venere quando la sua distanza angolare dal Sole verso oriente è massima (219 giorni); *P''* è la posizione del pianeta a metà percorso in un nodo di retrocessione (292 giorni); e *P'''* è la sua posizione quando la distanza angolare verso occidente è massima (365 giorni). Il primo viaggio di Venere sull'eclittica finisce in *p* dopo 406 giorni (si noti la lunghezza del periodo) e comprende una retrocessione e due punti di massima angolazione. Il viaggio successivo (da *p* a *p'* a *p''*) richiede solo 295 giorni e non comprende nessuno di questi caratteristici fenomeni. In *p'* Venere si trova di nuovo alla distanza minima dal Sole: posizione che raggiunge dopo una rivoluzione completa dell'epiciclo (584 giorni). Questo è, almeno dal punto di vista qualitativo, il modo in cui Venere si comporta!



volta che il sistema fu in grado di spiegare le più notevoli irregolarità del moto planetario – la retrocessione e gli irregolari periodi di tempo richiesti per successivi viaggi attorno all'eclittica – diventò evidente che c'erano ancora da prendere in considerazione altre irregolarità, per quanto di entità assai minore.

Proprio come il modello a due sfere aveva fornito un meccanismo preciso per i moti giornalieri, permettendo in tal modo studi particolareggiati delle principali irregolarità planetarie, così il sistema epiciclo-deferente, offrendo una certa riproduzione dei principali moti planetari, permise di individuare con l'osservazione alcune irregolarità minori. Questo è il primo esempio della fecondità della sua concezione. Quando il moto previsto da un sistema di un epiciclo e un deferente viene confrontato con l'osservazione del moto effettivo di un singolo pianeta, si riscontra che non sempre il pianeta è colto nella posizione esatta in cui lo porrebbe la geometria del modello teorico. Non sempre Venere, se la si osserva accuratamente, raggiunge la massima distanza angolare di 45° dal Sole; gli intervalli di tempo fra due successive retrocessioni non sono sempre esattamente gli stessi; e nessuno dei pianeti, ad eccezione del Sole, sta sull'eclittica durante il suo moto. Il sistema di un epiciclo e un deferente non costituiva pertanto la risposta finale al problema dei pianeti. Era soltanto un punto di partenza molto promettente, che si prestò subito ad ulteriori sviluppi, i quali culminarono nell'elaborato sistema planetario di Tolomeo (100-178 d. C.): la massima realizzazione dell'antica astronomia.

Alcuni degli accorgimenti più importanti escogitati per perfezionare il sistema epiciclo-deferente possono essere illustrati da un ulteriore esame del moto del Sole. Il Sole non retrocede e quindi il suo moto non richiede un grosso epiciclo, del tipo descritto nell'ultimo paragrafo. Tuttavia, se si fissa il Sole sopra un deferente che ruoti con velocità uniforme attorno alla Terra come centro, non si ottiene una spiegazione esatta dal punto di vista quantitativo del moto solare, poiché, come si può rilevare da un riesame delle date dei solstizi ed equinozi elencate nel

capitolo 1, il Sole impiega, per spostarsi dall'equinozio primaverile a quello autunnale (180° lungo l'eclittica), quasi 6 giorni in più che per tornare dall'equinozio autunnale a quello primaverile (sempre 180°). Il moto del Sole lungo l'eclittica durante l'inverno è leggermente più veloce che durante l'estate ed un tale tipo di moto non può essere prodotto da un punto fisso su di un cerchio che ha la Terra come centro e ruota con velocità uniforme. Esaminiamo la figura 22 *a*, in cui la Terra è disegnata nel centro di un deferente che ruota con velocità uniforme ed in cui la posizione degli equinozi di primavera e d'autunno sulla sfera delle stelle è indicata dai trattini *EP* ed *EA*. La rotazione a velocità uniforme del deferente porterà il Sole *S* da *EP* ad *EA* nello stesso tempo necessario per riportarlo da *EA* ad *EP*: il che corrisponde solo approssimativamente a ciò che si osserva.

Supponiamo tuttavia che il Sole venga rimosso dal deferente e posto su di un piccolo epiciclo, il quale compie una rotazione verso ovest mentre il deferente ne compie una verso est. In figura 22 *b* sono disegnate otto posizioni del Sole in un sistema di questo genere. È chiaro che la metà estiva della rotazione del deferente non fa compiere al Sole l'intero percorso da *EP* ad *EA* e che la metà invernale della rotazione fa compiere al Sole un percorso maggiore della distanza fra *EA* ed *EP*. Così l'effetto dell'epiciclo è di aumentare il tempo impiegato dal Sole nei 180° fra *EP* ed *EA* e di diminuire il tempo impiegato nell'altra metà dell'eclittica fra *EA* ed *EP*. Se il raggio del piccolo epiciclo è $3/100$ del raggio del deferente, la differenza fra il tempo impiegato dal Sole a percorrere le due metà dell'eclittica sarà proprio dei 6 giorni richiesti.

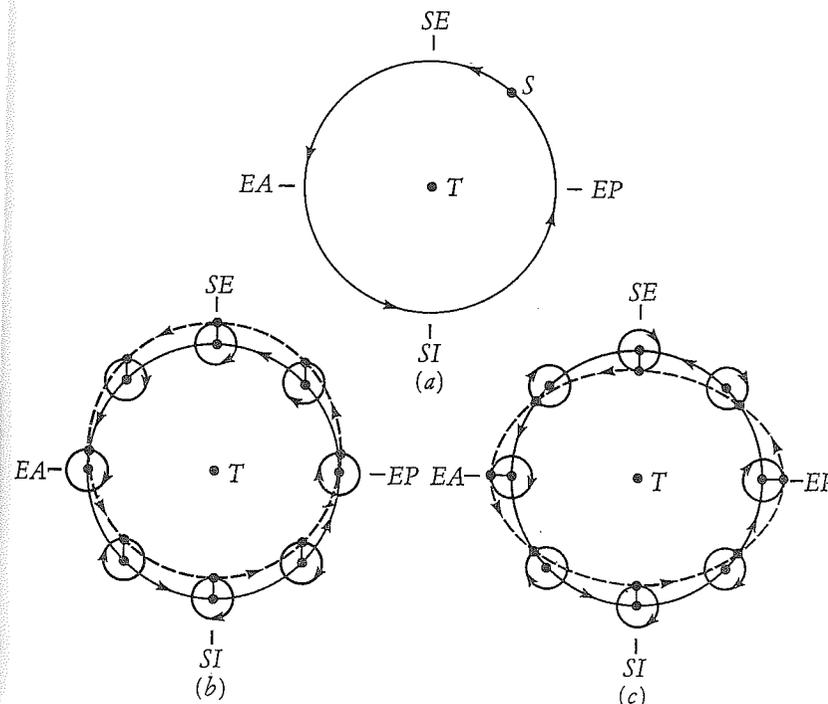
L'epiciclo adottato per correggere le irregolarità minori del moto del Sole è piccolo e non dà origine a nodi. È opportuno denominare i piccoli epicicli di questo tipo «epicicli minori», per distinguerli dagli «epicicli maggiori» trattati nell'ultimo paragrafo, che spiegano le irregolarità macroscopiche come il moto di retrocessione. Nessun sistema planetario basato su epicicli e deferenti può impiegare più di cinque epicicli maggiori, poiché vi

sono soltanto cinque pianeti che rivelano grandi irregolarità come la retrocessione. Ma il numero degli epicicli minori necessario per spiegare le piccole irregolarità è funzione soltanto della precisione delle osservazioni di cui ci si può valere e dell'accuratezza delle previsioni richieste al sistema. Sistemi che impiegavano una dozzina o anche più di epicicli non erano rari nell'antichità e nella Rinascenza, giacché con opportuna scelta delle dimensioni e della velocità di un epiciclo minore si può spiegare pressoché ogni tipo di piccola irregolarità.

Un tipo di irregolarità è stato trattato con il sussidio di

Figura 22.

Funzioni di un epiciclo minore. In (*a*) il Sole, mosso dal solo deferente che ha la Terra come centro, richiede per spostarsi da *EA* ad *EP* lo stesso tempo di cui ha bisogno per fare il percorso inverso. In (*b*) il moto composto del deferente e dell'epiciclo minore guida il Sole lungo la linea tratteggiata, cosicché lo spostamento da *EP* ad *EA* richiede più tempo del ritorno. Il disegno (*c*) mostra la curva che risulta quando l'epiciclo minore ruota ad una velocità doppia di quella relativa al disegno (*b*).



un epiciclo minore in figura 22 *b*. Un altro tipo è illustrato in figura 22 *c*. Qui l'epiciclo minore compie due rotazioni in direzione ovest, mentre il deferente ne compie una in direzione est. La composizione delle due rotazioni dà origine ad un moto risultante (la linea spezzata in figura) lungo un cerchio appiattito. Un pianeta che si sposti su questa curva si muove più velocemente ed impiega meno tempo in vicinanza dei solstizi estivo e invernale che non presso i due equinozi. Se l'epiciclo avesse compiuto un po' meno di due rotazioni nel periodo di una rotazione del deferente, allora le posizioni sull'eclittica corrispondenti alla massima velocità apparente del pianeta sarebbero cambiate nei viaggi successivi attorno all'eclittica. Se la velocità, in un certo viaggio, fosse apparsa massima in prossimità del solstizio estivo, il pianeta, nel viaggio successivo, avrebbe oltrepassato il solstizio estivo prima di raggiungere la sua velocità massima. Variazioni di questo genere se ne possono fare a volontà.

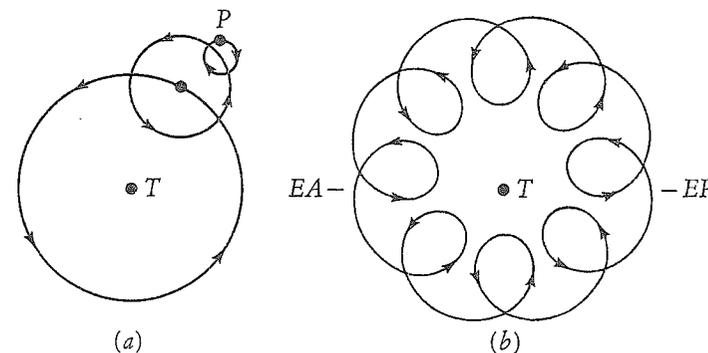
Inoltre, le applicazioni dell'epiciclo minore non sono limitate ai casi di pianeti che, come il Sole, non hanno moto di retrocessione. Un epiciclo minore può essere posto su di un epiciclo maggiore ed usato per far previsioni sui moti planetari più complicati. Una combinazione di questo genere, epiciclo su epiciclo su deferente, è illustrata in figura 23 *a*. Se l'epiciclo maggiore compie otto giri in direzione est e il minore ne compie uno in direzione ovest per ogni rotazione del deferente, allora la traiettoria descritta dal pianeta entro la sfera delle stelle è quella illustrata in figura 23 *b*. Essa ha otto nodi regolari di retrocessione, i quali però risultano un po' più fitti nella metà dell'eclittica che va dall'equinozio di primavera a quello d'autunno che non nella metà fra l'equinozio d'autunno e quello di primavera. Se si raddoppia ora la velocità di rotazione dell'epiciclo minore, la traiettoria del pianeta risulta appiattita come in figura 22 *c*. Questi disegni cominciano a far intravedere la complessità delle traiettorie che gli epicicli minori possono generare.

Né l'epiciclo minore è il solo mezzo a disposizione per correggere differenze più piccole fra i sistemi epiciclo-

deferente e il comportamento dei pianeti che è possibile osservare. Uno sguardo alla figura 22 *b* fa comprendere che l'effetto prodotto in questo caso da un epiciclo minore, che compie una rotazione in direzione ovest mentre il deferente ne compie una in direzione est, può essere egualmente raggiunto mediante un solo deferente il cui centro non coincide col centro della Terra. Un cerchio spostato di questo genere, noto agli antichi come un eccentrico, è illustrato in figura 24 *a*. Se la distanza fra la Terra *T* e il centro *O* dell'eccentrico è all'incirca $3/100$ del raggio dell'eccentrico, questo cerchio spostato spiegherà i 6 giorni in più che il Sole impiega andando dall'equinozio di primavera a quello d'autunno. Altri valori della distanza *TO*, usati in combinazione con uno o più epicicli, spiegheranno altre irregolarità planetarie minori. Ulteriori risultati possono essere raggiunti, ponendo il centro dell'eccentrico su di un piccolo deferente (fig. 24 *b*), oppure su di un secondo eccentrico più piccolo (fig. 24 *c*). In ogni caso si possono aggiungere uno o più epicicli e qualcuno di questi cerchi oppure tutti possono essere inclinati su piani differenti, allo scopo di spiegare le eventuali deviazioni verso nord e verso sud dei pianeti dall'eclittica.

Figura 23.

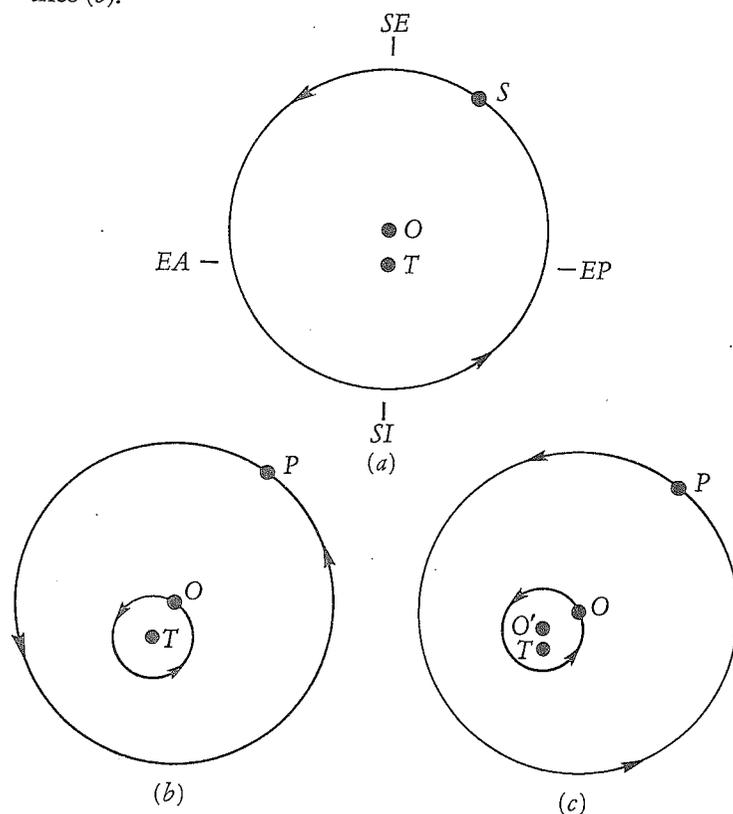
Epiciclo su epiciclo su deferente (*a*) e traiettoria tipica nello spazio (*b*), generata da questo sistema di cerchi composti. Per semplicità si è disegnata una traiettoria che si chiude regolarmente su se stessa, il che non si verifica nel moto reale dei pianeti.



Un altro sistema, l'equante, fu escogitato dagli antichi per permettere alla teoria degli epicicli di accordarsi meglio con i risultati dell'osservazione accurata. Questo sistema è di particolare importanza, perché le obiezioni estetiche che Copernico formulò su di esso (capitolo v) fornirono un motivo essenziale per respingere il sistema tolemaico e ricercare un metodo di calcolo radicalmente nuovo. Copernico si servì di epicicli ed eccentrici simili a quelli usati dai suoi antichi predecessori, ma non di equanti e ritenne che il non averli usati fosse uno dei vantaggi maggiori del suo sistema e una delle dimostrazioni più efficaci della sua verità.

Figura 24.

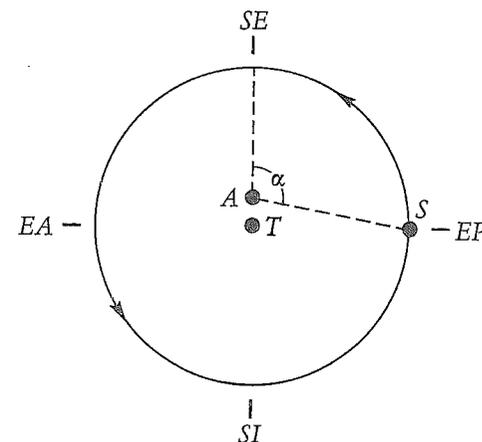
Eccentrico (*a*), eccentrico su deferente (*b*) e eccentrico su eccentrico (*c*).



Un tipo di equante, disegnato per spiegare l'irregolare comportamento del Sole, è illustrato in figura 25. Il centro del deferente del Sole coincide, come prima, con il centro della Terra *T*, ma la velocità di rotazione del deferente deve essere ora uniforme non più rispetto al suo centro geometrico *T*, ma rispetto ad un punto equante *A*, spostato in questo caso verso il solstizio d'estate. Il che significa che l'angolo α , avente centro in *A* e formato dalle congiungenti di *A* con il Sole e con il solstizio estivo, deve variare a velocità costante. Se l'angolo aumenta di 30° in un mese, deve poi aumentare di 30° in ogni mese che abbia la stessa durata. Nella figura il Sole è raffigurato nell'equinozio di primavera *EP*. Per raggiungere l'equinozio d'autunno *EA*, esso deve completare un semicerchio: il che farà aumentare l'angolo α più di 180° . Per tornare da *EA* ad *EP* deve completare un secondo semicerchio, mentre l'angolo α varierà meno di 180° . Poiché ogni aumento di 180° di α richiede lo stesso periodo di tempo, il Sole impiega necessariamente di più per andare da *EP* ad *EA* che per lo spostamento di ritorno da *EA* ad *EP*. Pertanto, visto dal punto equante *A*, il Sole si muove a velocità irregolare, che è massima in

Figura 25.

L'equante. Il Sole *S* si muove sul circolo che ha per centro la Terra ma a velocità irregolare determinata dalla condizione che l'angolo α vari uniformemente col tempo.



prossimità del solstizio invernale e minima in prossimità del solstizio estivo.

Questa è la caratteristica che definisce l'equante. La velocità di rotazione di un deferente o di qualche altro cerchio planetario deve essere uniforme non rispetto al suo centro geometrico, ma rispetto ad un punto equante spostato da questo centro. Osservato dal centro geometrico del suo deferente, sembra che il pianeta si muova a velocità irregolare o che ondeggi. Proprio in forza di questo apparente ondeggiare, Copernico ritenne che l'equante non fosse un accorgimento legittimo per applicazioni astronomiche. Per lui le irregolarità apparenti della rotazione erano violazioni della simmetria circolare uniforme che rendeva il sistema di epicicli, deferenti ed eccentrici così plausibile ed attraente. Poiché l'equante veniva spesso applicato anche agli eccentrici e poiché accorgimenti di questo genere facevano pure occasionalmente ondeggiare l'epiciclo, non è difficile immaginare come Copernico abbia potuto considerare mostruoso questo aspetto dell'astronomia tolemaica.

Gli accorgimenti matematici schematizzati nelle pagine precedenti non furono escogitati tutti assieme oppure dal solo Tolomeo. Apollonio, nel III secolo a. C., conosceva tanto gli epicicli maggiori (fig. 19 a) quanto gli eccentrici con centro mobile (fig. 24 b). Durante il secolo seguente, Ipparco arricchì l'arsenale delle armi astronomiche con gli epicicli minori e gli eccentrici a centro fisso (fig. 24 a). Inoltre egli combinò questi accorgimenti per fornire la prima spiegazione adeguata, sul piano quantitativo, delle irregolarità dei moti del Sole e della Luna. Lo stesso Tolomeo escogitò l'equante e, durante i tredici secoli che intercorrono fra la sua epoca e quella di Copernico, astronomi maomettani dapprima e astronomi europei in seguito adottarono ancora altre combinazioni di cerchi — fra cui l'epiciclo su epiciclo (fig. 23 a) e l'eccentrico (fig. 24 c) — per spiegare ulteriori irregolarità planetarie.

Ma il contributo di Tolomeo è il più importante e tutta questa tecnica di risoluzione del problema dei pianeti è giustamente nota con il suo nome, poiché fu proprio Tolomeo che per primo collegò una serie particolare

di cerchi composti per spiegare non soltanto i moti del Sole e della Luna, ma le regolarità e le irregolarità quantitative che venivano osservate nel moto apparente di tutti e sette i pianeti. Il suo *Almagesto*, libro che compendia le più grandi conquiste dell'astronomia antica, fu il primo trattato organico e matematico che offriva una spiegazione *completa, particolareggiata e quantitativa* di tutti i moti celesti. I suoi risultati furono così buoni ed i suoi metodi così efficaci che, dopo la morte di Tolomeo, il problema dei pianeti assunse una nuova forma. Per migliorare la precisione o la semplicità della teoria dei pianeti, i successori di Tolomeo aggiunsero epicicli ad epicicli ed eccentrici ad eccentrici, sfruttando tutta l'immensa versatilità della tecnica fondamentale di Tolomeo. Il problema dei pianeti era diventato semplicemente un problema di disegno: un problema da affrontare soprattutto con nuove combinazioni di elementi già esistenti. Quale particolare combinazione di deferenti, eccentrici, equanti ed epicicli avrebbe spiegato i moti planetari con la massima semplicità e precisione?

Non possiamo addentrarci oltre nelle singole soluzioni quantitative di questo problema, proposte da Ipparco, Tolomeo e dai loro successori. I sistemi quantitativi completi sono, dal punto di vista matematico, troppo complessi. Gran parte dell'*Almagesto* di Tolomeo è costituita da tavole trigonometriche, diagrammi, formule e prove, da lunghi calcoli illustrativi e da elenchi di numerose osservazioni. Anche i problemi che indirizzarono Copernico a ricercare una nuova impostazione del problema dei pianeti e i vantaggi che egli sosteneva derivassero dal suo nuovo sistema sono tutti compresi in questo astruso corpo di teoria quantitativa. Copernico non attaccò l'universo a due sfere, anche se la sua opera infine lo demolì, e non abbandonò l'uso di epicicli ed eccentrici, sebbene anche questi siano stati poi abbandonati dai suoi successori. Quello che Copernico in realtà attaccò e che diede inizio alla rivoluzione nel campo dell'astronomia fu soltanto qualcuno dei particolari matematici, apparentemente trascurabili, come gli equanti, incorporati nei complessi sistemi matematici di Tolomeo e dei suoi successori. La

battaglia iniziale fra Copernico e gli astronomi dell'antichità fu combattuta su piccoli particolari tecnici, come quelli schematizzati in questo paragrafo.

Anatomia delle credenze scientifiche.

La tecnica dell'epiciclo-deferente, illustrata nei due precedenti paragrafi, per la sua ingegnosità, adattabilità, complessità e potenzialità, non trova confronti nella storia della scienza fino ad epoche molto recenti. Nella sua forma più sviluppata, il sistema di cerchi composti costituì una realizzazione sbalorditiva. *Ma non funzionò mai* perfettamente. La concezione iniziale di Apollonio risolse il problema delle irregolarità planetarie fondamentali – moto di retrocessione, variazione di luminosità, variazione del tempo richiesto per successivi viaggi attorno all'eclittica – e lo fece con semplicità e in un solo colpo. Ma rivelò anche alcune residue irregolarità secondarie. Talune di queste furono poi spiegate dal sistema più complicato di cerchi composti sviluppato da Ipparco, ma la teoria non arrivò a corrispondere esattamente ai risultati dell'osservazione. Persino la complessa combinazione tolemaica di deferenti, eccentrici, epicicli ed equanti non conciliò definitivamente teoria ed osservazione; e la versione di Tolomeo non fu né la più complessa né l'ultima versione del sistema. Molti successori di Tolomeo, dapprima nel mondo musulmano e poi nell'Europa medievale, ripresero il problema nel punto in cui egli lo aveva lasciato e cercarono invano di giungere a quella soluzione che era a lui sfuggita. Copernico era ancora alle prese con il medesimo problema.

Esistono molte versioni del sistema tolemaico, accanto a quella che Tolomeo stesso incluse nell'*Almagesto*, ed alcune di esse raggiunsero una considerevole perfezione nella previsione delle posizioni planetarie. Ma tale perfezione era invariabilmente raggiunta a prezzo della complessità – aggiunta di nuovi epicicli minori o mezzi equivalenti –, ed una maggiore complessità portava soltanto ad una più alta approssimazione nella riproduzione del

moto dei pianeti e non alla spiegazione definitiva. Nessuna versione del sistema poté mai reggere, in assoluto, alla prova di ulteriori osservazioni perfezionate, e questa deficienza, unitamente alla totale scomparsa di quell'economia concettuale che aveva rese così convincenti versioni meno raffinate dell'universo a due sfere, condusse infine alla rivoluzione copernicana.

Ma la rivoluzione arrivò dopo un arco di tempo incredibilmente lungo. Per quasi milleottocento anni, dall'epoca di Apollonio e Ipparco fino alla nascita di Copernico, la concezione delle orbite circolari composte all'interno di un universo centrato sulla Terra resistette ad ogni attacco, sviluppato sul piano tecnico, intorno al problema dei pianeti e vi furono moltissimi attacchi di questo genere prima di quello portato da Copernico. Malgrado la sua lieve ma avvertita imperfezione e le sue notevoli deficienze sul piano dell'economia (in contrasto con il precedente universo a due sfere descritto nel capitolo 1), il sistema sviluppato da Tolomeo ebbe vita lunghissima e la longevità di questo sistema, magnifico ma evidentemente imperfetto, pone due interrogativi, strettamente collegati fra loro: come poterono l'universo a due sfere e la teoria planetaria, ad esso legata, dell'epiciclo-deferente far così presa sull'immaginazione degli astronomi? E come poi si allentò la presa psicologica, che era così stretta, di questa tradizionale impostazione di un problema tradizionale? Ovverossia, per porre le domande più direttamente: perché tardò tanto la rivoluzione copernicana? E come poi si concretò?

Questi sono interrogativi che riguardano la storia di un particolare complesso di idee, e verranno un po' più avanti esaminati da un punto di vista storico. Ma essi sono anche, più genericamente, legati alla natura e alla struttura degli schemi concettuali e al processo con cui uno schema concettuale ne sostituisce un altro. È quindi illuminante accostarsi ad essi ritornando dapprima brevemente alle categorie astratte logiche e psicologiche, introdotte nel penultimo paragrafo del capitolo 1. Abbiamo esaminato allora le funzioni di uno schema concettuale: ci chiediamo ora in che modo uno schema regolarmente

funzionante, come il primo universo a due sfere, possa essere rimpiazzato. Esaminiamo in primo luogo la logica del fenomeno.

Da un punto di vista logico, vi sono sempre molti schemi concettuali alternativi in grado di ordinare ogni serie *prescritta* di osservazioni; ma questi schemi alternativi differiscono nelle previsioni intorno a fenomeni non compresi nella serie. Sia il sistema copernicano che quello newtoniano spiegheranno le osservazioni ad occhio nudo delle stelle e del Sole altrettanto bene che il sistema a due sfere, e altrettanto farà il sistema di Eraclide, e così il sistema sviluppato dal successore di Copernico, Tycho Brahe. In teoria esistono infinite altre alternative. Ma queste alternative concordano soprattutto sulle osservazioni già eseguite. Esse non danno spiegazioni identiche di tutte le osservazioni possibili. Il sistema copernicano, ad esempio, differisce dall'universo a due sfere nel prevedere un moto apparente annuale delle stelle, nel postulare per la sfera stellare un diametro molto maggiore e nel suggerire (sebbene non a Copernico) un nuovo tipo di soluzione del problema dei pianeti. È a causa di differenze come queste (e ve ne sono molte altre) che uno scienziato deve credere nel suo sistema prima di affidare ad esso il compito di guidare ricerche feconde nel mondo dell'*ignoto*. Soltanto una delle diverse alternative può *ragionevolmente* rappresentare la realtà e lo scienziato che esplora nuove regioni deve essere sicuro d'aver scelto proprio questa oppure quella che si avvicina alla realtà con la maggior approssimazione possibile. Ma lo scienziato paga un certo prezzo per questo suo affidamento ad una particolare alternativa: può compiere degli errori. Una sola osservazione incompatibile con la sua teoria viene a dimostrare che egli in tutta la sua ricerca, ha applicato una teoria sbagliata. Il suo schema concettuale deve quindi essere abbandonato e sostituito.

Questa, a grandi linee, è la struttura logica di una rivoluzione scientifica. Uno schema concettuale, ritenuto vero perché economico, fecondo e soddisfacente dal punto di vista cosmologico, conduce infine a risultati incompatibili con l'osservazione. La credenza in esso deve allora essere

abbandonata e deve essere adottata una nuova teoria; dopo di che il processo ricomincia da capo. È uno schema utile, perché l'incompatibilità fra teoria e osservazione è la causa ultima di ogni rivoluzione nel mondo delle scienze. Ma, storicamente, il processo di rivoluzione non è mai, né potrebbe eventualmente essere, così semplice come indica la traccia logica. Come abbiamo già cominciato a scoprire, l'osservazione non è mai *assolutamente* incompatibile con uno schema concettuale.

Per Copernico, il comportamento dei pianeti era incompatibile con l'universo a due sfere; egli sentiva che, aggiungendo sempre nuovi cerchi, i suoi predecessori avevano semplicemente « rabberciato » e « forzato » il sistema tolemaico per poterlo rendere conforme alle osservazioni; e credeva che la effettiva necessità di quel « rabberciare » e « forzare » costituisse una prova evidente dell'assoluta esigenza di una impostazione radicalmente nuova. Ma i predecessori di Copernico, pur avendo a disposizione esattamente gli stessi tipi di strumenti e osservazioni, avevano valutato la medesima situazione in modo affatto diverso. Quello che per Copernico era « rabberciare » e « forzare », costituiva per essi un processo naturale di adattamento ed estensione, molto simile al processo che in un'epoca precedente era stato adottato per incorporare il moto del Sole in un universo a due sfere ideato inizialmente per la Terra e le stelle. I predecessori di Copernico ebbero ben pochi dubbi che il sistema sarebbe stato infine reso soddisfacente.

In breve, sebbene gli scienziati abbandonino certamente uno schema concettuale quando esso appaia in contrasto irriducibile con l'osservazione, l'enfasi sull'incompatibilità logica maschera un problema essenziale. Cos'è che trasforma una contraddizione in apparenza momentanea in un contrasto inevitabile? Come può uno schema concettuale che una generazione descrive ammirata come ingegnoso, versatile e complesso diventare per la generazione successiva soltanto oscuro, ambiguo e pesante? Perché gli scienziati abbracciano certe teorie malgrado le loro contraddizioni e perché poi, dopo averle abbracciate, le abbandonano? Questi sono problemi di anatomia del-

le credenze scientifiche. Essi costituiscono l'argomento principale dei due prossimi capitoli, che costruiscono lo scenario adatto per la rivoluzione copernicana.

Tuttavia il nostro problema immediato è l'analisi della presa che la tradizione antica della ricerca astronomica esercitò sulla mente umana. Come poté questa tradizione creare tutta una serie di abitudini mentali, che guidarono l'immaginazione astronomica, limitarono i concetti validi nella ricerca e resero certi tipi di innovazioni difficili da concepire e ancor più difficili da accettare? Ci siamo già occupati, almeno implicitamente, degli aspetti strettamente astronomici di questo problema. Tanto l'universo a due sfere quanto la tecnica ad esso collegata dell'epiclo-deferente si mostrarono inizialmente assai economici e fecondi di sviluppi; i loro primi successi parvero garantire la fondamentale esattezza dell'impostazione; solo modifiche di poca entità sarebbero state certamente necessarie per rendere le previsioni matematiche conformi all'osservazione. Una convinzione di questo genere è difficile da intaccare, in modo particolare dopo che è stata adottata nell'attività pratica da un'intera generazione di astronomi che la trasmettono poi ai successori attraverso l'insegnamento e gli scritti. Questo è l'effetto della propaganda nel regno delle idee scientifiche.

Questo effetto di propaganda non costituisce tuttavia l'intera spiegazione della forza della tradizione astronomica, e, nel cercare di completare questa spiegazione, ci troveremo temporaneamente estraniati del tutto dai problemi astronomici. L'universo a due sfere fornì una guida feconda alla soluzione di problemi tanto al di fuori quanto all'interno del campo astronomico. Verso la fine del IV secolo a. C., esso era stato adottato non soltanto per risolvere i problemi dei pianeti, ma anche per problemi terrestri, come la caduta di una foglia e il volo di una freccia, e per problemi di ordine spirituale, come il rapporto fra l'uomo e le sue divinità. Se l'universo a due sfere e, in particolare, la concezione di una Terra centrale e stabile sembravano allora l'indiscutibile base di partenza di ogni ricerca astronomica, ciò accadeva soprattutto perché l'astronomo non poteva più rompere l'armonia dell'univer-

so a due sfere senza sconvolgere la fisica e anche la religione. Fondamentali concetti d'astronomia erano diventati elementi di una più grande struttura di pensiero e gli elementi non astronomici potevano risultare tanto importanti quanto quelli astronomici nel vincolare l'immaginazione degli astronomi. La storia della rivoluzione copernicana non è quindi semplicemente una storia di astronomi e di cieli.

i. *Correzione del tempo solare.*

Nei capitoli centrali di questo libro abbiamo supposto che, se il giorno solare apparente vien definito come l'intervallo di tempo fra un mezzogiorno locale e il mezzogiorno successivo, allora il tempo necessario alle stelle per completare i loro successivi circoli sia sempre di 4 minuti (o piú esattamente di 3 minuti e 56 secondi) piú breve di questo giorno solare. Ma, come è stato fatto rilevare in una nota del capitolo I, le cose non stanno affatto cosí. Se gli intervalli fra i successivi mezzogior- ni locali sono perfettamente regolari, allora le stelle devono muoversi a velocità irregolare. E viceversa, se le stelle comple- tano i successivi circoli quotidiani in intervalli eguali di tem- po, allora deve variare la lunghezza dei successivi giorni sola- ri. Questo fatto fu riscontrato nell'antichità, almeno verso l'epoca di Tolomeo e molto probabilmente anche prima. Per capirlo, supponiamo, come fecero gli antichi, che il moto appa- rente delle stelle sia perfettamente regolare e che quindi le stelle forniscano una scala fondamentale del tempo. Scoprire- mo allora due diverse ragioni per cui devono variare gli inter- valli fra gli istanti nei quali il Sole raggiunge giornalmente la sua altezza massima sull'orizzonte.

La prima causa dell'irregolarità del tempo solare apparente è la variazione della velocità a cui il Sole sembra muoversi at- traverso le costellazioni zodiacali. Come abbiamo visto nel ca- pitolo II, il Sole si muove lungo l'eclittica piú velocemente dal- l'equinozio autunnale a quello primaverile che dall'equinozio primaverile a quello autunnale. Nella sua corsa quotidiana con le stelle, il Sole sembra quindi perdere piú rapidamente terre- no d'inverno che d'estate, cosicché se il tempo è misurato dalle stelle, il Sole deve impiegare piú tempo d'inverno che d'estate per tornare alla sua massima altezza sull'orizzonte. Ne conse- gue che il giorno solare apparente dovrebbe avere la massima lunghezza a metà dell'inverno e la minima a metà dell'estate:

e così accadrebbe se non intervenisse un'altra causa d'irregolarità.

La seconda ragione di variabilità del giorno solare apparente è data dall'angolo secondo cui l'eclittica interseca l'equatore sulla sfera celeste. Per capirne l'effetto riguardiamo la figura 13, nel capitolo 1, ed immaginiamo che sulla sfera siano tracciate ad intervalli eguali linee di longitudine celeste, così come su ogni globo terrestre vengono tracciate linee di longitudine. Per semplificare le cose, supponiamo inoltre che il moto apparente del Sole lungo l'eclittica sia perfettamente regolare ed abbia una velocità di 1° al giorno lungo il cerchio massimo. Vien fuori allora che, essendo l'eclittica inclinata rispetto all'equatore, il moto risultante *in direzione est* del Sole varia da un giorno all'altro. Quando il Sole si trova in uno dei solstizi oppure vicino, il suo moto apparente rispetto alle stelle è, con buona approssimazione, parallelo all'equatore celeste. Inoltre esso si sta muovendo in una parte della sfera in cui le linee di longitudine sono un po' più vicine tra loro che all'equatore. Come conseguenza il moto risultante in direzione est del Sole è qualcosa di più di 1° al giorno *di longitudine celeste* e la sfera celeste deve quindi ruotare verso occidente un po' più di 361° per portare il Sole da una posizione di massima altezza a quella successiva. Agli equinozi la cosa è del tutto diversa. In essi le linee di longitudine celeste si trovano sulla sfera alla loro massima distanza. Per di più, il moto risultante continuo del Sole è più verso nord-est o sud-est che in direzione est e pertanto il Sole non si muove verso est di 1° al giorno. Ne risulta che la sfera celeste non ha bisogno di ruotare di 361° per riportare il Sole alla sua massima elevazione. Questo effetto, considerato da solo, fa sì che il giorno solare apparente abbia la durata massima nei solstizi e la minima negli equinozi.

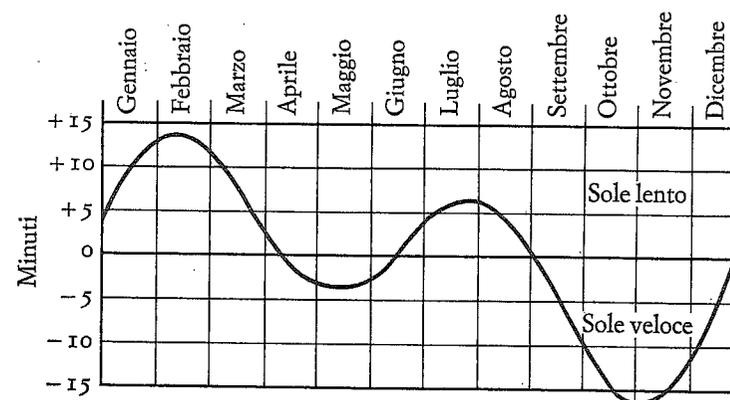
Allo scopo di correggere queste due irregolarità, le civiltà moderne hanno adottato una scala del tempo nota come tempo solare medio, la cui unità di misura fondamentale del tempo è la lunghezza *media* del giorno solare apparente. In questa scala del tempo, le stelle, per definizione, si muovono con perfetta regolarità e completano i loro circoli quotidiani esattamente in 23 ore 56 minuti e 4,091 secondi. Ma una scala che regola il moto delle stelle rende irregolare quello del Sole. L'elevazione massima del Sole, ad esempio, raramente viene a coincidere con il mezzogiorno locale, tempo solare medio. Il tempo preso con le meridiane, i soli strumenti che misurino direttamente il tempo solare apparente, non trascorre con la stessa velocità del tempo preso con gli orologi o annunciato dai se-

gnali orari della radio. In dicembre e gennaio, quando entrambi gli effetti sopradescritti agiscono in modo da ridurre la lunghezza del giorno solare apparente, l'intervallo fra le successive elevazioni massime del Sole è, con grande approssimazione, 0,5 minuti più piccolo del giorno solare medio. Inoltre, l'effetto di questa piccola differenza è cumulativo: il tempo apparente scorre più lento del tempo medio per molti giorni di fila, cosicché in una parte dell'anno il Sole arriva alla sua massima elevazione (il mezzogiorno apparente) quasi 20 minuti prima del mezzogiorno solare medio. Nelle altre parti dell'anno il tempo apparente scorre più veloce del tempo medio e, nel corso degli anni, i due valori vengono a compensarsi e a coincidere. Ma raramente essi coincidono in un giorno qualsiasi. Per prendere il tempo esatto dal Sole, è quindi necessario correggere la meridiana con l'uso di una tavola o di un diagramma come quello in figura 53.

La discussione precedente sul tempo ha preso come modello di regolarità il moto apparente delle stelle. È chiaro che la scelta di questa base di riferimento è arbitraria, almeno da un punto di vista logico. Logicamente noi avremmo potuto scegliere, allo stesso modo, come nostro modello di regolarità, il moto apparente del Sole e dimostrare che, nella corrispondente scala del tempo, le stelle si muovono ad una velocità continuamente variabile. Ma la scelta del Sole come modello di re-

Figura 53.

Grafico dell'equazione del tempo che esprime la variazione annuale della differenza fra il tempo solare medio e il tempo solare apparente.



golarità sarebbe estremamente scomoda sia per la scienza che per la vita civile. Il diagramma in figura 53 dovrebbe essere applicato agli orologi e ai pendoli invece che alle meridiane. Gli astronomi e i fisici sarebbero costretti a descrivere la rotazione assiale della Terra come una rotazione a velocità continuamente variabile. Il modello stellare evita questi inconvenienti. Si adatta bene a tutte le funzioni civili e a gran parte di quelle scientifiche.

Eppure esso non si è rivelato del tutto adeguato alla scienza, o almeno alla dottrina scientifica; la scala del tempo implicita nelle leggi del moto di Newton non corrisponde integralmente al modello stellare. Dalle leggi di Newton, nella loro moderna interpretazione, è possibile dimostrare che la rotazione assiale della Terra viene gradualmente rallentata da effetti come l'attrito di marea e che, di conseguenza, i moti stellari apparenti stanno molto gradualmente rallentando. Sia le leggi che il modello stellare devono quindi essere rivisti e considerazioni di opportunità scientifica suggeriscono la ricerca di una nuova base di riferimento. Aggiornare sul piano teorico il modello stellare non ha alcuna importanza pratica. Ma ha un'immensa importanza per la scienza e ha quindi indirizzato gli scienziati verso una rinnovata opera di ricerca, che prosegue attivamente ancor oggi, per trovare un orologio che corrisponda alla scala del tempo della dottrina scientifica con precisione maggiore della stessa macchina celeste.

2. La precessione degli equinozi.

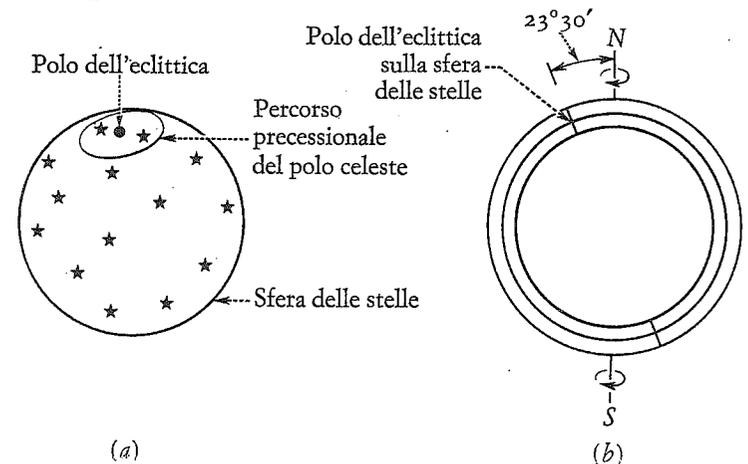
Una seconda semplificazione tecnica introdotta nel corpo di questo libro è stata l'aver trascurato la precessione degli equinozi. Questo è l'effetto, brevemente ricordato nel capitolo I, che si manifesta in un lento moto attraverso le stelle del polo celeste. Se ci fossimo occupati solo di osservazioni ad occhio nudo fatte nell'arco della vita di un singolo astronomo, la nostra semplificazione sarebbe stata del tutto appropriata: le osservazioni ad occhio nudo non possono rivelare la sua inesattezza a meno che non siano eseguite contemporaneamente in punti a grande distanza. Ma osservazioni fatte, ad esempio, a distanza di due secoli mostrano che, mentre le stesse stelle conservano le medesime posizioni relative, il polo celeste attorno al quale esse si muovono muta gradualmente la sua posizione in mezzo a loro ad una velocità di poco superiore a $0,5^\circ$ al secolo. Osservazioni ripetute a distanze di tempo molto più lun-

ghe rivelano l'andamento di questo moto di precessione; col trascorrere dei secoli il polo dei cieli si sposta gradualmente attraverso le stelle lungo un circolo e completa una rivoluzione ogni 26 000 anni. Il centro di questo circolo è il polo dell'eclittica: il punto in cui un diametro perpendicolare al piano dell'eclittica interseca la sfera celeste e il raggio del circolo risulta esattamente di $23^\circ 30'$, lo stesso valore dell'angolo secondo cui l'equatore celeste interseca l'eclittica sulla sfera delle stelle (fig. 54 a).

Il moto di precessione sembra sia stato per la prima volta rilevato dall'astronomo ellenistico Ipparco nel II secolo a. C. e, sebbene in un primo tempo non fosse molto noto, venne discusso da un certo numero di astronomi successivi, compreso Tolomeo. La maggior parte dei successori musulmani di Tolomeo descrissero qualche aspetto dell'effetto e, aggiungendo al-

Figura 54.

La precessione degli equinozi. Lo schema (a) mostra il circolo sulla sfera celeste attorno al quale il polo celeste compie una rotazione ogni 26 000 anni. Il centro del circolo è il polo dell'eclittica e tutti i punti del circolo si trovano esattamente a $23^\circ 30'$ dal centro. Lo schema (b) mostra come i musulmani spiegarono la precessione con l'aiuto di una nona sfera, la sfera esterna del disegno. Questa nona sfera compie una rotazione ogni 23 ore e 56 minuti, come la sfera delle stelle faceva nel sistema più vecchio a otto sfere. L'ottava sfera, su cui sono poste le stelle, compie una rotazione attorno ai suoi poli ogni 26 000 anni, facendo così lentamente cambiare la posizione del polo celeste fra le stelle. Dentro l'ottava sfera c'è la sfera di Saturno, che racchiude le rimanenti sfere planetarie come nel sistema più vecchio.



l'antico sistema una nona sfera, riuscirono a spiegarlo dal punto di vista fisico. La spiegazione piú popolare è illustrata schematicamente in figura 54*b*, la quale mostra le tre sfere piú esterne della serie; *N* e *S* sono i poli nord e sud celesti e la sfera esterna compie una rotazione attorno ad essi in direzione ovest ogni 23 ore e 56 minuti: cosí come la sfera delle stelle faceva nel sistema piú vecchio. La sfera successiva, quella mediana dello schema, è la sfera che porta le stelle ed è collegata alla sfera piú esterna da un asse passante per i poli dell'eclittica sulla sfera delle stelle e per due punti che si trovano a $23^{\circ}30'$ dai poli sulla sfera esterna. Questa nuova sfera delle stelle vien fatta ruotare giornalmente dalla sfera piú esterna (il che spiega i circoli stellari quotidiani). Inoltre essa possiede un suo proprio lento moto, una rotazione ogni 26 000 anni, che fa gradualmente variare i rapporti geometrici fra le singole stelle e i poli celesti. La piú interna delle tre sfere è la sfera di Saturno ed è disegnata come uno spesso involucro per far spazio agli epicicli che compongono il moto di Saturno. Questa sfera spessa, collegata alla sfera delle stelle da un asse passante per i poli dell'eclittica, spiega, di per se stessa, il moto circolare medio di Saturno attraverso le stelle.

Nel contesto del pensiero astronomico antico e medievale, questa spiegazione della precessione fondata sulla nona sfera sembra semplice e naturale. In realtà essa va abbastanza d'accordo con la spiegazione copernicana: un moto conico graduale dell'asse della Terra che, nel corso di 26 000 anni, è diretto successivamente a tutti i punti di un circolo avente un raggio di $23^{\circ}30'$ e il centro nel polo dell'eclittica. Finché Newton non ebbe spiegata la precessione come una conseguenza fisica dell'attrazione gravitazionale lunare che ha prodotto il rigonfiamento equatoriale della Terra, sia gli astronomi copernicani che quelli tolemaici dovettero ricorrere, per spiegarla, ad un moto addizionale e superfluo dal punto di vista fisico¹. La precessione non ha quindi nessuna influenza logica sul passaggio da un universo a Terra centrale ad un universo a Sole centrale.

¹ Copernico stesso non dovette ricorrere a un moto addizionale per spiegare la precessione, in quanto ne aveva già introdotto uno per un altro scopo. Egli aveva adottato un moto conico annuale per far sí che l'asse della Terra si conservasse, durante tutto l'anno, parallelo a se stesso (fig. 31*b*) e poté quindi spiegare la precessione assegnando a questo moto conico un periodo di pochissimo inferiore all'anno. Ma i successori di Copernico, i quali ritennero che un particolare moto orbitale avrebbe assicurato in eterno l'allineamento dell'asse della Terra, ebbero bisogno di un ulteriore moto conico con un periodo di 26 000 anni per spiegare la variazione di posizione del polo celeste.

Tuttavia, dal punto di vista storico, il problema della spiegazione della precessione ha un ruolo importante nell'avvio della rivoluzione copernicana. Esso contribuì a far apparire abnorme l'astronomia tolemaica. Le conseguenze che la precessione ha sulle osservazioni astronomiche sono molto limitate anche quando le osservazioni si estendono per un arco di parecchi secoli e da un radicale cambiamento nella descrizione del fenomeno globale può derivare un piccolo errore nei dati sperimentali. Sia Ipparco che Tolomeo diedero della precessione una descrizione equivalente, sul piano qualitativo, a quella illustrata in figura 54, ma molti dei loro contemporanei negarono integralmente l'esistenza dell'effetto oppure lo descrissero in un modo del tutto diverso. Nel mondo musulmano, in particolare, prevalsero numerose descrizioni della precessione fra loro divergenti. Non ci fu accordo sulla velocità del fenomeno: in realtà molti astronomi pensavano che la velocità variasse. Ci fu inoltre una scuola importante la quale ritenne che anche la direzione della precessione mutasse periodicamente: effetto noto come trepidazione. Furono necessarie le osservazioni di Brahe perché gli astronomi potessero rendersi nuovamente conto della reale semplicità del fenomeno. Lo stesso Copernico non migliorò minimamente la situazione. Egli aggiunse al suo sistema altri circoli per spiegare la variazione graduale della velocità della precessione ed altri effetti inesistenti. Ma sebbene Copernico non abbia potuto migliorare la spiegazione della precessione data dagli astronomi antichi e medievali, il suo impegno sul problema fu grandissimo e tale impegno diede alla riforma astronomiche un notevole impulso. Al tempo di Copernico una spiegazione adeguata della precessione costituiva il principale postulato necessario per la soluzione del problema piú pressante dell'astronomia pratica: la riforma del calendario giuliano.

Per scoprire l'effetto della precessione sullo studio dei calendari, torniamo ancora alla figura 54. Come mostra lo schema, la posizione dell'eclittica sulla sfera delle stelle è fissata una volta per sempre. Ma sebbene il variare delle posizioni dei poli celesti non faccia muovere l'eclittica, esso cambia in effetti la posizione dell'equatore celeste e quindi degli equinozi, i punti in cui l'eclittica e l'equatore celeste si intersecano. Durante il periodo della precessione, 26 000 anni, ciascuno degli equinozi si sposta lentamente e regolarmente attorno all'eclittica alla velocità di circa $1^{\circ}30'$ al secolo. Pertanto il periodo di tempo necessario al Sole per compiere una rotazione attorno all'eclittica (il cosiddetto anno siderale) non è esattamente lo

stesso periodo necessario al Sole per spostarsi sull'eclittica da un equinozio di primavera all'altro (l'anno tropicale). Quest'ultimo, che risulta di oltre 20 minuti più breve del primo, è assai più difficile da determinare, in quanto riferisce il moto del Sole ad un punto immaginario e mobile invece che ad una stella fissa. Ma l'anno tropicale è l'anno delle stagioni ed è quest'anno che deve essere misurato con precisione perché si possa progettare un calendario preciso a lungo termine. L'impegno di Copernico relativo al calendario lo condusse quindi ad un serio studio della precessione e, di conseguenza, ad una profonda conoscenza di questo aspetto dell'astronomia intorno al quale gli astronomi tolemaici si trovavano nel disaccordo più completo. Ed è proprio il problema della precessione che si trova alla base del rilievo di Copernico che « i matematici... non possono neppure spiegare e osservare la lunghezza costante dell'anno stagionale » (cap. v); e questo rilievo è in capo all'elenco delle ragioni dell'innovazione.

3. Fasi ed eclissi della Luna.

Essendo identica alla spiegazione moderna, la spiegazione data dagli antichi sulla causa delle fasi della Luna non ebbe alcun ruolo nella rivoluzione copernicana e noi abbiamo potuto quindi trascurarla nei precedenti capitoli di questo libro. Ma le fasi della Luna hanno un ruolo diretto nelle antiche misurazioni delle dimensioni dell'universo e queste misurazioni, come abbiamo più volte fatto rilevare, contribuirono a far apparire l'antico universo a due sfere vero e reale agli occhi degli scienziati ed anche dei profani. Inoltre, l'antica spiegazione delle fasi, come pure la spiegazione delle eclissi ad essa collegata, fornisce un altro esempio importante del grado di perfezione raggiunto dall'antica visione del mondo.

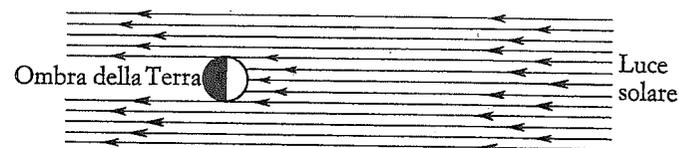
La spiegazione di cui ci occupiamo si diffuse in Grecia verso la fine del IV secolo a. C., sebbene la sua origine risalga forse ad un'epoca considerevolmente anteriore. L'accettazione dell'universo a due sfere comportò l'assunzione più vasta e meno documentata che tutti i corpi erranti dei cieli fossero pure delle sfere. In parte questa assunzione derivò per analogia dalla forma sferica della Terra e dei cieli e in parte dal concetto di perfezione della forma sferica e della sua adeguatezza alla perfezione dei cieli. Una prova più diretta, se pure incompleta, fu offerta dall'osservazione delle sezioni trasversali del Sole e della Luna. Ora, se la Luna è una sfera, un Sole lontano può illu-

minare soltanto metà della sua superficie (fig. 55 a) e la frazione di questo emisfero illuminato visibile da un osservatore varierà necessariamente con la sua posizione. Un osservatore sul Sole vedrebbe in ogni istante tutto l'emisfero; un osservatore sulla Terra che guardasse verso la Luna quando essa si trova fra lui e il Sole non vedrebbe assolutamente nulla dell'emisfero illuminato. Ne consegue che la parte di superficie della Luna visibile distintamente da un osservatore terrestre dipende necessariamente dalle posizioni relative del Sole, della Luna e della Terra.

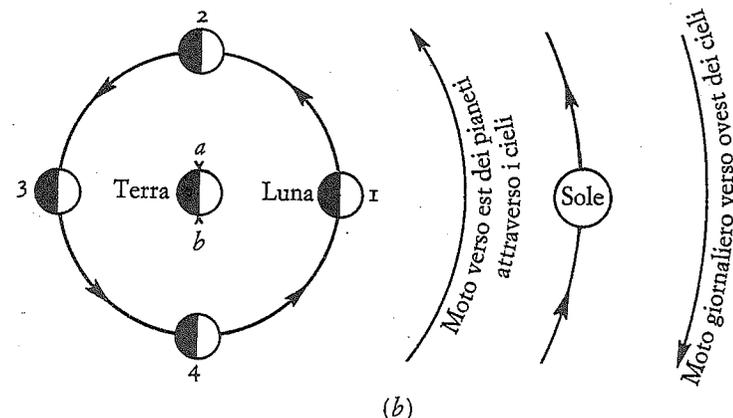
Quattro posizioni relative del Sole e della Luna, in quattro periodi ad uguale intervallo durante il mese lunare, sono illustrate nella figura 55 b, che descrive le orbite centrate sulla

Figura 55.

La spiegazione antica (e moderna) delle fasi della Luna. Il disegno (a) mostra che la metà soltanto della superficie di una sfera è illuminata dai raggi del Sole lontano. Il disegno (b) mostra la parte di questo emisfero illuminato, visibile da un osservatore terrestre per diverse posizioni relative del Sole, della Terra e della Luna. La posizione 1 rappresenta la Luna nuova; la 2 la mezzaluna crescente; la 3 la Luna piena e la 4 la mezzaluna calante.



(a)



(b)

Terra del Sole e della Luna nel piano dell'eclittica. (Poiché, nelle discussioni delle fasi della Luna, hanno importanza soltanto le posizioni relative, lo schema può esser facilmente adattato ad un universo centrato sul Sole). Una rotazione verso ovest di tutto lo schema, ferma restando la Terra centrale, spiega il moto giornaliero del Sole e della Luna, cosicché un osservatore in *a* vede il Sole tramontare, mentre un osservatore in *b* lo vede sorgere. Solo i moti verso est del Sole e della Luna sono moti con un riferimento al disegno. Quando la Luna si trova nella posizione 1 del disegno, essa sorge con il Sole, ma, essendo il suo lato scuro in direzione della Terra, risulta pochissimo visibile da un osservatore terrestre. Questa è la posizione della Luna nuova. Poco più di una settimana più tardi, il rapido moto orbitale della Luna l'ha portata a 90° ad oriente del Sole che si sposta più lentamente e la sua posizione, relativa al Sole, è la 2. Essa sorge ora a mezzogiorno ed è vicina allo zenit al tramonto. Solo la metà del disco è visibile distintamente dalla Terra, cosicché questa è la posizione del primo quarto. Dopo un'altra settimana o poco più, la Luna è piena e sorge quando il Sole tramonta (posizione 3). Il terzo quarto corrisponde alla posizione 4, in cui la Luna sorge verso mezzanotte ed è vicina allo zenit al sorgere del Sole.

Lo schema usato per ricostruire le fasi della Luna può essere adottato anche per spiegare le eclissi: quando la Luna si sposta dalla posizione 2 alla posizione 4, può darsi che passi attraverso l'ombra della Terra: nel qual caso essa si oscura e si eclissa. Se la Luna apparisse sempre sull'eclittica, si eclisserebbe ogniqualvolta arriva nella posizione 3; ma, poiché essa devia continuamente verso nord e verso sud, la Luna piena, la Terra e il Sole raramente vengono a trovarsi su di una linea retta. La Luna piena deve giacere vicino all'eclittica perché ci sia un'eclissi lunare e ciò non può verificarsi più di due volte all'anno e raramente si verifica con questa frequenza. Le eclissi solari si hanno ogniqualvolta la Luna, nella posizione 1, proietta la sua ombra sulla Terra e ciò accade con una certa frequenza: almeno due volte all'anno. Eppure le eclissi solari sono viste raramente da osservatori terrestri. L'ombra della Luna sulla Terra è estremamente piccola ed un osservatore deve trovarsi in quest'ombra per vedere l'eclisse. Inoltre è raro che la Luna intercetti più di una piccola frazione del disco del Sole. Pertanto un osservatore, in una località qualsiasi, potrà vedere raramente un'eclisse di Sole, sia pure parziale, e mai forse un'eclisse totale. Si tratterà per lui di un fenomeno raro, straordinario e talora terrificante.

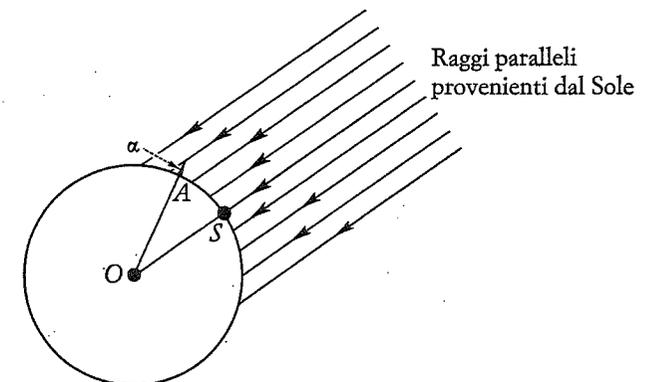
4. Antiche misurazioni dell'universo.

Una delle più interessanti applicazioni tecniche dell'astronomia antica fu il suo uso nella determinazione delle distanze e dimensioni cosmologiche che non potevano essere misurate direttamente, vale a dire con le ordinarie canne di misurazione. Queste misurazioni di distanze illustrano la fecondità dell'antica visione del mondo con più immediatezza di quasi tutte le altre sue applicazioni, poiché le operazioni matematiche su cui si basano perdono ogni significato fisico se taluni elementi essenziali nello schema concettuale non sono veri. Ad esempio: sia che la Terra sia un disco piatto oppure una sfera, le stelle appaiono sempre mobili in circoli quotidiani e i procedimenti che descrivono questo moto apparente risultano quindi utili qualunque sia la loro base concettuale. Ma solo se la Terra è realmente una sfera, si può affermare che essa abbia una circonferenza la cui lunghezza può essere determinata dalle osservazioni dei cieli che ora descriveremo.

Il primo accenno a misurazioni della circonferenza della Terra compare negli scritti di Aristotele; tali misurazioni furono quindi probabilmente fatte verso la metà del IV secolo a. C.

Figura 56.

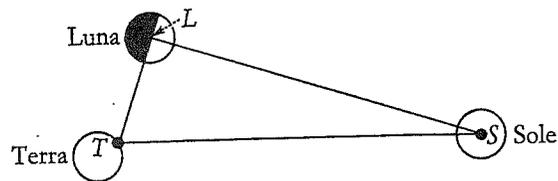
La misurazione della circonferenza della Terra effettuata da Eratostene. Se *S* si trova nella direzione a sud di *A* sulla superficie della Terra, allora la distanza *AS* deve stare alla circonferenza della Terra nel medesimo rapporto in cui α sta a 360°.



Ma di queste piú antiche misurazioni noi conosciamo soltanto i risultati e non il metodo adottato; la prima misurazione di cui si abbia una spiegazione relativamente completa, se pure di seconda mano, è quella effettuata nel III secolo a. C. da Eratostene, bibliotecario della grande raccolta di manoscritti di Alessandria. Eratostene misurò l'angolo α (fig. 56) formato dalla direzione dei raggi del Sole a mezzogiorno e da uno gnomone verticale posto in Alessandria, A , in un giorno in cui il Sole a mezzogiorno si trovava sulla perpendicolare a Syene, S , un'altra città egizia posta a 5000 stadi, in direzione sud, da Alessandria. Egli trovò che questo angolo era $1/50$ di angolo giro (vale a dire $7^{\circ}12'$). Poiché tutti i raggi che arrivano sulla superficie della Terra dal Sole lontanissimo possono considerarsi paralleli, l'angolo α che rappresenta la distanza angolare del Sole dallo zenit ad Alessandria è uguale all'angolo AOS formato dai raggi sottesi fra A ed S e il centro O della Terra. Inoltre, poiché questo angolo è esattamente $1/50$ dell'angolo al centro di una circonferenza, la distanza da Alessandria a Syene deve essere $1/50$ della circonferenza della Terra, e la circonferenza deve risultare $50 \times$ (distanza da Alessandria a Syene) = $50 \times 5000 = 250\,000$ stadi. La maggior parte degli studiosi moderni ritengono che il valore calcolato da Eratostene sia di circa il 5 per cento inferiore al risultato ottenuto dalla misurazione moderna (40 chilometri), ma sfortunatamente è impossibile esserne sicuri. La lunghezza dell'unità di misura « stadio » usata da Eratostene è sconosciuta e il fatto che si conosca la posizione di Alessandria e Syene non può esser preso in considerazione per definire l'unità di misura, in quanto sia il numero « 500 » che la frazione « $1/50$ » usati nel calcolo descritto

Figura 57.

La misurazione fatta da Aristarco delle distanze relative dalla Terra alla Luna e al Sole. Quando la Luna è esattamente semipiena, l'angolo TLS deve essere di 90° . Pertanto una misurazione dell'angolo LTS determinerà il rapporto fra TL e TS , vale a dire il rapporto della distanza fra la Luna e la Terra con quella fra la Terra e il Sole.



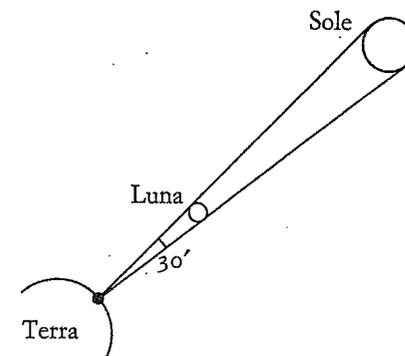
sono stati evidentemente « arrotondati » perché la relazione fosse piú facile da leggere.

Una seconda serie di misurazioni venne effettuata, nel II secolo a. C., da Aristarco di Samo, piú famoso ora per la sua anticipazione del sistema copernicano. Egli valutò la distanza del Sole e della Luna e le loro dimensioni in funzione dell'angolo LTS formato dalle rette congiungenti i centri del Sole e della Luna con la Terra, quando la Luna è esattamente semipiena (fig. 57). Poiché la Luna può essere semipiena soltanto se l'angolo LTS formato dalle rette congiungenti la Terra e il Sole con la Luna è rettangolo, il valore di LTS deve determinare completamente la figura del triangolo rettangolo i cui vertici sono la Luna, la Terra e il Sole. La misurazione di Aristarco attribuì a LTS il valore di 87° , il che corrisponde ad un triangolo in cui $TS : TL = 19 : 1$. Di conseguenza egli riferì che il Sole era distante dalla Terra 19 volte la distanza della Luna dalla Terra e che, poiché la Luna e il Sole sottendono sulla Terra il medesimo angolo (fig. 58), il Sole era anche 19 volte piú grande.

Le misurazioni moderne, eseguite con procedimenti del tutto diversi e con l'aiuto dei telescopi, indicano che il rapporto fissato da Aristarco era inferiore alla realtà di un fattore maggiore di 20; il rapporto $TS : TL$ è con grande approssimazione $400 : 1$ e non $19 : 1$. Questa diversità viene dalla misurazione di LTS . In pratica è molto difficile determinare con notevole precisione i centri del Sole e della Luna; inoltre è arduo sapere quando la Luna è esattamente semipiena. Date queste diffi-

Figura 58.

Il Sole grande ma distante e la Luna piú piccola ma molto vicina sottendono sulla superficie della Terra il medesimo angolo.

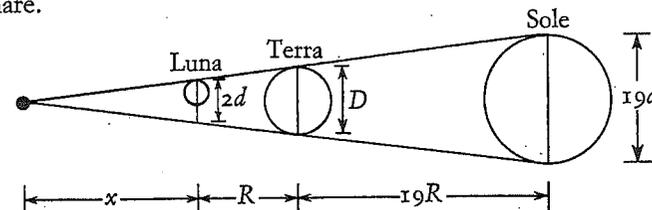


coltà, l'errore di 1° nella determinazione di *LTS* non costituisce un grande errore e il valore trovato da Aristarco è inferiore alla realtà di una quantità addirittura più piccola di 1° . L'angolo dovrebbe essere di $87^\circ 51'$, anziché di 87° . Pare che Aristarco abbia scelto l'angolo più piccolo fra quelli compatibili con le sue incerte osservazioni, presumibilmente per salvaguardare l'attendibilità del rapporto che ne risultava. Considerazioni di questo genere devono avere ispirato i suoi successori, giacché le valutazioni delle distanze relative del Sole e della Luna rimasero troppo piccole durante tutta l'antichità. Le misurazioni precedenti danno soltanto i rapporti delle distanze astronomiche, ma Aristarco, con un'argomentazione estremamente ingegnosa, fu in grado di trasformarle in valori assoluti: egli fu in grado cioè di determinare in stadi il diametro e le distanze del Sole e della Luna. I suoi risultati furono dedotti da osservazioni di un'eclisse lunare di massima durata: un'eclisse durante la quale la Luna giace direttamente sull'eclittica e passa quindi esattamente per il centro dell'ombra della Terra. Egli misurò dapprima il tempo trascorso fra l'istante in cui il bordo della Luna era entrato nell'ombra e l'istante in cui la Luna s'era oscurata totalmente per la prima volta. Poi confrontò questo valore con quello del tempo durante il quale la Luna era rimasta totalmente oscurata e scoprì, in questo modo, che il periodo di oscurità totale aveva all'incirca la stessa durata del periodo necessario alla Luna per entrare nell'ombra della Terra. Ne trasse la conclusione che la larghezza dell'ombra della Terra nella regione dove essa è attraversata dalla Luna è, con grande approssimazione, due volte il diametro della stessa Luna.

La figura 59 illustra la configurazione astronomica presa in esame da Aristarco. Nel disegno la Luna è rappresentata subito

Figura 59.

Il disegno di Aristarco per calcolare le distanze assolute della Luna e del Sole in funzione delle osservazioni fatte durante un'eclisse lunare.



dopo che è entrata interamente nel fascio d'ombra della Terra. Il diametro della Luna è d (un'incognita) e il diametro dell'ombra della Terra in corrispondenza della Luna è quindi $2d$; il diametro della Terra è D (determinato in stadi dalla misurazione fatta da Eratostene della circonferenza della Terra); mentre la distanza dalla Luna alla Terra è R (un'altra incognita che dev'essere determinata). Finalmente, poiché il diametro del Sole e la sua distanza dalla Terra sono esattamente 19 volte quelli della Luna, il diametro del disco del Sole risulta esattamente $19d$ e la sua distanza dalla Terra $19R$. Così il problema di Aristarco, e anche il nostro, è quello di determinare d e R , le dimensioni incognite, in funzione del diametro terrestre D , una grandezza il cui valore in stadi è già stato determinato.

Il disegno pone subito in evidenza la similitudine dei tre triangoli, le cui basi hanno lunghezza $2d$, D e $19d$ e le cui altezze sono rispettivamente x (un'incognita), $x + R$ e $x + 20R$. (In realtà le basi dei tre triangoli sono un pochino più piccole dei diametri ai quali sono state eguagliate, ma se i triangoli risultano molto acuti, come effettivamente sono, questa divergenza è troppo piccola per influire sul risultato). Il rapporto fra base e altezza del triangolo minore deve essere eguale a quello del triangolo maggiore, ossia:

$$x/2d = (x + 20R)/19d$$

Moltiplicando i due termini dell'equazione per $38d$ si ottiene una nuova equazione:

$$19x = 2x + 40R$$

cosicché

$$x = 40R/17$$

In altre parole, l'ombra della Terra si estende al di là della Luna per una lunghezza che è circa 2 volte e $1/3$ la distanza dalla Terra alla Luna.

Considerando il triangolo minore e il triangolo di media grandezza si ottiene un'altra equazione, che ci permette di determinare d . La prima proporzione ci dà:

$$x/2d = (x + R)/D$$

Sostituendo ad x il valore $40R/17$ e moltiplicando entrambi i termini per $17/R$ si ha:

$$20/d = (40 + 17)/D$$

Dall'ultima equazione si ricava

$$d = 20D/57 = 0,35D$$

Vale a dire che il diametro della Luna è di poco maggiore di un terzo del diametro della Terra e, poiché il diametro del Sole è 19 volte quello della Luna, esso deve risultare più di 6 volte e $\frac{2}{3}$ il diametro della Terra.

Poiché D , diametro della Terra, è noto, le dimensioni effettive del Sole e della Luna sono date da questi calcoli. Le loro distanze possono essere determinate da un piccolo calcolo addizionale. Poiché tanto il Sole quanto la Luna sottendono sulla Terra un angolo di $0,5^\circ$, ciascuno potrebbe per 720 volte di seguito essere collocato sulla circonferenza che ha centro nella Terra. La distanza della Luna dalla Terra deve quindi essere il raggio di un cerchio la cui circonferenza è 720 volte il diametro della Luna, che è ora noto, e la distanza del Sole deve risultare 19 volte più grande. Poiché la circonferenza di un cerchio è 2π volte il raggio, la distanza della Luna dalla Terra è poco più di 40 volte il diametro della Terra e la distanza dalla Terra al Sole dovrebbe essere all'incirca 764 volte il diametro della Terra.

I metodi adottati in questi calcoli sono brillanti e rappresentano effettivamente gli sforzi qualitativamente migliori degli scienziati greci, ma i risultati numerici, e in particolare quelli concernenti il Sole, sono costantemente imprecisi a causa dell'errore iniziale nella determinazione della distanza angolare fra il Sole e la mezza Luna. Le misurazioni moderne assegnano al diametro della Luna una lunghezza di poco superiore ad un quarto del diametro della Terra, mentre la sua distanza risulta approssimativamente 30 volte il diametro della Terra ed entrambi questi valori non sono lontani da quelli calcolati da Aristarco. Ma si ritiene oggi che il diametro del Sole sia quasi 110 volte quello della Terra e la distanza del Sole sia circa 12 000 volte il diametro della Terra, valori entrambi assai maggiori di quel che aveva pensato Aristarco. Sebbene nell'antichità alle misurazioni di Aristarco venissero fatte diverse correzioni e sebbene fosse spesso riconosciuta la possibilità dell'esistenza di un notevole errore nelle distanze misurate, tutte le valutazioni antiche e medievali di questa dimensione cosmologica rimasero molto al di sotto della realtà.

Poiché dipende soltanto dalle posizioni relative della Terra, della Luna e del Sole, il procedimento di Aristarco per determinare distanza e dimensione può essere applicato negli universi tolemaico e copernicano con la medesima precisione o imprecisione. Le antiche determinazioni di dimensioni astronomiche non poterono quindi avere nessun ruolo diretto nella rivoluzione copernicana. Ma esse ne ebbero parecchi indiretti,

ognuno dei quali contribuì a consolidare il sistema tolemaico. La possibilità di effettuare misurazioni astronomiche mise in luce la grande fecondità della visione aristotelico-tolemaica dell'universo. Inoltre i risultati delle misurazioni contribuirono a far sembrare reale l'antica cosmologia incrementando gli aspetti concreti da cui la sua struttura era caratterizzata. Infine, e più importante di tutto, la determinazione della distanza della Luna fornì uno strumento di misura astronomico che, durante il Medioevo, fu usato per ottenere una misura indiretta della grandezza dell'intero universo.

Come abbiamo illustrato precedentemente nel capitolo III, i cosmologi medievali fecero spesso le ipotesi che ciascun involucro cristallino avesse uno spessore esattamente sufficiente a contenere l'epiciclo del suo pianeta e che gli involucri, considerati nel loro assieme, fossero inseriti l'uno nell'altro in modo da riempire tutto lo spazio. Adottando queste ipotesi, astronomi matematici furono in grado di determinare le dimensioni relative e lo spessore di tutti gli involucri. Queste dimensioni relative furono poi trasformate in diametri terrestri, in stadi o in miglia, con il metodo usato da Aristarco per determinare la distanza della sfera lunare. Una serie caratteristica delle dimensioni cosmologiche che ne derivarono è stata inclusa nella discussione originale. Essa mette in evidenza la minuziosità con cui l'universo venne esplorato e compreso dagli scienziati precopernicani.