

In questi ultimi tre capitoli noi abbiamo la teoria copernicana del moto: uno schema concettuale che egli ha ideato per invertire le funzioni della Terra e del Sole senza dover abbandonare, nel processo, un universo sostanzialmente aristotelico. Secondo la fisica copernicana, tutta la materia, celeste o terrestre, si aggrega naturalmente in sfere e le sfere quindi ruotano secondo la loro propria natura. Un pezzetto di materia, separato dalla sua posizione naturale, continuerà a ruotare assieme alla sua sfera e, nello stesso tempo, tornerà con moto rettilineo alla sua posizione naturale. È una teoria singolarmente incongruente (come il capitolo VI dimostrerà più in dettaglio) ed è anche relativamente poco originale in ogni sua parte, ad eccezione di quelle più incongruenti. Forse Copernico la riscoprì da solo; ma è un fatto che la maggior parte degli elementi essenziali della sua critica di Aristotele e della sua teoria del moto è possibile trovarli in scrittori scolastici precedenti e particolarmente in D'Oresme. Soltanto quando sono applicati al problema più limitato del D'Oresme, essi risultano più plausibili.

L'insuccesso nel provvedere al moto della Terra un'adeguata base fisica non toglie a Copernico i suoi meriti. Egli non concepì o accettò la teoria del moto terrestre per ragioni tratte dalla fisica. I problemi fisico e cosmologico, trattati così grossolanamente nel libro I, sono opera sua, ma non sono realmente i suoi problemi: probabilmente, se avesse potuto, li avrebbe evitati entrambi. Ma le insufficienze della fisica copernicana illustrano come le conseguenze della sua innovazione astronomica trascendano il problema astronomico da cui l'innovazione era derivata e mostrano in effetti quanto poco lo stesso autore dell'innovazione fosse in grado di assimilare la rivoluzione originata dalla sua opera. La Terra in movimento rappresenta un'anomalia in un classico universo aristotelico, ma l'universo del *De Revolutionibus* è classico in ogni aspetto che Copernico può far apparire compatibile con il moto della Terra. Come dice egli stesso, il moto del Sole è stato semplicemente trasferito alla Terra. Il Sole non è più una stella, ma il corpo centrale unico attorno a cui l'universo è costruito; esso assume le antiche funzioni

della Terra e qualche altra in più. Come scopriremo presto, l'universo copernicano è ancora finito e sfere concentriche, inserite l'una nell'altra, muovono ancora tutti i pianeti, sebbene non possano più essere guidate dalla sfera esterna che si trova ora in quiete. Tutti i moti devono essere composti da circoli; il far muovere la Terra non mette Copernico neppure in grado di fare a meno degli epicicli. La rivoluzione copernicana, come noi la conosciamo, può essere ben difficilmente scoperta nel *De Revolutionibus* e questa è la seconda fondamentale incongruenza del testo.

L'astronomia copernicana. Le due sfere.

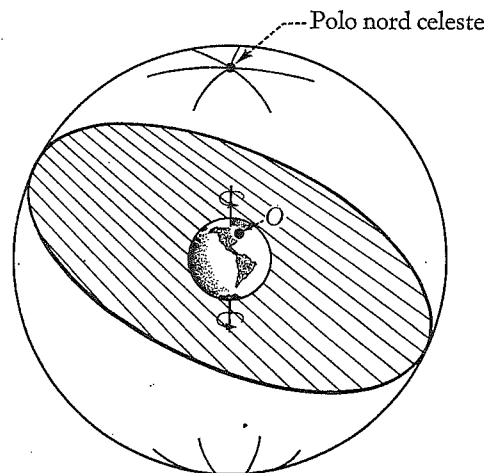
Non abbiamo del tutto finito col libro I di Copernico. Ma i capitoli X e XI, che vengono subito dopo l'ultima parte sopraccitata, si occupano più specificamente di argomenti astronomici e noi li prenderemo in considerazione nel contesto di una discussione astronomica che si estenda oltre le argomentazioni che Copernico rese accessibili ai lettori profani. Torneremo a riferirci brevemente al testo di Copernico in un successivo paragrafo, ma prima cercheremo di scoprire perché quel che Copernico proponeva fece forse più impressione sugli astronomi che sui profani. Cosa che non è evidente in nessun punto, o quasi, del libro I.

Copernico attribuì alla Terra tre moti circolari contemporanei: una rotazione assiale quotidiana, un moto orbitale annuale ed un moto conico annuale dell'asse. La rotazione quotidiana verso oriente è quella che spiega i circoli apparenti quotidianamente tracciati dalle stelle, dal Sole, dalla Luna e dai pianeti. Se la Terra è posta nel centro della sfera delle stelle e compie una rotazione al giorno verso oriente attorno ad un asse passante per i suoi poli nord e sud, allora tutti gli oggetti che son fermi o pressoché fermi rispetto alla sfera delle stelle sembreranno muoversi sull'orizzonte, verso occidente, lungo archi circolari, del tutto simili a quelli lungo cui si vedono muoversi i corpi celesti in qualsiasi breve periodo di tempo.

Se le argomentazioni di Copernico o del D'Oresme a questo proposito risultano oscure, riferiamoci di nuovo al cammino delle stelle illustrato nelle figure 6 e 7. Le tracce di quel cammino potrebbero essere prodotte sia dal moto circolare delle stelle di fronte ad un osservatore fisso (la spiegazione data da Tolomeo), sia dalla rotazione dell'osservatore di fronte alle stelle fisse (la spiegazione di Copernico). Oppure esaminiamo il nuovo universo a due sfere illustrato in figura 26: una copia semplificata dello schema precedentemente disegnato per discutere il moto delle stelle nell'universo a due sfere (fig. 11), con con la differenza che in questa nuova versione sono stati messi in evidenza i poli della Terra, e non quelli della sfera celeste, e il senso della rotazione è stato invertito. Quando abbiamo usato per la prima volta un disegno come questo, avevamo tenuto fermi la Terra, l'osservatore e il piano dell'orizzonte e fatto ruotare in direzione ovest la sfera delle stelle. Adesso dobbiamo tener ferma la sfera esterna e far girare la Terra, l'osservatore e il

Figura 26.

Terra che ruota al centro della sfera stellare fissa. Confrontando il disegno con la figura 11, si noti che in questo caso il piano dell'orizzonte dev'essere fatto girare con la Terra, affinché rimanga immutato il suo rapporto geometrico con l'osservatore *O* che si muove.



piano dell'orizzonte tutti assieme verso oriente. Un osservatore che stia nel centro del piano dell'orizzonte e che si muova con esso non sarà in grado di avvertire alcuna differenza fra i due casi, almeno in base a tutto quello che può vedere nei cieli. In entrambi i casi egli vedrà stelle e pianeti sorgere lungo il margine orientale dell'orizzonte e spostarsi al di sopra del suo capo verso l'orizzonte occidentale con gli stessi percorsi circolari.

Fino a questo punto abbiamo conservato la Terra ruotante nel centro della sfera fissa delle stelle; abbiamo cioè preso in considerazione il modello dell'universo proposto da Eraclide e sviluppato dal D'Oresme. Tuttavia questo è solo il primo passo verso un universo copernicano e il passo successivo risulta più radicale e più difficile. Come Copernico fa rilevare nella parte già citata del capitolo v, se siamo preparati ad ammettere in assoluto la possibilità del moto della Terra, dobbiamo essere preparati a considerare non solo un moto nel centro, ma anche un moto della Terra fuori dal centro. In effetti, afferma Copernico, non è necessario che una Terra che si muove stia nel centro. È necessario soltanto che sia relativamente vicina al centro, e finché è sufficientemente vicina al centro, può muoversi attorno ad esso a volontà senza modificare il moto apparente delle stelle. Questa conclusione era difficile da accettare per i suoi colleghi che avevano una specifica preparazione astronomica, poiché, a differenza del concetto dell'immobilità della Terra che deriva soltanto dal senso comune e dalla fisica terrestre, la nozione della posizione centrale della Terra può essere in apparenza derivata direttamente dall'osservazione astronomica. La concezione copernicana della Terra non centrale parve quindi inizialmente in contrasto con le dirette conseguenze della stessa osservazione astronomica, e fu per evitare questo contrasto, o un contrasto assai simile a questo che prenderemo in considerazione alla fine del prossimo paragrafo, che Copernico fu costretto ad aumentare considerevolmente le dimensioni della sfera delle stelle ed a fare così un primo passo verso la concezione di un universo infinito, elaborata dai suoi successori. La discussione di Copernico sulla posizione della Terra è nel capitolo vi del

suo libro I. Qui abbiamo bisogno di una versione piú chiara e comprensibile.

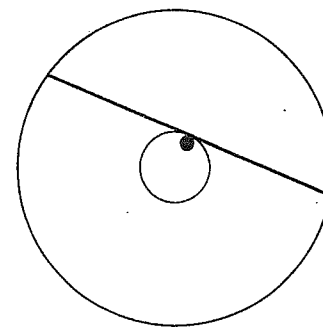
La posizione centrale della Terra, all'interno della sfera delle stelle; può in apparenza esser dedotta dall'osservazione che l'orizzonte di qualsiasi osservatore terrestre biseca la sfera delle stelle. Gli equinozi di primavera e d'autunno sono ad esempio due punti diametralmente opposti sulla sfera delle stelle poiché vengono definiti come le intersezioni di due cerchi massimi della sfera: l'equatore e l'eclittica. L'osservazione mostra che ogniquale volta uno di questi punti sorge esattamente ad est sull'orizzonte, l'altro tramonta esattamente ad ovest. Lo stesso è vero per ogni altra coppia di punti della sfera diametralmente opposti: ogniquale volta uno sorge, l'altro tramonta. In apparenza, queste osservazioni possono essere spiegate soltanto se il piano dell'orizzonte, come è illustrato in figura 26 o nella precedente figura 11, è fatto passare per il centro della sfera delle stelle, cosicché anch'esso taglia la sfera secondo un cerchio massimo. Se e soltanto se il piano dell'orizzonte taglia la sfera delle stelle secondo un cerchio massimo, i punti diametralmente opposti della sfera sorgono e tramontano sempre nello stesso istante.

Ma tutti i piani dell'orizzonte devono essere anche disegnati tangenti alla Terra sferica. (Non abbiamo disegnato questa costruzione nelle figure 26 e 11, solo perché in esse le dimensioni della Terra sono state enormemente esagerate rispetto alla realtà). Pertanto l'osservatore deve trovarsi egli stesso nel centro della sfera delle stelle, o vicinissimo ad esso. Tutta la stessa superficie della sfera terrestre deve essere nel centro o assai vicina ad esso, la Terra dev'essere piccolissima, quasi un punto, e deve avere una posizione centrale. Se, com'è in figura 27, la Terra (rappresentata dal circolo interno concentrico) fosse abbastanza grande rispetto alla sfera delle stelle oppure se la Terra (rappresentata in questo caso dal punto nero) fosse piccola ma spostata rispetto al centro, allora il piano dell'orizzonte non taglierebbe apparentemente a metà la sfera delle stelle, e i punti diametralmente opposti della sfera non sorgerebbero e tramonterebbero assieme.

L'argomentazione stessa, nel modo in cui è stata qui svolta, rende chiaro il punto debole sfruttato da Copernico. L'osservazione non mostra che la Terra dev'essere un punto (se cosí fosse, anche l'universo aristotelico e tolemaico sarebbe in contrasto con l'osservazione) oppure che dev'essere esattamente nel centro, poiché l'osservazione, ad esempio, non potrà dire che l'equinozio di primavera sorge *esattamente* quando tramonta l'equinozio d'autunno. Approssimative osservazioni ad occhio nudo mostreranno che, allorquando l'equinozio di primavera è esattamente al tramonto, l'equinozio d'autunno è già di un grado, o circa, dentro l'orizzonte. Osservazioni ad occhio nudo piú accurate (opportunamente corrette dell'errore dovuto alla rifrazione atmosferica e alle irregolarità di ogni orizzonte reale) potranno mostrare che quando il solstizio d'inverno raggiunge l'orizzonte occidentale, il solstizio d'estate è di 6' (ossia $0,1^\circ$) dentro l'orizzonte orientale. Ma nessuna osservazione ad occhio nudo sarà in grado di fare molto di piú. Potrà mostrare soltanto che, con grande approssimazione, l'orizzonte biseca la sfera e che tutti gli osservatori terrestri devono essere quindi molto vicini al centro dell'universo. Con quanta approssimazione l'orizzonte bisechi la sfera e quanto vicini al centro

Figura 27.

Se il diametro della Terra può essere rapportato in misura apprezzabile al diametro della sfera delle stelle oppure se la Terra, in misura apprezzabile, è spostata dal centro, il piano dell'orizzonte non biseca la sfera stellare.



debbano essere gli osservatori terrestri dipende, in effetti, dal grado di perfezione dell'osservazione.

Ad esempio, se noi dall'osservazione veniamo a sapere che, ogniqualvolta un solstizio giace sull'orizzonte, l'altro ne è fuori di *non più di* $0,1^\circ$, allora nessun osservatore terrestre potrà mai esser distante dal centro della sfera delle stelle più di una distanza pari a $0,001$ il raggio di tale sfera. Oppure se l'osservazione ci dice (e ben poche osservazioni ad occhio nudo sono in grado di arrivare, sia pure approssimativamente, a questo risultato) che, quando un solstizio è sull'orizzonte, l'altro ne è fuori di non più di $0,01^\circ$, allora la sfera interna della figura 27 non può avere un raggio maggiore di $0,0001$ volte il raggio della sfera esterna, e tutta la Terra deve giacere, in ogni istante, dentro la sfera interna. Se la Terra si spostasse fuori del circolo interno, allora il piano dell'orizzonte devierebbe dal piano bisecante la sfera delle stelle più di $0,01^\circ$ e le nostre ipotetiche osservazioni rileverebbero questo divario; ma se la Terra rimane sempre dentro al circolo interno, il piano dell'orizzonte, nei limiti concessi dall'osservazione, sembrerà bisecare la sfera.

Questa è l'argomentazione di Copernico. L'osservazione ci porta soltanto a dover mantenere la Terra interna ad una piccola sfera concentrica con la sfera delle stelle. Dentro questa sfera interna la Terra può muoversi liberamente senza contraddire quel che appare dalle osservazioni. In particolare, la Terra può avere un moto orbitale attorno al centro o attorno al Sole centrale, purché la sua orbita non la porti mai troppo lontano dal centro. E « troppo lontano » significa soltanto: « troppo lontano relativamente al raggio della sfera esterna ». Se è noto il raggio della sfera esterna, allora osservazioni di determinata precisione fissano un limite al raggio *massimo* dell'orbita della Terra. Se è nota la grandezza dell'orbita della Terra (e può, in teoria, esser determinata con la tecnica usata da Aristarco per misurare la distanza fra Sole e Terra), allora osservazioni di determinata perfezione fissano un limite alla grandezza *minima* della sfera delle stelle. Ad esempio: se la distanza fra la Terra e il Sole, come indica la misurazione di Aristarco descritta nell'Ap-

pendice tecnica, è uguale a 764 volte il diametro della Terra (1528 volte il raggio della Terra) e se è noto che le osservazioni hanno un'approssimazione di $0,1^\circ$, allora il raggio della sfera delle stelle deve essere almeno 1000 volte il raggio dell'orbita terrestre ossia almeno 1 528 000 volte il raggio della Terra.

Il nostro esempio è pertinente, perché, anche se le osservazioni fatte da Copernico non arrivano proprio a questo grado di approssimazione, quelle fatte dal suo immediato successore Brahe arrivano ad un grado di approssimazione forse un po' maggiore di $0,1^\circ$. La nostra valutazione della grandezza minima della sfera delle stelle rappresenta la valutazione che poteva esser fatta da un copernicano del secolo XVI. In linea di principio, non v'è nulla di assurdo nel risultato, giacché nei secoli XVI e XVII non c'era alcun modo di determinare direttamente la distanza dalla sfera delle stelle. Il suo raggio avrebbe potuto essere più di 1 500 000 volte il raggio della Terra. Ma se aveva questa grandezza, e il copernicanesimo affermava che l'avesse, allora si doveva riconoscere l'esistenza di una effettiva rottura con la cosmologia tradizionale. Alfarghāni, per esempio, aveva valutato che il raggio della sfera fosse 20 110 volte il raggio della Terra: e cioè più di ventisette volte minore di quel che lo aveva valutato Copernico. L'universo copernicano doveva risultare enormemente più grande di quello della cosmologia tradizionale. Il suo volume è *almeno* 400 000 volte più grande. C'è un'immensa estensione di spazio fra la sfera di Saturno e la sfera delle stelle. La chiara e funzionale coesione delle sfere inserite una dentro l'altra dell'universo tradizionale era stata rotta, sebbene sembri che Copernico non si renda assolutamente conto di questa rottura.

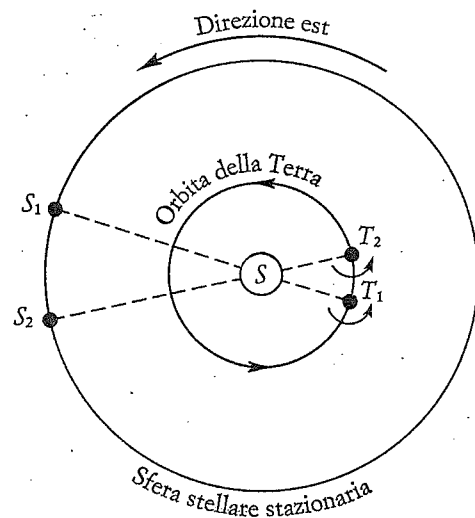
L'astronomia copernicana. Il Sole.

La teoria di Copernico ammette un moto orbitale della Terra in un universo enormemente dilatato, ma l'affermazione non ha valore se non viene dimostrata la compatibilità del moto orbitale con i moti osservati del Sole

e degli altri pianeti. È a questi moti che si dedica Copernico nei capitoli x e xi del suo libro I. Ed è forse meglio cominciare con una diffusa parafrasi del capitolo xi, in cui Copernico descrive il moto orbitale della Terra e prende in considerazione il suo effetto sulla posizione apparente del Sole. Per il momento supponiamo, com'è illustrato in figura 28, che i centri dell'universo, del Sole e dell'orbita della Terra coincidano tutti. Nel disegno, il piano dell'eclittica è visto da una posizione vicina al polo nord celeste; la sfera delle stelle è ferma; la Terra si muove regolarmente nella sua orbita, da ovest ad est, compiendo una rivoluzione all'anno e contemporaneamente compie una rotazione attorno al suo asse, da ovest ad est, ogni 23 ore e 56 minuti primi. Purché l'orbita terrestre sia molto più piccola della sfera delle stelle, la rotazione assiale della Terra darà una spiegazione precisa dei cerchi quotidiani del Sole, della Luna e dei pianeti, come pure di quelli delle stelle; poiché da qualsiasi posizione dell'orbita della Terra tutti questi corpi sono visti necessaria-

Figura 28.

Mentre la Terra, nella sua orbita copernicana, si sposta da T_1 a T_2 , la posizione apparente del Sole centrale S , vista contro la sfera delle stelle, varia da S_1 a S_2 .



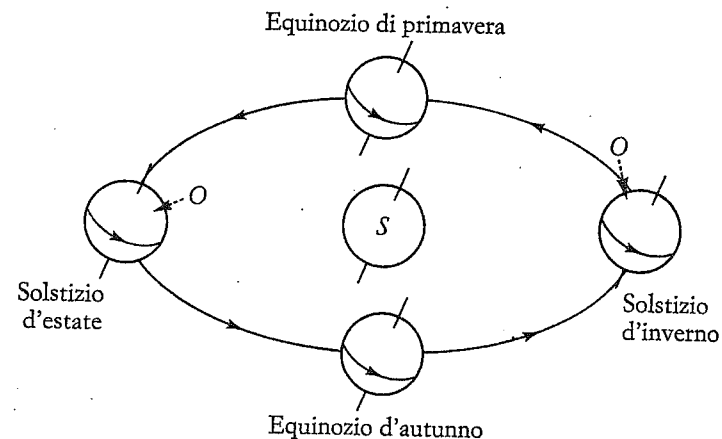
mente contro la sfera delle stelle e sembra necessariamente che si muovano con tale sfera mentre la Terra gira.

Nel disegno, la Terra vien mostrata in due posizioni che essa occupa a distanza di trenta giorni. In ciascuna posizione il Sole è visto contro la sfera delle stelle ed entrambe le posizioni apparenti del Sole giacciono necessariamente sull'eclittica, che viene ora definita come la linea in cui il piano del moto della Terra (piano che comprende il Sole) interseca la sfera. Ma quando la Terra s'è mossa, in direzione est, dalla posizione T_1 alla posizione T_2 del disegno, il Sole si è apparentemente mosso, in direzione est, lungo l'eclittica dalla posizione S_1 alla posizione S_2 . Quindi la teoria di Copernico prevede esattamente lo stesso moto annuale in direzione est del Sole lungo l'eclittica della teoria tolemaica. Prevede inoltre, come vedremo subito, la stessa variazione stagionale dell'altezza del Sole nel cielo.

La figura 29 mostra l'orbita terrestre, com'è vista da un punto della sfera celeste posto leggermente a nord del-

Figura 29.

Il moto annuale della Terra attorno alla sua orbita copernicana. In ogni istante l'asse della Terra si conserva parallelo a se stesso oppure alla linea fissa disegnata attraverso il Sole. Di conseguenza un osservatore O , al mezzogiorno delle medie latitudini nord, trova il Sole molto più approssimativamente sulla sua verticale nel solstizio estivo che in quello invernale.



l'equinozio autunnale. La Terra è disegnata nelle quattro posizioni che essa occupa successivamente nell'equinozio di primavera, nel solstizio d'estate, nell'equinozio autunnale e nel solstizio d'inverno. In tutte queste quattro posizioni, come pure durante il moto, l'asse della Terra si conserva parallelo ad una retta immaginaria passante per il Sole e inclinata di $23^{\circ}30'$ rispetto ad una perpendicolare al piano dell'eclittica. Due piccole frecce mostrano la posizione di un osservatore terrestre situato ad una media latitudine nord, al mezzogiorno locale del 22 giugno e del 22 dicembre, e cioè dei due solstizi. Le linee che vanno dal Sole alla Terra (non tracciate nel disegno) indicano la direzione dei raggi del Sole a mezzogiorno, che si trova evidentemente con maggiore approssimazione sulla verticale dell'osservatore durante il solstizio estivo che durante il solstizio invernale. Uno schema dello stesso tipo determina l'altezza del Sole sull'orizzonte negli equinozi e nelle stagioni intermedie.

La variazione stagionale dell'altezza del Sole sull'orizzonte può quindi essere integralmente prevista in base alla figura 29. In pratica, tuttavia, risulta più semplice tornare alla spiegazione tolemaica. Poiché in ogni stagione il Sole occupa in apparenza la stessa posizione fra le stelle tanto nel sistema copernicano che in quello tolemaico, in entrambi i sistemi dovrà sorgere e tramontare con le medesime stelle. La correlazione esistente fra le stagioni e la posizione del Sole lungo l'eclittica non può essere mutata dal passaggio da un sistema all'altro. Riguardo i moti apparenti del Sole e delle stelle i due sistemi sono equivalenti e il tolemaico risulta più semplice.

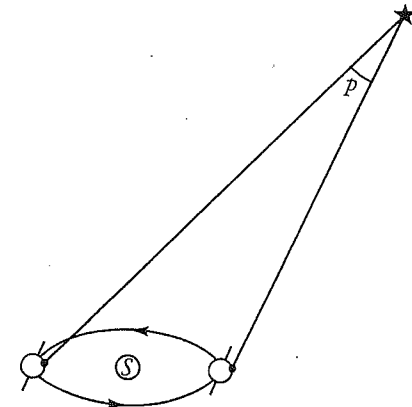
L'ultimo disegno mette in evidenza anche due altre interessanti caratteristiche del sistema di Copernico. Poiché è la rotazione della Terra che genera i circoli quotidiani delle stelle, l'asse della Terra dev'essere diretto verso il centro di questi circoli sulla sfera celeste. Ma, come indica il disegno, dalla fine di un anno alla fine del successivo l'asse della Terra non è mai diretto esattamente verso gli stessi punti della sfera celeste. Secondo la teoria copernicana, il prolungamento ideale dell'asse della Terra traccia, nel corso di un anno, due piccoli circoli sulla sfe-

ra delle stelle: uno attorno al polo nord celeste ed uno attorno al polo sud. Per un osservatore sulla Terra, il centro dei circoli quotidiani delle stelle percorrerebbe in apparenza esso stesso ogni anno un piccolo circolo attorno al polo celeste. Ossia, per esprimere lo stesso particolare con più stretto riferimento all'osservazione, ciascuna stella, nel corso di un anno, modificherebbe leggermente in apparenza la propria posizione sulla sfera delle stelle (oppure in rapporto al polo della sfera che viene osservato).

Questo moto apparente, che non può esser visto ad occhio nudo e che non fu neppur visto coi telescopi fino al 1838, è noto come moto parallattico. Poiché due linee tracciate da due punti diametralmente opposti dell'orbita terrestre ad una stella non risultano esattamente parallele (fig. 30), la posizione angolare apparente della stella, osservata dalla Terra, dovrebbe risultare diversa nelle diverse stagioni. Ma se la distanza dalla Terra alla stella è molto maggiore della distanza fra due punti diametralmente opposti dell'orbita terrestre, allora l'angolo di pa-

Figura 30.

La parallasse annuale di una stella. Poiché la linea fra un osservatore terrestre ed una stella fissa non rimane esattamente parallela a se stessa mentre la Terra si muove lungo la sua orbita, la posizione apparente della stella sulla sfera stellare dovrebbe cambiare di un angolo p nell'arco di sei mesi.



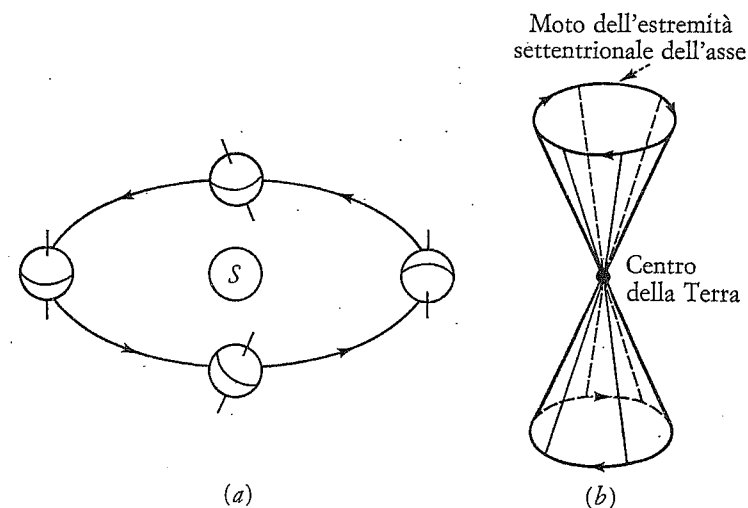
rallasse, p in figura 30, risulterà molto, molto piccolo e la variazione della posizione apparente della stella non sarà apprezzabile. Il moto parallattico non è appariscente solo perché le stelle si trovano ad una distanza enorme in rapporto alle dimensioni dell'orbita della Terra. La situazione equivale esattamente a quella che abbiamo discusso in precedenza quando ci chiedevamo perché il moto della Terra non modificasse apparentemente l'intersezione del piano dell'orizzonte con la sfera delle stelle. In effetti ci stiamo occupando dello stesso problema. Ma questa versione del problema è una versione più importante, poiché vicino all'orizzonte è molto difficile effettuare le misurazioni precise della posizione delle stelle, necessarie per scoprire se l'orizzonte biseca la sfera stellare. A differenza del sorgere e del tramontare degli equinozi, di cui si è discusso prima, le ricerche relative ai moti parallattici non sono necessariamente limitate all'orizzonte. La parallasse fornisce quindi sulla grandezza minima della sfera delle stelle in rapporto alla grandezza dell'orbita terrestre un controllo ricavato dall'osservazione più sensibile di quello fornito dalla posizione dell'orizzonte, e le valutazioni di Copernico sulla grandezza della sfera che abbiamo citato precedentemente avrebbero dovuto in realtà essere ricavate da una discussione sulla parallasse.

La seconda caratteristica posta in evidenza dalle considerazioni che si possono fare sulla figura 29 non concerne i cieli, ma Copernico. Noi abbiamo descritto il moto orbitale illustrato nel disegno come un moto singolo da cui il centro della Terra vien fatto ruotare in cerchio attorno al Sole, mentre il suo asse si conserva sempre parallelo ad una retta fissa passante per il Sole. Copernico descrive lo stesso moto fisico come costituito da due moti matematici contemporanei. Ecco perché egli attribuisce alla Terra un totale di tre moti circolari. E le ragioni addotte in tale descrizione offrono un'altra significativa illustrazione della misura in cui il suo pensiero era vincolato ai modelli tradizionali del pensiero aristotelico. Per lui la Terra è un pianeta che vien fatto ruotare attorno al Sole centrale da una sfera del tutto simile a quella che faceva

ruotare il Sole attorno alla Terra centrale. Se la Terra fosse stabilmente fissata in una sfera, il suo asse non si conserverebbe parallelo alla stessa retta passante attraverso il Sole: sarebbe invece fatto ruotare dalla rotazione della sfera e occuperebbe le posizioni illustrate in figura 31 *a*. Dopo una mezza rivoluzione di 180° della Terra attorno al Sole, l'asse della Terra sarebbe ancora inclinato di $23^\circ 30'$ rispetto alla perpendicolare, ma in direzione simmetrica rispetto a quella che aveva all'inizio del moto. Per annullare questo mutamento di direzione dell'asse, causato dalla rotazione della sfera che porta la Terra, Copernico ritiene necessario un terzo moto circolare attribuito al solo asse della Terra e illustrato in figura 31 *b*. È un moto conico che fa compiere all'estremità settentrionale dell'asse una rotazione all'anno in direzione ovest e compensa così esattamente l'effetto che il moto orbitale ha sull'asse della Terra.

Figura 31.

Il «secondo» e il «terzo» moto di Copernico. Il secondo moto, moto di un pianeta fissato in una sfera che ruota attorno al Sole come centro, è illustrato in (*a*). Questo moto non fa rimanere l'asse della Terra parallelo a se stesso, cosicché non rende necessario il terzo moto conico illustrato in (*b*) per rimettere l'asse in linea.



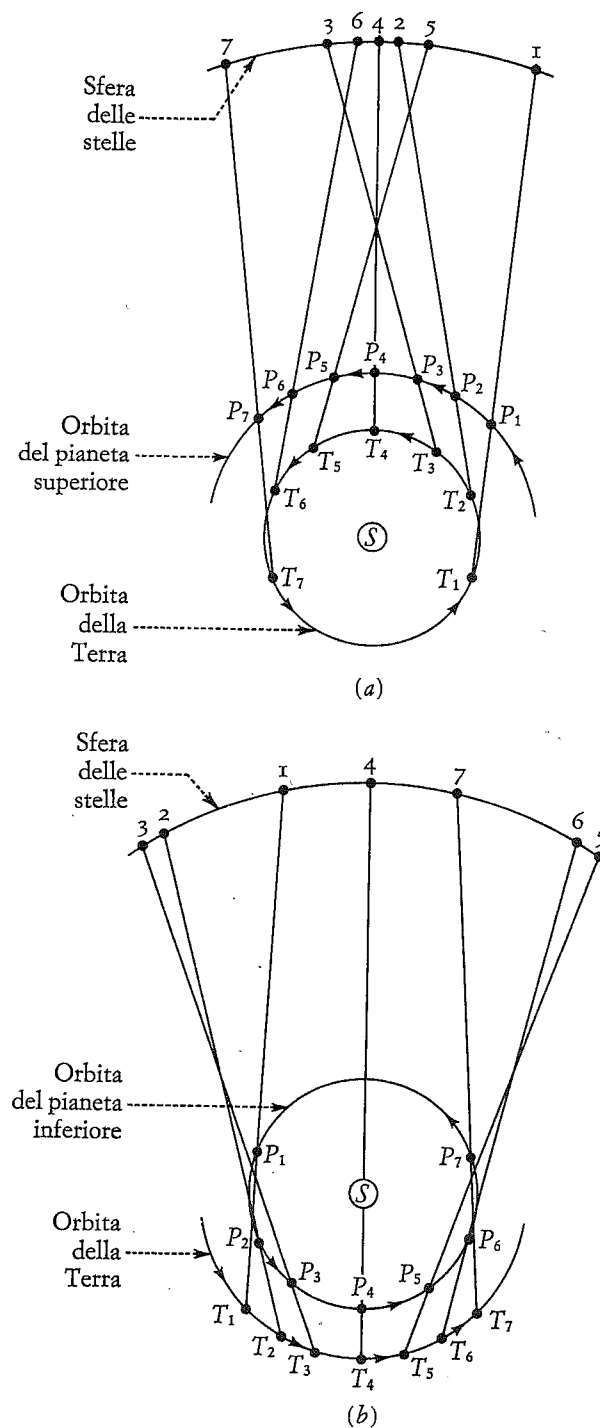
L'astronomia copernicana. I pianeti.

Fino a questo punto, lo schema concettuale sviluppato da Copernico si mostra tanto efficace quanto quello di Tolomeo, ma non lo è sicuramente di più e sembra inoltre molto più complesso. È soltanto quando all'universo di Copernico vengono aggiunti i pianeti che ogni vero fondamento della sua innovazione diventa evidente. Prendiamo ad esempio in considerazione la spiegazione del moto di retrocessione cui Copernico accennava, senza discuterne, alla fine del capitolo v del suo libro I introduttivo. Nel sistema tolemaico il moto di retrocessione viene spiegato disponendo il pianeta su un epiciclo maggiore, il cui centro è, a sua volta, fatto ruotare attorno alla Terra dal deferente del pianeta. La combinazione di questi due moti circolari genera i caratteristici tracciati annodati descritti nel capitolo III. Nel sistema di Copernico non è necessario alcun epiciclo maggiore. Il moto di retrocessione, o moto in direzione ovest, di un pianeta fra le stelle è soltanto un moto apparente, generato, come il moto apparente del Sole attorno all'eclittica, dal moto orbitale della Terra. Secondo Copernico, il moto che Tolomeo aveva spiegato con gli epicicli maggiori era in realtà il moto della Terra, attribuito ai pianeti da osservatori terrestri che si consideravano fermi nello spazio.

Il fondamento dell'idea di Copernico è illustrato e chiarito dalle figure 32 *a* e 32 *b*. Nel primo disegno si vedono le successive posizioni apparenti di un pianeta superiore in movimento, osservato da una Terra in movimento contro lo schermo fisso costituito dalla sfera delle stel-

Figura 32.

La spiegazione data da Copernico al moto di retrocessione dei pianeti superiori (*a*) e dei pianeti inferiori (*b*). In ciascun disegno la Terra si sposta regolarmente sulla sua orbita da T_1 a T_7 ed il pianeta si sposta da P_1 a P_7 . Nel medesimo tempo la posizione apparente del pianeta contro la sfera delle stelle si sposta, in direzione est, da 1 a 7, ma allorché i due pianeti si oltrepassano c'è un breve tratto di retrocessione in direzione ovest da 3 a 5.



le; il secondo disegno mostra le successive posizioni apparenti di un pianeta inferiore. Sono disegnati solo i moti orbitali; la rotazione quotidiana della Terra, che genera l'apparente e veloce movimento in direzione ovest del Sole, dei pianeti e contemporaneamente delle stelle viene trascurata. In entrambi i disegni, le posizioni successive della Terra nella sua orbita circolare centrata sul Sole sono indicate dai punti T_1, T_2, \dots, T_7 ; le corrispondenti posizioni successive dei pianeti sono contrassegnate con P_1, P_2, \dots, P_7 ; e le relative posizioni apparenti del pianeta, determinate dall'intersezione con la sfera stellare di una linea che parte dalla Terra e passa per il pianeta, sono contrassegnate con $1, 2, \dots, 7$. In ciascun caso il pianeta piú centrale si muove nella sua orbita piú velocemente. Un esame del disegno mette in luce che il moto apparente del pianeta fra le stelle è normale (e cioè in direzione est) da 1 a 2 e da 2 a 3; quindi il pianeta sembra retrocedere (e cioè muoversi in direzione ovest) da 3 a 4 e da 4 a 5; ed infine inverte nuovamente la direzione del suo moto e si sposta normalmente da 5 a 6 e da 6 a 7. Mentre la Terra completa il resto della sua orbita, il pianeta prosegue nel suo moto normale e si sposta in direzione est con velocità massima allorquando viene a trovarsi diametralmente opposto alla Terra rispetto al Sole.

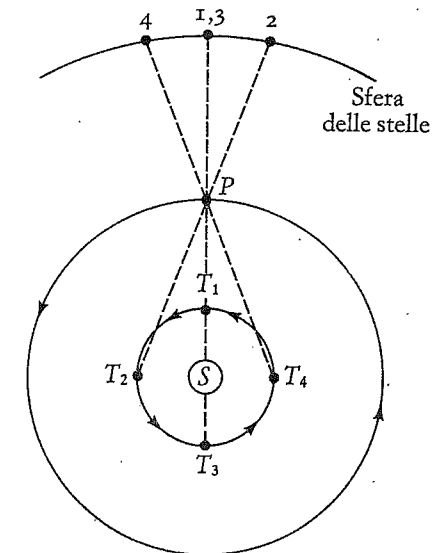
Pertanto, nel sistema di Copernico, i pianeti, osservati dalla Terra, sembrerebbero muoversi in direzione est per la maggior parte del tempo; essi retrocedono soltanto quando la Terra, nel suo piú rapido moto orbitale, li sorpassa (pianeti superiori) oppure quando essi sorpassano la Terra (pianeti inferiori). Il moto di retrocessione può aversi soltanto quando la Terra si trova alla minima distanza dal pianeta, di cui si osserva il moto, e questo concorda con le osservazioni. I pianeti superiori, almeno, presentano la massima lucentezza quando si spostano in direzione ovest. La prima irregolarità piú rilevante del moto planetario è stata spiegata qualitativamente senza far uso di epicicli.

La figura 33 mostra come la proposta di Copernico spieghi una seconda irregolarità di maggior rilievo dei moti planetari: la differenza fra i periodi di tempo neces-

sari ad un pianeta per compiere passaggi successivi attorno all'eclittica. Nel disegno si è ammesso che la Terra compie 1 giro e $1/4$ della sua orbita, mentre il pianeta, in questo caso un pianeta superiore, compie un giro solo della sua. Supponiamo che, all'inizio della serie di osservazioni, la Terra sia in T_1 e il pianeta in P . Il pianeta si trova quindi nel mezzo di una retrocessione ed appare in 1 disegnato contro la sfera fissa delle stelle. Quando il pianeta ha completato una rivoluzione nella sua orbita ed è tornato in P , la Terra ha fatto 1 giro e $1/4$ della sua orbita ed ha raggiunto T_2 . Il pianeta quindi è visto in 2, ad

Figura 33.

La spiegazione data da Copernico alle variazioni del tempo necessario ad un pianeta per completare viaggi successivi attorno all'eclittica. Mentre il pianeta compie un giro della sua orbita da P a P , la Terra effettua una rivoluzione e $1/4$ da T_1 a T_1 e poi a T_2 . In questo intervallo di tempo, la posizione apparente del pianeta fra le stelle si sposta verso est da 1 a 2, poco meno di un giro completo. Durante la successiva rivoluzione del pianeta, la Terra si sposta da T_2 a T_2 e poi a T_3 , cosicché la sua posizione apparente fra le stelle si muove da 2 a 1 e poi di nuovo ad 1, un po' piú di un giro completo dell'eclittica.



occidente della posizione 1 da cui era partito. Non ha ancora completato un giro intero dell'eclittica che richiederà quindi più tempo di quello necessario per compiere un giro dell'orbita.

Mentre il pianeta percorre per la seconda volta la sua orbita, la Terra effettua più di una rivoluzione orbitale e raggiunge T_3 quando il pianeta è ritornato in P . Questa volta il pianeta è visto proiettato in 3, ad est della posizione 2 ed ha completato più di un giro dell'eclittica mentre effettuava un solo giro della sua orbita ed il suo secondo percorso dell'eclittica è stato quindi molto veloce. Dopo una terza rivoluzione, il pianeta si trova nuovamente in P , ma appare nella posizione 4, ad oriente di 3: il percorso dell'eclittica è stato di nuovo veloce. Dopo una quarta rivoluzione lungo la sua orbita, il pianeta appare nuovamente in 1, ad occidente di 4, ed il suo ultimo giro è stato quindi lento. Il pianeta ha completato, nello stesso istante, quattro percorsi della sua orbita e quattro dell'eclittica. Il tempo medio necessario ad un pianeta per percorrere l'eclittica è pertanto identico al periodo orbitale del pianeta. Ma il tempo necessario per un singolo percorso può essere considerevolmente maggiore o considerevolmente minore del tempo medio. Un'argomentazione dello stesso genere spiegherà le irregolarità dello stesso genere del moto di un pianeta inferiore.

Il moto di retrocessione e la variazione del tempo necessario per girare attorno all'eclittica costituiscono due evidenti irregolarità planetarie che, nell'antichità, avevano condotto gli astronomi ad usare epicicli e deferenti per trattare il problema dei pianeti. Il sistema di Copernico spiega queste stesse evidenti irregolarità e lo fa senza ricorrere ad epicicli, o almeno ad epicicli maggiori. Per giungere ad una spiegazione dei moti planetari, sia pure approssimata e qualitativa, Ipparco e Tolomeo avevano dovuto introdurre dodici circoli: uno ciascuno per il Sole e la Luna e due ciascuno per le altre cinque rimanenti « stelle erranti ». Copernico giunse alla medesima spiegazione qualitativa dei moti planetari apparenti con soli sette circoli. Egli ebbe bisogno soltanto di un circolo, centrato sul Sole, per ciascuno dei sei pianeti conosciuti:

Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno, e di un ulteriore circolo, centrato sulla Terra, per la Luna. Ad un astronomo, interessato unicamente ad una spiegazione qualitativa dei moti planetari, il sistema di Copernico doveva sembrare come il più economico.

Ma questa apparente economia del sistema copernicano, sebbene costituisca un successo propagandistico che i sostenitori della nuova astronomia persero raramente l'occasione di mettere in evidenza, è in gran parte illusoria. Non abbiamo ancora cominciato ad occuparci dell'astronomia planetaria di Copernico in tutta la sua complessità. Il sistema dei sette circoli presentato nel libro 1 del *De Revolutionibus* e in molte trattazioni elementari moderne del sistema copernicano è un sistema meravigliosamente economico, ma non funziona: non permette di prevedere la posizione dei pianeti con una precisione paragonabile a quella offerta dal sistema di Tolomeo. Ha una precisione paragonabile a quella di una versione semplificata a dodici circoli del sistema di Tolomeo: Copernico può dare dei moti planetari una spiegazione *qualitativa* più economica di quella di Tolomeo. Ma per giungere ad una spiegazione ragionevolmente accettabile sul piano quantitativo della variazione della posizione dei pianeti, Tolomeo era stato costretto a complicare il sistema fondamentale dei dodici circoli con epicicli minori, eccentrici ed equanti e, per ottenere risultati analoghi dal suo sistema fondamentale di sette circoli, anche Copernico fu costretto ad usare epicicli minori ed eccentrici. Il suo sistema completo risultò solo poco meno macchinoso di quanto non fosse il sistema di Tolomeo. Entrambi impiegavano più di trenta circoli; c'era ben poco da scegliere fra essi in quanto ad economia. Né si poteva fare una distinzione fra i due sistemi sulla base della loro precisione. Quando Copernico ebbe finito di aggiungere circoli, il suo macchinoso sistema centrato sul Sole diede risultati precisi quanto quelli di Tolomeo, ma non diede risultati più precisi. Copernico non risolse il problema dei pianeti.

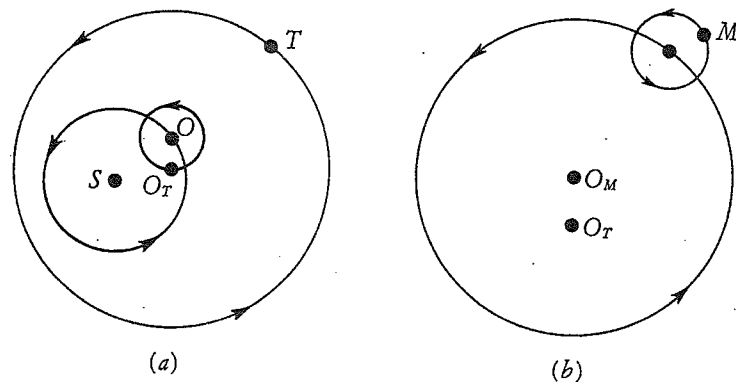
Il sistema copernicano completo viene descritto negli ultimi libri del *De Revolutionibus*. Fortunatamente noi dobbiamo soltanto illustrare che tipo di complessità vi

si sviluppa. Il sistema di Copernico, ad esempio, non era realmente un sistema del tutto centrato sul Sole. Per spiegare la maggior velocità a cui il Sole si sposta durante l'inverno attraverso i segni dello zodiaco Copernico rese eccentrica l'orbita circolare della Terra, spostando il suo centro da quello del Sole. Per spiegare altre irregolarità del moto del Sole, messe in rilievo da osservazioni antiche e del suo tempo, egli assegnò un movimento a questo centro spostato. Il centro dell'eccentrico della Terra fu posto su di un secondo circolo, il cui moto faceva variare continuamente la dimensione e la direzione dell'eccentricità della Terra. Il sistema finale usato per determinare il moto della Terra è rappresentato approssimativamente in figura 34*a*. Nel disegno *S* è il Sole, fisso nello spazio; il punto *O*, che si muove esso stesso lentamente attorno al Sole, è il centro di un circolo che ruota lentamente e porta il centro mobile O_T dell'eccentrico della Terra; *T* rappresenta la Terra.

Complessità di questo tipo furono rese necessarie dall'osservazione dei moti degli altri corpi celesti. Per la Lu-

Figura 34.

La spiegazione data da Copernico del moto della Terra (*a*) e di Marte (*b*). In (*a*) il Sole si trova in *S* e la Terra *T* ruota su di un circolo, il cui centro O_T ruota lentamente attorno ad un punto *O*, il quale a sua volta ruota su di un circolo che ha per centro il Sole. In (*b*) Marte è posto su di un epiciclo che ruota su di un deferente, il cui centro O_M conserva un rapporto geometrico fisso col centro mobile O_T dell'orbita terrestre.



na, Copernico usò un totale di tre circoli: il primo centrato sulla Terra mobile, il secondo centrato sulla circonferenza ruotante del primo e il terzo sulla circonferenza del secondo. Per Marte e la maggior parte degli altri pianeti, egli adottò un sistema molto simile a quello illustrato in figura 34*b*. Il centro dell'orbita di Marte, O_M , è spostato rispetto al centro dell'orbita della Terra, O_T , e si muove con questo; lo stesso pianeta è situato in *M*, non sull'eccentrico ma su di un epiciclo, il quale ruota da ovest ad est nella stessa direzione e con lo stesso periodo dell'eccentrico. Ma le complicazioni non finiscono qui. Altri accorgimenti ancora si resero necessari per giustificare le deviazioni verso nord e verso sud di ciascun pianeta dall'eclittica.

Anche questa succinta schematizzazione del complesso sistema di circoli interdipendenti usato da Copernico per calcolare la posizione dei pianeti evidenzia la terza grande incongruenza del *De Revolutionibus* e il rilevante lato ironico dell'opera fondamentale di Copernico. La prefazione del *De Revolutionibus* si apre con un forte atto di accusa dell'astronomia tolemaica per la sua imprecisione, la sua complessità e la sua incoerenza. Eppure, prima di finire, il testo di Copernico si rende colpevole esattamente delle stesse manchevolezze. Il sistema di Copernico non è né più semplice né più preciso di quello di Tolomeo. E i metodi adottati da Copernico per costruirlo sembrano poco adatti, proprio come i metodi di Tolomeo, a produrre una soluzione unica e coerente del problema dei pianeti. Lo stesso *De Revolutionibus* non è coerente con la sola versione originale superstite del sistema, descritta da Copernico nel primo manoscritto, il *Commentariolus*. Inoltre Copernico non fu in grado di dedurre dalle sue ipotesi una combinazione particolare ed unica di circoli interdipendenti e i suoi successori non lo fecero. Quegli aspetti della tradizione antica che avevano portato Copernico a tentare un'innovazione radicale non vennero eliminati da questa innovazione. Copernico aveva respinto la tradizione tolemaica in forza della sua scoperta che « i matematici sono incoerenti in queste ricerche [astronomiche] » e perché « se le loro ipotesi non fos-

sero ingannevoli, tutte le conclusioni basate su di esse potrebbero essere controllate». Un nuovo Copernico avrebbe potuto ritorcere contro di lui le stesse argomentazioni.

L'armonia del sistema copernicano.

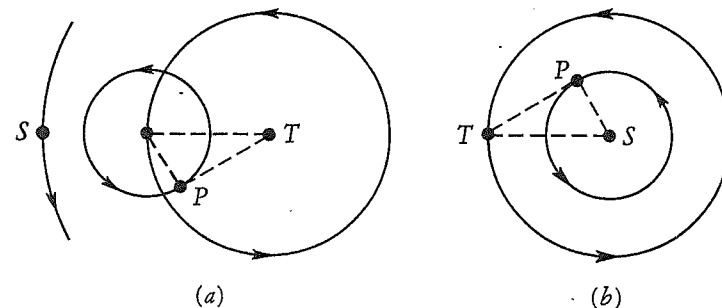
Giudicato sul piano esclusivamente pratico, il nuovo sistema planetario di Copernico fu un insuccesso; non risultò né più preciso né, in misura significativa, più semplice di quelli tolemaici che lo avevano preceduto. Ma, dal punto di vista storico, il nuovo sistema costituì un grande successo; il *De Revolutionibus* convinse in effetti alcuni fra i successori di Copernico che la chiave del problema dei pianeti era in un sistema centrato sul Sole, e questi uomini infine giunsero alla soluzione semplice ed esatta che Copernico aveva cercata. Esamineremo la loro opera nel prossimo capitolo, ma prima dobbiamo cercar di scoprire perché essi diventarono copernicani: in mancanza di una maggiore economia o precisione, che ragioni c'erano per cambiar di posto la Terra e il Sole? La risposta a questa domanda non è facilmente deducibile dai particolari tecnici di cui è pieno il *De Revolutionibus*, poiché, come lo stesso Copernico riconosceva, l'effettiva forza di attrazione dell'astronomia centrata sul Sole era di carattere estetico più che pratico. Per gli astronomi, inizialmente, la scelta fra il sistema di Copernico e quello di Tolomeo poté essere soltanto un fatto di gusto estetico e i fatti di gusto sono i più difficili da definire o da discutere. Eppure, come dimostra la stessa rivoluzione copernicana, essi non sono trascurabili. Chi era sensibile all'armonia geometrica poté scoprire nell'astronomia centrata sul Sole di Copernico una nuova eleganza e coerenza e, se questa eleganza e coerenza non fossero state avvertite, non si sarebbe forse avuta nessuna rivoluzione.

Noi abbiamo già preso in esame uno dei vantaggi estetici del sistema di Copernico. Esso spiega le principali caratteristiche *qualitative* dei moti planetari senza far uso di epicicli. Il moto di retrocessione, in particolare, diven-

ta una conseguenza naturale ed immediata della geometria delle orbite centrate sul Sole. Ma soltanto astronomi che attribuissero maggior importanza all'eleganza qualitativa che alla precisione quantitativa (e ve ne furono alcuni, fra cui Galileo) potevano considerare questo un argomento convincente di fronte al complicato sistema di epicicli ed eccentrici elaborato nel *De Revolutionibus*. Fortunatamente esistevano, a favore del nuovo sistema, altri argomenti meno effimeri. Per esempio: esso offre una spiegazione più semplice e molto più naturale che non quella di Tolomeo dei moti dei pianeti inferiori. Mercurio e Venere non si allontanano mai troppo dal Sole e l'astronomia tolemaica spiega questa osservazione vincolando assieme i deferenti di Mercurio, di Venere e del Sole, cosicché il centro dell'epiciclo di ciascun pianeta inferiore giace sempre su di una linea retta che passa per la Terra e il Sole (fig. 35 a). Questo allineamento dei centri degli epicicli costituisce un espediente « extra », un'aggiunta *ad hoc* alla geometria dell'astronomia a Terra centrale, mentre nel sistema copernicano non c'è alcuna necessità di fare una tale assunzione. Allorquando, come in figura 35 b, l'orbita di un pianeta giace interamente entro l'orbita della Terra, il pianeta non ha mai modo di appa-

Figura 35.

Spiegazione della limitata elongazione dei pianeti inferiori nel sistema tolemaico (a) e nel sistema copernicano (b). Nel sistema tolemaico l'angolo fra il Sole S e il pianeta P deve essere limitato tenendo il centro dell'epiciclo sulla linea che passa per la Terra e il Sole. Nel sistema copernicano, con l'orbita del pianeta interamente contenuta in quella della Terra, non è necessaria alcuna limitazione del genere.



rire lontano dal Sole. Si avrà la massima elongazione quando, come nel disegno, la linea che va dalla Terra al pianeta è tangente all'orbita del pianeta e l'angolo SPT è retto. Pertanto l'angolo di elongazione STP è l'angolo massimo di cui il pianeta inferiore può scostarsi dal Sole. La geometria fondamentale del sistema spiega esaurientemente il modo in cui Mercurio e Venere sono legati al Sole.

La geometria copernicana chiarisce un altro aspetto ancor più importante del comportamento dei pianeti inferiori, e cioè l'ordine delle loro orbite. Nel sistema tolemaico i pianeti erano sistemati in orbite centrate sulla Terra, cosicché la distanza media fra un pianeta e la Terra cresceva proporzionalmente al tempo necessario al pianeta per percorrere l'eclittica. L'espedito funzionava bene per i pianeti superiori e per la Luna; ma Mercurio, Venere e il Sole han bisogno tutti di un anno per un viaggio medio attorno all'eclittica e l'ordine delle loro orbite era quindi sempre stato fonte di discussioni. Nel sistema copernicano non c'è posto per discussioni del genere; non ci son pianeti che abbiano lo stesso periodo orbitale. La Luna è fuori dal problema, perché viaggia attorno alla Terra più che attorno al Sole centrale. I pianeti superiori Marte, Giove e Saturno conservano, attorno al nuovo centro, il loro vecchio ordine, in quanto i loro periodi orbitali sono uguali ai tempi medi di cui essi han bisogno per percorrere l'eclittica. L'orbita della Terra giace internamente a quella di Marte, poiché il periodo orbitale della Terra, un anno, è minore di quello di Marte: 687 giorni. Restano solo da collocare nel sistema Mercurio e Venere: e il loro ordine risulta, per la prima volta, univocamente determinato.

Questo può avvenire nel modo seguente. Si sa che Venere ha un moto di retrocessione ogni 584 giorni; e poiché il moto di retrocessione si può osservare soltanto quando Venere oltrepassa la Terra, 584 giorni dev'essere il periodo di cui Venere ha bisogno per doppiare una volta la Terra nella loro comune rotazione attorno al Sole. Ora, in 584 giorni, la Terra ha percorso la sua orbita $584/365 = 1 + 219/365$ volte. Poiché Venere, in questo

intervallo di tempo, ha doppiato una volta la Terra, deve aver percorso la sua orbita $2 + 219/365 = 949/365$ volte in esattamente 584 giorni. Ma un pianeta che percorre la sua orbita $949/365$ volte in 584 giorni ha necessariamente bisogno di $584 \times (365/949) = 225$ giorni per percorrere una volta la sua orbita. Quindi, poiché il periodo di Venere, 225 giorni, è minore di quello della Terra, l'orbita di Venere dev'essere interna a quella della Terra e non c'è ambiguità. Un calcolo dello stesso tipo colloca l'orbita di Mercurio dentro quella di Venere e alla minima distanza dal Sole. Poiché Mercurio retrocede e quindi doppia la Terra ogni 116 giorni, deve completare la sua orbita $1 + 116/365 = 481/365$ volte in 116 giorni. Pertanto compirà un giro della sua orbita in $116 \times (365/481) = 88$ giorni. Il suo periodo orbitale di 88 giorni è il più breve di tutti e Mercurio è quindi il pianeta più vicino al Sole.

Fin qui noi abbiamo ordinato le orbite planetarie a Sole centrale con lo stesso principio adottato dagli astronomi tolemaici per ordinare le orbite a Terra centrale: i pianeti più lontani dal centro dell'universo impiegano più tempo per compiere il loro giro attorno al centro. L'assunzione che la dimensione dell'orbita aumenti con il periodo orbitale può esser fatta più appropriatamente nel sistema copernicano che in quello tolemaico, ma in entrambi i sistemi essa è inizialmente arbitraria. Sembra naturale che i pianeti debbano comportarsi in questo modo, come le formiche di Vitruvio in una ruota, ma essi non devono necessariamente agire così. Forse l'assunzione è del tutto gratuita e i pianeti, ad eccezione del Sole e della Luna, la cui distanza può esser determinata direttamente, hanno un altro ordine.

Il risultato di questo riordinamento che viene proposto costituisce un'altra differenza molto importante fra i sistemi copernicano e tolemaico: differenza che, come abbiamo visto nella prefazione, lo stesso Copernico pone particolarmente in evidenza. Nel sistema tolemaico il deferente e l'epiciclo di ciascun pianeta possono essere ridotti o allargati a volontà, senza far variare né le dimensioni delle altre orbite planetarie né la posizione in cui il pianeta, osservato da una Terra centrale, appare contro

le stelle. L'ordine delle orbite può essere determinato fissando un rapporto fra dimensione dell'orbita e periodo orbitale. Inoltre le dimensioni relative delle orbite possono essere calcolate con l'aiuto dell'ulteriore assunzione, discussa nel capitolo III, che la distanza minima di un pianeta dalla Terra è esattamente uguale alla distanza massima fra la Terra e il successivo pianeta più interno. Ma, sebbene entrambe queste assunzioni sembrino naturali, non sono necessarie. Il sistema tolemaico era in grado di prevedere per i pianeti le stesse posizioni apparenti senza servirsi né dell'una né dell'altra. Nel sistema tolemaico, quel che si osserva non dipende dall'ordine né dalla dimensione delle orbite planetarie.

Nel sistema copernicano non esiste alcuna libertà del genere. Se tutti i pianeti compiono rivoluzioni attorno al Sole in orbite approssimativamente circolari, allora tanto l'ordine quanto le dimensioni relative delle orbite possono essere determinati direttamente dall'osservazione senza ulteriori assunzioni. Ogni variazione dell'ordine o anche della dimensione relativa delle orbite sconvolgerebbe l'intero sistema. La figura 36a, ad esempio, mostra un pianeta inferiore P , osservato dalla Terra nel momento in cui raggiunge la massima elongazione rispetto al Sole. Si suppone che l'orbita sia circolare e l'angolo SPT deve quindi essere retto allorquando l'angolo di elongazione STP raggiunge il suo valore massimo. Il pianeta, il Sole e la Terra formano un triangolo rettangolo, uno dei cui angoli acuti, STP , può essere misurato direttamente. Ma, se è noto uno degli angoli acuti di un triangolo rettangolo, resta anche determinato il rapporto fra le lunghezze dei lati del triangolo. Di conseguenza, dalla misurazione del valore dell'angolo STP , si può calcolare il rapporto fra il raggio dell'orbita del pianeta inferiore SP e il raggio dell'orbita terrestre ST . Le dimensioni relative dell'orbita terrestre e delle orbite di entrambi i pianeti inferiori possono essere dedotte dall'osservazione.

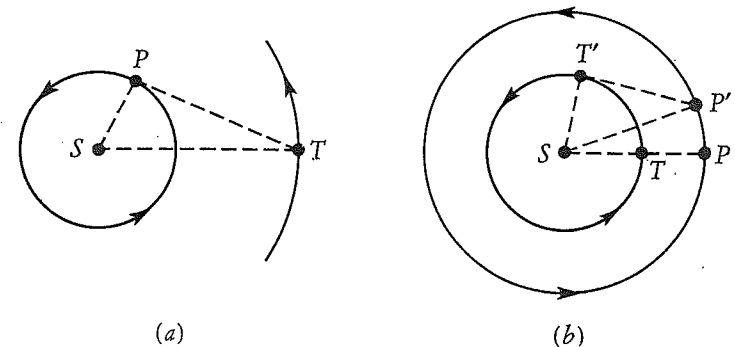
Una determinazione analoga può esser fatta per un pianeta superiore, sebbene i procedimenti siano più complessi. Un procedimento possibile è illustrato in figura 36b. Supponiamo che, in un determinato istante, il Sole,

la Terra e il pianeta giacciono tutti sulla retta STP : in questo orientamento il pianeta si trova diametralmente opposto al Sole, nell'altra parte dell'eclittica e nel mezzo di un moto di retrocessione. Poiché la Terra percorre la sua orbita più velocemente di qualsiasi pianeta superiore, deve esserci un successivo istante di tempo in cui la Terra in T' e il pianeta in P' formeranno col Sole un angolo retto $ST'P'$, e, poiché $ST'P'$ è l'angolo sotto cui il Sole e il pianeta superiore son visti dalla Terra, esso può essere direttamente determinato e può essere misurato il tempo necessario perché esso si formi. Diventa ora possibile calcolare l'angolo TST' , in quanto deve stare a 360° nel medesimo rapporto in cui il tempo impiegato dalla Terra per spostarsi da T a T' sta ai 365 giorni che la Terra impiega per completare la sua orbita. Analogamente possiamo calcolare l'angolo PSP' , poiché il tempo necessario al pianeta per andare da P a P' è lo stesso che la Terra ha impiegato per andare da T a T' . Noti PSP' e TST' , l'angolo $P'ST'$ può essere ricavato per differenza. Abbiamo quindi di nuovo un triangolo rettangolo $ST'P'$ di cui è noto un angolo acuto $P'ST'$ ed è quindi possibile determinare, come per un pianeta inferiore, il rapporto fra il raggio SP' dell'orbita del pianeta ed il raggio ST' dell'orbita terrestre.

Con procedimenti analoghi si possono calcolare le di-

Figura 36.

Determinazione delle dimensioni relative delle orbite nel sistema copernicano per un pianeta inferiore (a) e per un pianeta superiore (b).



stanze da tutti i pianeti in funzione della distanza fra la Terra e il Sole, oppure in funzione di qualsiasi unità, come lo stadio, in cui il raggio dell'orbita terrestre è stato misurato. Ora, per la prima volta, come Copernico afferma nella sua lettera di prefazione, « l'ordine e la grandezza di tutte le stelle e sfere... risultano così collegati che in nessuna loro parte si può spostare alcunché senza generare confusione delle altre parti e del tutto ». Poiché le dimensioni relative delle orbite planetarie sono conseguenza diretta delle prime premesse geometriche dell'astronomia centrata sul Sole, la nuova astronomia, secondo Copernico, possiede una naturalezza ed una coerenza che mancavano nella più antica versione a Terra centrale. La struttura dei cieli può essere dedotta dal sistema di Copernico con un numero minore di assunzioni non essenziali oppure *ad hoc* come la pienezza. Questa è la nuova armonia estetica che Copernico pone in evidenza e illustra con tanto fervore nel capitolo x del suo libro I introduttivo, al quale adesso passiamo, dopo aver prima imparato sul nuovo sistema abbastanza (come i lettori profani di Copernico non avevano fatto) per capire quello di cui egli parla.

Sull'ordine delle sfere celesti. Capitolo X

Mi risulta che nessuno dubiti che il cielo delle stelle fisse sia il più alto fra tutte le cose visibili. Osserviamo che gli antichi filosofi hanno in verità voluto valutare l'ordine dei pianeti in funzione dell'ampiezza delle loro rivoluzioni, avendo considerato che, fra oggetti in movimento a velocità uguale, quelli che son più lontani sembrano muoversi più lentamente, com'è dimostrato nell'*Ottica* di Euclide. Essi pensano quindi che la Luna faccia la sua rivoluzione nel più breve spazio di tempo, in quanto, essendo la più vicina alla Terra, si muove sull'orbita più piccola. Il più alto è invece Saturno, che percorre l'orbita più lunga nel tempo più lungo. Sotto di lui Giove. Dopo Giove Marte. Su Venere poi e su Mercurio si riscontrano opinioni diverse, in quanto non si allontanano di molto dal Sole, come gli altri. Per la qual cosa alcuni li pongono al di sopra del Sole, come il *Timeo* di Platone; altri sotto il Sole, come Tolomeo e buona parte dei moderni. Alpetragio [un astronomo musulmano del secolo XII] colloca Venere al di sopra del Sole e Mercurio

rio al di sotto. Per quelli quindi che seguono l'opinione di Platone e pensano che tutte le stelle (corpi oscuri in genere) risplendano per riflesso della luce solare, queste stelle, se fossero sotto il Sole, data la non grande distanza da esso, sarebbero viste dimezzate o comunque certamente mancanti della loro rotondità. Infatti esse riflettono la luce ricevuta per lo più verso l'alto, vale a dire verso il Sole, come vediamo con la Luna nuova o calante. [Si veda la discussione delle fasi di Venere nel prossimo capitolo. Né questo effetto né l'altro che segue sono avvertibili senza telescopio]. Si dice poi che, per la loro interposizione, il Sole dovrebbe di quando in quando avere un'eclisse e la sua luce dovrebbe venir meno in misura proporzionale alla loro grandezza; poiché questo non accade mai, si pensa che tali pianeti non possano affatto trovarsi sotto il Sole... [Copernico prosegue nel puntualizzare le molte incongruenze delle argomentazioni usate solitamente per determinare l'ordine relativo del Sole e dei pianeti inferiori. Quindi continua:]

E quanto sia poco persuasiva anche quella argomentazione di Tolomeo, per cui il Sole dovrebbe muoversi mediamente fra i corpi che se ne allontanano completamente e quelli che non si allontanano [vale a dire fra i pianeti superiori che possono assumere qualsiasi angolo di elongazione e quelli inferiori la cui elongazione massima è limitata], risulta dal fatto che la Luna, se si allontana completamente, ne svela la falsità. E quale motivo addurranno coloro che pongono Venere sotto il Sole e poi Mercurio, oppure in un altro ordine, per sostenere che non percorrono anch'essi orbite separate, distinte da quella del Sole, come tutti gli altri pianeti [i cui deferenti non sono vincolati a quello del Sole], anche se il concetto di velocità e lentezza non contraddice il loro ordine? Sia dunque che la Terra non costituisca il centro a cui poter riferire l'ordine dei pianeti e delle sfere, sia che non esista una sicura ragione di quest'ordine, non si vede perché si debba attribuire una posizione più alta a Saturno piuttostoché a Giove o ad un altro pianeta. Per la qual cosa io penso che non sia affatto da disprezzare quello che Marziano Capella [un enciclopedista romano del secolo V che scrisse una teoria dei pianeti inferiori, ispirata probabilmente soprattutto da Eraclide], ed alcuni altri latini mostrarono di conoscere bene. Ritengono essi infatti che Venere e Mercurio ruotino attorno al Sole che fa da centro e, per tale motivo, pensano che non se ne allontanino più di quel che lo permetta la convessità delle loro sfere, giacché

non girano attorno alla Terra come gli altri, ma hanno orbite rivoltate. Che cos'altro vogliono dunque dire se non che il centro delle loro sfere è vicino al Sole? Così certamente l'orbita di Mercurio è interna a quella di Venere che si ammette sia maggiore di più del doppio... Fatta questa assunzione, se riportiamo anche Saturno, Giove e Marte a quel medesimo centro, purché si consideri la dimensione delle loro orbite tanto grande da poter contenere e circondare, con Venere e Mercurio, anche la Terra, non si sbaglierà... È noto infatti che questi pianeti [più esterni] sono più vicini alla Terra sempre nel tempo del loro sorgere vespertino, vale a dire quando sono in opposizione al Sole e la Terra si trova fra essi ed il Sole, sono invece a massima distanza dalla Terra durante il tramonto serale, quando sono occultati dal Sole, il quale si trova evidentemente fra essi e la Terra. Queste osservazioni provano che il loro centro è più pertinente al Sole ed è il medesimo centro a cui anche Venere e Mercurio riportano le loro rivoluzioni.

[Le osservazioni di Copernico in effetti non « provano » una cosa. Il sistema tolemaico spiega questi fenomeni esaurientemente come il copernicano, ma la spiegazione copernicana è molto più naturale poiché, come la spiegazione data da Copernico alla limitazione delle elongazioni dei pianeti inferiori, dipende soltanto dalla geometria di un sistema astronomico centrato sul Sole e non sui particolari periodi orbitali attribuiti ai pianeti. Le osservazioni di Copernico risultano chiare se ci riferiamo alla figura 32a. Un pianeta superiore retrocede quando la Terra lo oltrepassa ed in questa circostanza esso deve trovarsi contemporaneamente a minima distanza dalla Terra e di fronte al Sole dall'altra parte dell'eclittica. Nel sistema tolemaico, un pianeta superiore che retrocede deve essere più vicino alla Terra che in qualsiasi altro istante ed è anche in effetti di fronte al Sole dall'altra parte del cielo. Ma si trova di fronte al Sole dall'altra parte del cielo soltanto perché le velocità di rotazione del suo deferente ed epiciclo fanno sì che il pianeta torni ad essere in opposizione al Sole ogniqualvolta l'epiciclo riporta il pianeta vicino alla Terra centrale. Se nel sistema tolemaico il periodo dell'epiciclo o del deferente fossero, sia pure di poco, quantitativamente diversi, allora non si verificherebbe, sul piano qualitativo, quella regolarità che porta un pianeta superiore in retrocessione ad essere di fronte al Sole dall'altra parte del cielo. Nel sistema copernicano ciò deve verificarsi indipendentemente dalle particolari ve-

locità con cui i pianeti girano nelle loro orbite]. Ma essendo tutte queste [sfere] dipendenti da un solo centro, è necessario che lo spazio fra la parte convessa della sfera di Venere e quella concava di Marte sia pure visto, in entrambe le superfici, come una sfera concentrica con le altre, in grado di accogliere la Terra con il suo satellite, la Luna, e tutto ciò che è contenuto entro la sfera lunare. Non possiamo infatti, per nessun motivo, separare dalla Terra la Luna, che si trova senza dubbio a minima distanza dalla Terra: soprattutto poiché in quello spazio troviamo per essa un posto sufficientemente ampio e adatto. Non ci vergogniamo quindi di sostenere che tutto ciò che la Luna circonda e il centro della Terra si muovono attorno al Sole con un moto annuale di rivoluzione in una grande orbita fra gli altri pianeti e che il centro del mondo si trova vicino al Sole; e che, rimanendo il Sole fermo, qualsiasi apparente moto del Sole può esser meglio spiegato con il moto della Terra. È tanto grande, in verità, l'universo che la distanza fra la Terra e il Sole, sebbene, paragonandola ad ogni altra orbita planetaria, abbia dimensioni abbastanza rilevanti in rapporto alle dimensioni di queste orbite, diventa irrilevante se la paragoniamo alla grandezza della sfera delle stelle fisse. Ed io ritengo sia più facile credere questo che non confondere le idee con una quasi infinita moltitudine di sfere, come son costretti a fare coloro che han conservato la Terra nel centro dell'universo. Bisogna invece seguire l'intelligenza della natura, la quale, come ha assolutamente evitato di produrre alcunché di superfluo o inutile, così ha invece spesso dotato una sola causa di molti effetti. Sebbene queste affermazioni siano difficili e quasi impensabili e certamente contrarie all'opinione di molti, le renderemo tuttavia in seguito più chiare della stessa luce del Sole: almeno per coloro che non ignorano la matematica.

Tenendo ben presente questa prima argomentazione (nessuno infatti ne potrà addurre una migliore) che il valore del periodo sia proporzionale alle dimensioni delle sfere, ne conseguirà l'ordine naturale delle sfere, che avrà inizio dall'alto verso il basso.

La prima e la più alta di tutte è la sfera delle stelle fisse, che contiene se stessa e ogni altra cosa, e pertanto è immobile; il luogo dunque dell'universo, a cui si devono riferire il moto e la posizione di tutti gli altri astri... Segue, primo fra i pianeti, Saturno, che completa un circuito di rivoluzione in trent'anni. Poi Giove, che compie una rivoluzione

ogni dodici anni. Quindi Marte che ruota in un biennio. Al quarto posto viene la rivoluzione annua [della sfera] in cui, come si è detto, è contenuta la Terra con la sfera della Luna, come se fosse un epiciclo. Al quinto posto Venere, il cui ciclo dura nove mesi. Occupa infine il sesto posto Mercurio, il quale compie la sua rivoluzione nello spazio di 80 giorni. E in mezzo a tutto sta il Sole. [*In medio vero omnium residet Sol*]. Chi infatti, in tale splendido tempio, disporrebbe questa lampada in un altro posto o in un posto migliore, da cui poter illuminare contemporaneamente ogni cosa? Non a sproposito quindi taluni lo chiamano lucerna del mondo, altri mente, altri regolatore. Trismegisto lo definisce il dio visibile, l'Elettra di Sofocle colui che vede tutte le cose. Così il Sole, sedendo in verità come su un trono regale, governa la famiglia degli astri che gli fa corona. In tal modo la Terra non è affatto privata dei servizi della Luna; ma, come dice Aristotele nel suo *Degli animali* [*Della generazione degli animali*], la Luna ha con la Terra il rapporto più stretto. Nello stesso tempo la Terra concepisce dal Sole e si impregna di un nuovo essere all'anno. Troviamo così, sotto quest'ordine, un'ammirevole simmetria dell'universo ed un nesso sicuro fra l'armonia del moto e la grandezza delle sfere, quale non può trovarsi in nessun altro modo. Qui infatti chi osservi attentamente può rendersi conto perché gli avanzamenti e le retrocessioni appaiano maggiori in Giove che in Saturno e minori che in Marte, e di nuovo maggiori in Venere che in Mercurio [uno sguardo alla figura 32 mostrerà che, quanto più vicina l'orbita di un pianeta si trova all'orbita della Terra, tanto maggiore dev'essere l'apparente moto di retrocessione di quel pianeta: un'ulteriore armonia del sistema di Copernico]; e perché tale oscillazione appaia più frequentemente in Saturno che in Giove, ma più raramente in Marte e Venere che in Mercurio [la Terra doppierebbe un pianeta superiore che si muova lentamente con maggior frequenza che non un pianeta veloce, e viceversa per un pianeta inferiore]; soprattutto perché Saturno, Giove e Marte siano più vicini alla Terra quando sorgono al tramontar del Sole che quando sono nascosti in esso oppure riemergono dai suoi raggi. Particolarmente Marte, quando diventa visibile tutta la notte [ed è quindi in opposizione], sembra eguagliare in grandezza Giove, essendo diverso soltanto per il colore rosso acceso; laddove esso a malapena si ritrova fra le stelle di seconda grandezza, riconoscibile soltanto da chi lo segue con attenta osservazione. Tutti que-

sti fenomeni sono effetti di una stessa causa, che è nel moto della Terra. Che poi nessuno di questi fenomeni compaia nelle stelle fisse prova la loro immensa altezza, la quale fa sì che l'orbita del moto annuale [apparente] o la sua immagine [parallattica] sia invisibile agli occhi; poiché ogni cosa visibile ha una certa distanza al di là della quale non può più esser vista, come si dimostra nell'ottica. Che infatti dal più alto dei pianeti alla sfera delle stelle ci sia ancora una grande distanza, lo dimostra il loro scintillare [giacché se le stelle fossero molto vicine a Saturno, brillerebbero come Saturno]. Da questa caratteristica le stelle si distinguono fondamentalmente dai pianeti, poiché doveva esserci una grandissima differenza fra corpi in moto e corpi immobili. Tanto grande è certamente quest'opera divina del perfetto creatore supremo. [*Tanta nimirum est divina haec Optimi Maximifabrica*].

Per tutto questo capitolo x, di fondamentale importanza, l'accento di Copernico cade sull'«ammirevole simmetria» e sul «chiaro legame armonico del moto e della grandezza delle sfere» che una geometria a Sole centrale dà all'aspetto dei cieli. Se il Sole è il centro, un pianeta inferiore non può mai apparire lontano dal Sole; se il Sole è il centro, un pianeta superiore deve essere in opposizione al Sole quando si trova alla distanza minima dalla Terra, e così via. È con argomentazioni come queste che Copernico cerca di convincere i suoi contemporanei della validità della sua nuova impostazione. Ogni argomentazione cita un aspetto particolare di quel che si osserva nei cieli, che può essere spiegato *sia* dal sistema tolemaico *sia* da quello copernicano, e successivamente mette in rilievo quanto più armoniosa, coerente e naturale risulti la spiegazione copernicana. Sono molte le argomentazioni di questo genere. Il complesso di prove che quest'armonia può offrire o colpisce emotivamente o non ha alcun valore.

E può benissimo non avere alcun valore. L'«armonia» è un fondamento piuttosto strano su cui basare una dimostrazione del moto della Terra, soprattutto quando questa armonia è così offuscata dalla complessa moltitudine di circoli che compongono il sistema copernicano

completo. Le argomentazioni di Copernico non hanno valore pratico. Fanno appello, semmai, non al senso utilitaristico dell'astronomo professionista ma al suo senso estetico e soltanto a questo. Esse non esercitarono alcuna attrazione sui profani, i quali, anche quando capivano i concetti, non avevano alcuna voglia di cercare in secondarie armonie celesti il surrogato di una grande disarmonia terrestre. Né esercitarono, necessariamente, alcuna attrazione sugli astronomi, poiché le armonie su cui puntavano le argomentazioni copernicane non mettevano l'astronomo in grado di far meglio il suo lavoro. Le nuove armonie non miglioravano né la precisione né la semplicità. Esse avrebbero quindi potuto far presa, e in effetti la fecero, soprattutto su quel ristretto e forse irrazionale sottogruppo di astronomi matematici, la cui sensibilità neoplatonica per le armonie matematiche non fu spenta da quella successione di pagine piene di complicati procedimenti matematici che arrivavano infine a previsioni quantitative ben poco migliori rispetto a quelle di cui essi erano già a conoscenza. Fortunatamente, come vedremo nel prossimo capitolo, qualcuno di questi astronomi ci fu. Anche la loro opera costituisce una componente essenziale della rivoluzione copernicana.

Rivoluzione per gradi.

Copernico viene spesso definito come il primo astronomo moderno, in quanto fu il primo a sviluppare integralmente un sistema fondato sul moto della Terra. Ma, come dimostra il testo del *De Revolutionibus*, altrettanto opportunamente lo si potrebbe definire come l'ultimo grande astronomo tolemaico. L'astronomia tolemaica era molto di più di un'astronomia basata unicamente sull'immobilità della Terra ed è soltanto in funzione della posizione e del moto della Terra che Copernico rompe con la tradizione tolemaica. La struttura cosmologica, in cui fu inserita la sua astronomia, la sua fisica terrestre e celeste e perfino gli accorgimenti matematici che egli usò per far sì che il suo sistema potesse fornire previsioni adeguate

alla realtà appartengono tutti alla tradizione che gli scienziati antichi e medievali avevano costruito.

Sebbene gli storici si siano di tanto in tanto affannati a stabilire se Copernico sia in effetti l'ultimo degli astronomi antichi oppure il primo dei moderni, la discussione è assurda in linea di principio. Copernico non è un astronomo né antico né moderno, ma piuttosto un astronomo rinascimentale nella cui opera le due tradizioni si fondono. Chiedersi se la sua opera sia in effetti antica o moderna è un po' come chiedersi se, in una strada, la curva fra due rettilinei appartiene al tratto di strada che precede la curva oppure a quello che viene dopo. Dalla curva si possono vedere entrambi i tratti e la continuità della strada è evidente. Tuttavia, vista da un punto che precede la curva, la strada sembra proseguire dritta fino alla curva e poi scomparire, e la curva sembra l'ultimo punto di una strada rettilinea. Vista invece da un punto del tratto successivo, dopo la curva, la strada sembra aver inizio nella curva stessa, da cui poi prosegue rettilinea. La curva appartiene, in ugual misura, a entrambi i tratti, oppure non appartiene a nessuno dei due. Essa contrassegna una svolta della direzione d'avanzamento della strada, così come il *De Revolutionibus* rappresenta un cambiamento di direzione nello sviluppo del pensiero astronomico.

Fino a questo punto del capitolo, abbiamo messo in rilievo soprattutto i legami esistenti fra il *De Revolutionibus* e la precedente tradizione astronomica e cosmologica. Abbiamo invece trascurato, come lo stesso Copernico fa, la portata dell'innovazione copernicana, in quanto siamo stati impegnati a renderci conto come un'innovazione potenzialmente rivoluzionaria potesse essere generata dalla tradizione stessa che avrebbe dovuto infine essere distrutta. Tuttavia, come scopriremo presto, questa non è la sola prospettiva possibile da cui esaminare il *De Revolutionibus* e non è la prospettiva adottata dalla maggior parte dei copernicani posteriori. Per i seguaci di Copernico dei secoli XVI e XVII, l'importanza fondamentale del *De Revolutionibus* deriva dal suo solo concetto innovatore, la Terra planetaria, e dalle conseguenze astronomiche innovative, le nuove armonie che egli aveva tratto da quel

concetto. Per essi il copernicanesimo significava il triplice moto della Terra e solo questo, inizialmente. Le concezioni tradizionali di cui Copernico aveva rivestito la sua innovazione non erano, per i suoi seguaci, elementi essenziali della sua opera, semplicemente perché, come elementi tradizionali, non costituivano un contributo originale di Copernico alla scienza. E non fu per questi elementi tradizionali che gli uomini si trovarono in contrasto sul *De Revolutionibus*.

Ecco dunque perché il *De Revolutionibus* poté essere il punto di partenza di una nuova tradizione astronomica e cosmologica e, nello stesso tempo, il culmine di una tradizione antica. Coloro che Copernico riuscì a convertire all'idea di una Terra in movimento iniziarono la loro opera di ricerca dal punto in cui Copernico s'era fermato. Il loro punto di partenza fu il moto della Terra, che costituì tutto quello che essi presero necessariamente da Copernico, e i problemi cui si dedicarono non furono quelli della vecchia astronomia che avevano impegnato Copernico ma i problemi della nuova astronomia a Sole centrale che scoprirono nel *De Revolutionibus*. Copernico pose loro tutta una serie di problemi che né lui né i suoi predecessori avevano dovuto affrontare. Nella ricerca delle soluzioni di questi problemi la rivoluzione copernicana fu completata, e venne fondata una nuova tradizione astronomica derivante dal *De Revolutionibus*. L'astronomia moderna si rivolge al *De Revolutionibus* come Copernico si era rivolto a Ipparco e a Tolomeo.

Gli sconvolgimenti di maggiore importanza nei concetti fondamentali della scienza si verificano per gradi. L'opera di un individuo singolo può avere un ruolo preminente in una rivoluzione concettuale del genere; ma se raggiunge questa preminenza, ciò accade o perché, come il *De Revolutionibus*, l'opera dà inizio alla rivoluzione con una piccola innovazione che pone alla scienza nuovi problemi, oppure perché, come i *Principia* di Newton, essa porta a termine la rivoluzione integrando concetti derivati da molte fonti. La portata dell'innovazione cui un individuo può dar origine è necessariamente limitata, poiché ciascun individuo è costretto ad impiegare nella sua

ricerca gli strumenti che gli sono forniti da una formazione tradizionale e che egli non può sostituire completamente nell'arco della sua vita. Sembra quindi che molti principî del *De Revolutionibus* che, nelle parti precedenti di questo capitolo, noi abbiamo considerato delle incongruenze, in realtà non lo siano affatto. Il *De Revolutionibus* può sembrare incongruente solo a chi si attende di trovare l'intera rivoluzione copernicana nell'opera che a tale rivoluzione dà il nome, e tale attesa deriva da un'eredità conoscenza del modo in cui si formano i nuovi paradigmi del pensiero scientifico. I limiti del *De Revolutionibus* possono esser meglio considerati come caratteristiche, essenziali e tipiche, di ogni opera rivoluzionaria.

La maggior parte delle evidenti incongruenze del *De Revolutionibus* sono il riflesso della personalità del suo autore, e la personalità di Copernico sembra assolutamente appropriata al suo ruolo vitale nello sviluppo dell'astronomia. Copernico era uno specialista impegnato. Apparteneva alla rinata tradizione ellenistica che dava rilievo al problema matematico dei pianeti a spese della cosmologia. Per i suoi predecessori ellenistici l'incongruenza fisica degli epicicli non aveva costituito un inconveniente notevole del sistema tolemaico, e Copernico mostrò di avere la stessa indifferenza per l'aspetto cosmologico del problema quando non giunse ad avvertire le incongruenze che una Terra in movimento creava, in un universo per altri lati tradizionale. Per lui, l'aspetto matematico e celeste aveva la preminenza; egli portava dei paraocchi che concentravano il suo sguardo sulle armonie matematiche dei cieli. Per tutti quelli che non dividevano la sua particolare prospettiva, la visione che Copernico aveva dell'universo era ristretta e il suo senso dei valori deformato.

Ma un interesse esagerato per i cieli e un senso dei valori deformato sono forse caratteristiche essenziali dell'uomo che diede inizio alla rivoluzione in campo astronomico e cosmologico. I paraocchi che limitavano ai cieli l'apertura del suo sguardo furono forse utili. Per questa limitazione egli era talmente scosso da differenze di pochi gradi nelle previsioni astronomiche che, nel desiderio di

comporle, finì per abbracciare un'eresia cosmologica: il moto della Terra. A causa di essa, la sua sensibilità per l'armonia geometrica era così forte da farlo aderire a questa eresia soltanto per l'armonia e anche se essa non era riuscita a risolvere il problema per il quale egli vi si era accostato. Inoltre questi paraocchi lo aiutarono a non avvertire le conseguenze che la sua innovazione poteva avere al di fuori del campo astronomico: conseguenze che condussero uomini di apertura mentale meno ristretta a respingerla come assurda.

Ma, soprattutto, l'interesse di Copernico per i moti celesti fu la causa della particolare diligenza con cui egli studiò le conseguenze matematiche del moto della Terra e le adattò ad una già esistente scienza dei cieli. Questo dettagliato studio tecnico costituisce l'effettivo contributo di Copernico. Tanto prima quanto dopo Copernico vi furono altri cosmologi più radicali, i quali a gran colpi di pennello abbozzarono il disegno di un universo infinito e popolato in molte sue parti. Ma nessuno di essi scrisse qualcosa di simile agli ultimi libri del *De Revolutionibus*, e sono proprio questi libri che, mostrando per la prima volta come il lavoro dell'astronomo potesse esser fatto, e fatto più armoniosamente, da una Terra in movimento, fornirono una solida base da cui far partire una nuova tradizione astronomica. Se il primo libro cosmologico di Copernico fosse apparso da solo, la rivoluzione copernicana sarebbe stata conosciuta col nome di qualcun altro.

Capitolo sesto

L'assimilazione dell'astronomia copernicana

La fortuna dell'opera di Copernico.

Copernico morì nel 1543, l'anno stesso in cui fu pubblicato il *De Revolutionibus*, e la tradizione racconta che egli ricevette la prima copia a stampa dell'opera che lo aveva impegnato tutta la vita sul letto di morte. Il libro dovette quindi combattere le sue battaglie senza poter contare sull'ulteriore aiuto dell'autore. Ma per quelle battaglie Copernico aveva fabbricato un'arma pressoché ideale. Egli infatti aveva scritto il libro in modo che risultasse incomprensibile a tutti fuorché agli astronomi eruditi del suo tempo. Al di fuori del loro mondo, il *De Revolutionibus* sollevò inizialmente ben poco fermento. Quando poi cominciò a svilupparsi la massiccia opposizione laica ed ecclesiastica, gran parte dei più eminenti astronomi europei, ai quali era indirizzato il libro, avevano già trovato che non si poteva fare a meno dell'uno o dell'altro procedimento matematico di Copernico. Risultò quindi impossibile sopprimere completamente l'opera, tanto più che si trattava di un libro stampato e non di un manoscritto, com'era stato invece il caso dell'opera di Nicola di Oresme e Buridano. Fosse o non fosse nelle intenzioni del suo autore, la vittoria finale del *De Revolutionibus* fu ottenuta per infiltrazione.

Infatti già da vent'anni prima della pubblicazione della sua opera principale, Copernico era riconosciuto da tutti uno fra i più eminenti astronomi d'Europa. Informazioni sui suoi lavori di ricerca, concernenti anche la sua nuova ipotesi, erano cominciate a circolare all'incirca dal 1515. L'uscita del *De Revolutionibus* era vivamente attesa. Quando apparve il libro, i contemporanei poterono mani-