



MARGHERITA HACK
RACCONTA

**TOLOMEO E COPERNICO.
DALLE STELLE LA MISURA
DELL'UOMO**

LA BIBLIOTECA DI REPUBBLICA

Le stelle hanno rappresentato un mondo misterioso e ci sono voluti secoli e secoli per riuscire ad avere un'idea della loro distanza, a iniziare a comprendere la differenza fra stelle e pianeti e interpretarne i moti [...]

Margherita Hack

CAPIRE LA SCIENZA
La scienza raccontata dagli scienziati

3

3 - CAPIRE LA SCIENZA La scienza raccontata dagli scienziati Tolomeo e Copernico. Dalle stelle la misura dell'uomo

«MARGHERITA HACK racconta Tolomeo e Copernico. Dalle stelle la misura dell'uomo» e «IN SINTESI di Piergiorgio Odifreddi» sono tratti dalla collana in DVD «BEAUTIFUL MINDS».

Publicati su licenza di Digital E s.r.l., Torino

Il brano di Tolomeo «L'universo a due sfere» è tratto da F. Franco Repellini, *Cosmologie greche*

© 1980, Loescher, Torino

Il brano di Copernico «La dedica del *De revolutionibus*» è tratto da N. Copernico, *De revolutionibus orbium caelestium*, a cura di A. Koyré

© 1975, Einaudi, Torino

Gli apparati dei testi della sezione di approfondimento sono tratti da:

E. Berti, C. Rossitto, F. Volpi, *Antologia di filosofia dall'antichità a oggi*

© 2008, Gius. Laterza & Figli, Roma-Bari

Gli articoli di O. Gingerich e di D. Danielson sono tratti dalla rivista «Le Scienze»

Le biografie della sezione di approfondimento sono tratte dall'*Enciclopedia Zanichelli* a cura di Edigeo

Realizzazione: Edigeo s.r.l., Milano

Design di copertina: Marco Sauro per Cromografica s.r.l.

© 2012 Gruppo Editoriale L'Espresso S.p.A.

Gruppo Editoriale L'Espresso

Via C. Colombo 98

00147 Roma

La Repubblica

Direttore Responsabile: Ezio Mauro

Reg. Trib. Roma n. 16064 del 13/10/1975

Tutti i diritti di copyright sono riservati.

Ogni violazione sarà perseguita a termini di legge.

Stampa: Puntoweb s.r.l. - Ariccia (Roma) - 2012

Questo volume è stampato su carta prodotta con cellulose senza cloro gas provenienti da foreste controllate e certificate, nel rispetto delle normative ecologiche vigenti.

MARGHERITA HACK

racconta

Tolomeo e Copernico
Dalle stelle la misura dell'uomo

Sommario

*

MARGHERITA HACK <i>racconta</i> Tolomeo e Copernico. Dalle stelle la misura dell'uomo	pag. 7
---	--------

APPROFONDIMENTI

Claudio Tolomeo	pag. 25
<i>L'universo a due sfere</i>	pag. 27

Niccolò Copernico	pag. 45
<i>La dedica del «De revolutionibus»</i>	pag. 47
<i>Copernico e Tycho Brahe</i> di O. Gingerich	pag. 53
<i>Le ossa di Copernico</i> di D. Danielson	pag. 77

IN SINTESI <i>di</i> Piergiorgio Odifreddi	pag. 91
--	---------

MARGHERITA HACK

racconta

Tolomeo e Copernico
Dalle stelle la misura dell'uomo

*

L'uomo e le stelle

L'uomo ha sempre guardato alle stelle, fin dai tempi più remoti. Come mai? Certo, le stelle sono sotto gli occhi di tutti e questo è stato uno spettacolo che anche l'uomo primitivo ha sempre potuto osservare; forse non lo ha solo incuriosito, anzi questi oggetti luminosi che sembravano muoversi da est a ovest nel corso della notte ed erano intangibili, a una lontananza impossibile da immaginare, lo avranno terrorizzato. Che cos'erano? La risposta più immediata era immaginare che fossero divinità. Infatti nell'antichità si identificavano i pianeti con gli dei: Giove era il re degli dei, Saturno era il padre di Giove, Mercurio era il dio dei commercianti, Venere la dea dell'amore, Marte il dio della guerra. L'astrologia è nata con l'astronomia proprio immaginando che queste stelle, questi corpi misteriosi, avessero un'influenza sulla nostra vita terrena. Quindi i fenomeni inaspettati, l'apparizione di una cometa, un'eclisse di Luna, ancora peggio un'eclisse di Sole, erano fatti spaventevoli che probabilmente an-

nunciavano dei disastri. Non si sapeva perché si alternavano il giorno e la notte, si pensava che il Sole andasse a dormire la notte e si alzasse al mattino, quindi si confondeva la causa con l'effetto.

Le stelle hanno rappresentato un mondo misterioso e ci sono voluti secoli e secoli per riuscire ad avere un'idea della loro distanza, a iniziare a comprendere la differenza fra stelle e pianeti e interpretarne i moti; ma bisogna arrivare al Novecento per capire a fondo che cosa sono le stelle – perché brillano? Che cosa succede nel loro interno? Di cosa sono fatte? – e quindi per risolvere alcuni dei misteri che ci accompagnano dall'inizio della civiltà fino a oggi.

Due diverse visioni del cosmo

Uno dei più grandi astronomi dell'antichità è stato certamente Tolomeo, vissuto nel II secolo d.C.; più che per la sua complicatissima teoria degli epicicli, che spiegava in modo soddisfacente il moto dei pianeti, è famoso per la sua opera, l'*Almagesto*, un compendio di tutta l'astronomia greca dei sei secoli precedenti. Il termine «Almagesto» viene dal greco *magiste*, «il più grande», che poi gli arabi tradussero in *al-Magisti*, da cui, appunto, «Almagesto». Il primo sistema cosmologico fu proposto da Aristotele, vissuto nel IV secolo a.C., e consisteva nell'assumere naturalmente la Terra al centro dell'universo e circondata da quattro gusci sferici collegati ai quattro elementi (terra, acqua, aria, fuoco); questi facevano parte del mondo sublunare, mentre tutti i corpi celesti, secondo Aristotele, erano fatti di materia diversa, la quintessenza, una materia eterea. I moti di tutti i corpi celesti venivano supposti perfettamente circolari, perché il circolo e la sfera erano ritenute le figure geometriche perfette, eterni e immuta-

bili. Questi «dogmi» di Aristotele durarono per parecchi secoli, arrivando fino a Keplero e Galileo. Inoltre per Aristotele i pianeti, il Sole e le stelle, si muovevano su sfere cristalline intese proprio come sfere cristalline materiali.

Aristarco: il Sole al centro

Nel IV e III secolo a.C. vissero altri grandi astronomi, fra cui Eraclide e Aristarco, che immaginarono che fosse la Terra a ruotare su se stessa, da ovest a est, e non la volta celeste a ruotare da est a ovest, come invece pensava Aristotele.

Aristarco pensò che fosse la Terra a ruotare intorno al Sole e non viceversa. E probabilmente quest'idea derivò dal fatto che egli tentò la prima misura della distanza della Terra dal Sole e si rese conto che il Sole era enormemente più grande della Terra. Quindi perché la piccola Terra doveva essere il centro dell'universo e non il Sole, così grande e così splendente? Compiendo osservazioni durante le eclissi di Luna, Aristarco riuscì a stimare correttamente l'ordine di grandezza del diametro della Luna e la sua distanza dalla Terra. Su queste basi Aristarco arrivò a determinare anche la distanza della Terra dal Sole. Considerò un triangolo rettangolo che aveva per vertici la Terra, la Luna e il Sole all'istante del primo e dell'ultimo quarto di Luna (posizione detta appunto di «quadratura»): l'angolo formato dalle linee che congiungono rispettivamente la Luna alla Terra e la Luna e al Sole è un angolo retto, quindi abbiamo a che fare con un triangolo rettangolo di cui si conosce l'angolo retto, si conosce un cateto, cioè la distanza Terra-Luna, e si può misurare direttamente l'angolo formato dalle linee che congiungono la Terra alla Luna e al Sole. Con questi dati è possibile determinare l'ipotenusa, cioè la distanza Terra-Sole. Aristarco trovò un valore circa venti volte più piccolo del valore moderno; il metodo usato

era corretto, ma affetto da forti errori, perché è molto difficile misurare l'istante esatto in cui la Luna si trova al primo e all'ultimo quarto. Comunque, malgrado questo grande errore, si poteva già capire che il Sole era enormemente più grande della Terra e quindi, proprio come dicevo prima, più «degno» di essere al centro del sistema, mentre la Terra gli ruotava intorno insieme agli altri pianeti. Però quest'idea non ebbe troppo successo, anche per la grande influenza che avevano le idee di Aristotele e perché i nostri sensi ci suggeriscono che sia proprio la volta celeste a ruotare da est a ovest e non la Terra a ruotare da ovest a est e il Sole a ruotare intorno alla Terra, mutando la sua posizione fra le stelle nel corso dell'anno.

Gli epicicli per spiegare il mondo

A Tolomeo è attribuita una complicata teoria degli epicicli per spiegare il moto dei pianeti. Ricordo che Aristotele aveva assunto che i corpi celesti si muovono su orbite perfettamente circolari, perché solo il circolo è la figura geometrica perfetta, ma in realtà i pianeti si muovono su orbite ellittiche e quindi, per far quadrare le osservazioni con il dogma aristotelico, gli antichi immaginarono che i pianeti si muovessero lungo piccoli cerchi, chiamati appunto «epicicli», il cui centro si spostasse a sua volta lungo grandi orbite perfettamente circolari, dette «deferenti», il cui centro corrispondeva alla Terra. Però anche con questo sistema era difficile spiegare completamente il moto dei pianeti e soprattutto il moto di Mercurio e di Venere. Per cui Tolomeo complica tremendamente il suddetto sistema assumendo addirittura che Mercurio e Venere, oltre a muoversi sugli epicicli e lungo i deferenti, compissero anche movimenti lungo cerchi perpendicolari al piano dell'orbita. Tolomeo non fu quindi solo un grande

compilatore, ma anche un innovatore. Tolomeo considera corpi celesti il Sole, le stelle, i pianeti, ma non le comete. In questo andava d'accordo con Aristotele, secondo il quale le comete erano corpi sublunari e facevano parte dell'alta atmosfera. Oggi noi sappiamo che le comete hanno orbite ellittiche estremamente allungate, per cui solo quando passano in vicinanza del Sole, al perielio, diventano osservabili.

Le ragioni di un modello geocentrico

Tolomeo concorda con Aristotele anche nella struttura dell'universo, immaginando anch'egli la Terra immobile al centro. A proposito di Eraclide e Aristarco, che come sappiamo avevano avanzato l'idea che fosse il Sole al centro dell'universo, Tolomeo scrive: «Alcuni filosofi pensano che nulla impedisce di pensare che i cieli siano fermi e sia la Terra a ruotare ogni giorno da ovest a est. Per la sua grande semplicità potrebbe anche essere vero, ma essi non si rendono conto quanto esso sarebbe ridicolo per quanto riguarda fenomeni intorno a noi e nell'aria». E quindi ammette che questo sistema, quello che poi è stato chiamato sistema copernicano, sarebbe estremamente più semplice che assumere la Terra al centro dell'universo. Però una Terra in moto suscita notevoli problemi e perplessità, e fra vari argomenti che usa Tolomeo per affrontare l'impossibilità del moto della Terra uno è questo: «Se l'aria fosse trascinata via a eguale velocità, allora i corpi terrestri rimarrebbero indietro o, se portati via dall'aria come se fossero strettamente attaccati a essa, non li vedremmo mai muoversi né avanti né indietro e tutto quello che vola o è trascinato resterebbe al suo posto, senza poterlo lasciare come se il moto della Terra gli togliesse ogni capacità di muoversi». Questi sono argomenti che oggi ci fanno ridere,

ma che ricordano un po' quelli che molti secoli dopo, nel 1600, proponevano gli oppositori di Galileo, per esempio: «Se io faccio un salto, mentre sono per aria la Terra mi si muove sotto». Questo dà un'idea di come fosse difficile far accettare l'idea che fosse la Terra a muoversi, ruotando su se stessa e intorno al Sole.

L'Almagesto

Nei tredici libri che compongono *l'Almagesto* è descritta praticamente tutta l'astronomia greca dei sei secoli precedenti; nella prefazione Tolomeo afferma l'importanza dell'astronomia, perché rivela la grandezza e l'ordine del creato e inoltre, si può aggiungere, perché aveva una grande importanza pratica, sia per la determinazione del calendario sia per la navigazione. Nei primi due libri dell'*Almagesto*, Tolomeo prova che la Terra è rotonda e che la gravità è diretta verso il suo centro, e dimostra che l'inclinazione dell'equatore sull'eclittica è all'origine delle stagioni. Nel terzo libro tratta dei moti del Sole e della lunghezza dell'anno e della precessione degli equinozi scoperta da Ipparco. Nel quarto libro espone la teoria del moto lunare; nel quinto descrive l'astrolabio, uno strumento composto da una combinazione di cerchi graduati per puntare la posizione delle stelle e determinarne geometricamente la posizione, e per determinare la parallasse del Sole e della Luna per ottenerne la distanza. La parallasse è un metodo moderno usato per determinare la distanza dei corpi celesti e consiste nel fenomeno per cui se io osservo il Sole o la Luna da posizioni diverse sulla Terra li vedo leggermente spostati rispetto a oggetti molto più lontani come le stelle; da questo spostamento posso determinare la distanza tramite calcoli trigonometrici. Quindi un metodo completamente diverso da quello geo-

metrico impiegato da Aristarco per determinare la distanza della Luna e del Sole.

Nel sesto libro Tolomeo discute il metodo per calcolare le eclissi seguendo l'opera di Ipparco. Nel settimo e ottavo dà un catalogo di 1028 stelle, come quello già stilato da Ipparco; probabilmente si tratta dello stesso catalogo corretto per tenere conto dell'effetto della precessione degli equinozi, cioè il lento spostamento dell'asse di rotazione terrestre che causa il mutamento della posizione apparente delle stelle. L'ottavo libro contiene anche una descrizione della Via Lattea. Nei restanti cinque libri, dal nono al tredicesimo, Tolomeo discute i moti dei pianeti e stabilisce che sono molto più vicini delle stelle fisse e più lontani della Luna, ed espone il complicato sistema per spiegare il moto dei pianeti, che costituisce proprio la parte più originale del suo lavoro.

Il mistero della supernova

E si arriva così al IX-X secolo, periodo in cui ci furono più che altro rielaborazioni delle opere precedenti, traduzioni dal greco, diffusione di queste opere, ma senza nuovi progressi. Anzi, si verificò un evento abbastanza misteriosa; non si capisce bene, infatti, come mai in Europa nessuno avvistò una brillantissima supernova apparsa nel 1054. In questa data astronomi cinesi raccontano di una stella ospite che era apparsa improvvisamente nella costellazione che in Europa è chiamata del Toro. Gli astronomi cinesi hanno dato con grande precisione la posizione di questa stella ospite, tanto brillante, dicono, da essere visibile in pieno giorno, quasi come la Luna al primo quarto. Oggi sappiamo che era una supernova, cioè una stella molto più grossa del Sole, che, arrivata alla fine della sua vita, dà luogo al suo interno a una serie di reazioni

nucleari producenti un'enorme quantità di energia che la stella non è in grado di irradiare gradualmente, e quindi esplose aumentando il suo splendore addirittura di un miliardo e più di volte. Questo oggetto scoperto dai cinesi apparve improvvisamente il 4 luglio e rimase visibile per ben ventitré giorni, e quindi non si capisce come mai nessuno ne abbia dato notizia in Europa. Alle latitudini europee sarebbe stato visibile la sera al tramonto oppure la mattina all'alba, ed essendo molto basso sull'orizzonte doveva essere ben osservabile. Nessuna cronaca europea ha però riportato questo fenomeno. Forse potrebbero averlo scambiato con Venere, e questo sarebbe un sintomo dell'ignoranza e della regressione delle conoscenze astronomiche che si erano avute nel medioevo.

Un rinnovato interesse per l'astronomia si ebbe nel Quattrocento, con il Rinascimento. Va ricordato Paolo dal Pozzo Toscanelli, un fiorentino vissuto tra il 1397 e il 1482, che aveva osservato numerose comete e fra queste anche quella del 1456, la famosa cometa di Halley (chiamata così in onore dell'astronomo inglese Edmond Halley, che ne osservò un passaggio nel 1682 capendo che era lo stesso oggetto passato settantasei anni prima e deducendo che si ripresentava in prossimità della Terra a intervalli regolari), identificabile anche con la cometa del 1308 che è raffigurata nel dipinto di Giotto nella cappella degli Scrovegni di Padova.

Nonostante questo clima di riscoperta dell'astronomia imperavano ancora i dogmi aristotelici – la Terra era il centro dell'universo, i pianeti descrivevano orbite perfettamente circolari ecc. – e la nuova visione dell'universo, con il Sole al centro, fece fatica ad affermarsi, perché si faceva un po' di confusione fra i moti di rotazione e i moti di rivoluzione, che, mancando una teoria completa sui moti della Terra, venivano spiegati in modi diversi.

Un nuovo schema dell'universo

Copernico non era un osservatore; oggi diremmo che era un teorico, infatti non amava fare osservazioni, ma preferiva ricorrere a quelle degli altri. Proprio analizzando le osservazioni altrui arrivò alla formulazione del nuovo schema dell'universo, che espose brevemente in quello che fu chiamato *Commentariolus*, un manoscritto che non ebbe una gran diffusione, inviato nel 1512 solamente ad amici e colleghi, insomma a persone interessate a questo tipo di studi. Nel *Commentariolus*, il sistema copernicano è descritto in sette proposizioni:

- 1) non c'è un singolo centro per tutte le orbite o sfere celesti;
- 2) il centro della Terra non è il centro del mondo, ma solo della gravità e dell'orbita lunare;
- 3) tutte le orbite circolano attorno al Sole, che si trova nel mezzo di tutto, cosicché il centro del sistema è situato nel Sole;
- 4) la distanza Sole-Terra è trascurabile rispetto alla distanza delle stelle;
- 5) la Terra con i suoi elementi (terra, acqua, aria e fuoco) ruota in moto giornaliero attorno al suo invariabile asse polare, mentre il firmamento è immobile e l'ultimo cielo eterno;
- 6) ciò che appare a noi un moto del Sole non è dovuto al Sole ma alla Terra, con cui stiamo compiendo una rivoluzione, proprio come ogni altro pianeta, così la Terra è sottoposta a parecchi movimenti;
- 7) ciò che appare nel moto dei pianeti come moto retrogrado o progressivo non è dovuto a loro stessi, ma alla Terra, i cui singoli moti sono dunque sufficienti a spiegare molti differenti fenomeni.

Non c'è quindi un singolo centro, dice la prima proposizione, per tutte le orbite o sfere celesti, e il centro della Terra non è il centro del sistema, ma solo della gravità; cioè tutti i corpi sono attratti verso il centro della Terra, ma la Terra non è il centro del sistema. Questo spiegava i moti in maniera molto più semplice che con il complicato sistema tolemaico degli epicicli.

Sebbene molti amici influenti e scienziati, anche nel clero, lo invitassero a pubblicare i risultati esposti nel *Commentariolus*, Copernico esitò per molti anni, probabilmente perché temeva di andare incontro a forti reazioni – era un carattere tranquillo e pare non gradisse avere troppe discussioni – e forse aveva anche paura di interventi da parte della Chiesa di Roma. Comunque indugiò a lungo e l'opera completa, *De revolutionibus orbium caelestium*, cioè «Sui moti di rivoluzione dei corpi celesti», fu pubblicata soltanto nel 1543, proprio nell'anno della morte di Copernico. E così non ci furono reazioni da parte del Vaticano, forse anche perché alcuni a conoscenza di quest'opera avevano esposto le sue tesi come ipotesi astratte per spiegare i moti dei pianeti, ma senza lasciare intendere che potessero davvero valere anche nel mondo reale.

Ma va anche detto che, sebbene Copernico avesse avuto la grandezza di immaginare un modello dell'universo completamente diverso da quello tramandato dall'antichità, era rimasto anche lui vittima dei dogmi di Aristotele; infatti aveva assunto che le orbite dei corpi celesti dovessero essere circolari e, di conseguenza, per spiegare i moti dei pianeti dovette in parte mantenere gli epicicli, complicando un sistema che in realtà era molto semplice. Per mandare definitivamente in pensione gli epicicli ci vorrà Keplero, che farà prevalere le osservazioni sui dogmi religiosi o filosofici. Si può dunque dire che è proprio con Keplero e Galileo che comincia veramente la scienza moderna.

La nascita dell'universo

Oggi ci domandiamo: il nostro universo è finito o infinito? Ha avuto un inizio o è sempre esistito? Ha dei confini o è infinito nello spazio e nel tempo? E possiamo sviluppare la cosmologia, quella parte dell'astronomia che tenta appunto di rispondere a queste domande. Possiamo capire come si è evoluto l'universo, se l'universo è rimasto sempre uguale a se stesso o è cambiato nel tempo? Possiamo provare a dare una risposta perché disponiamo di una specie di macchina del tempo che ci permette di guardare indietro nel passato. Tutte le nostre osservazioni dei corpi celesti avvengono tramite le radiazioni elettromagnetiche, tramite la luce, che viaggia a 300 000 km al secondo; quindi quando noi guardiamo il Sole lo vediamo com'era otto minuti fa, perché la luce impiega circa otto minuti per arrivare fino a noi. Quando osserviamo le più lontane galassie – la più lontana che ha osservato il telescopio spaziale Hubble si trova a tredici miliardi di anni luce – noi le vediamo com'erano miliardi di anni fa, perché tanto impiega la luce ad arrivare fino a noi. E andiamo anche oltre: con le moderne attrezzature possiamo ottenere un'immagine dell'universo bambino, dell'universo quando erano passati appena 400 000 anni da quello che chiamiamo l'inizio, il big bang, la «grande esplosione», che però non sappiamo se sia veramente l'inizio; sappiamo che 400 000 anni prima è iniziata l'espansione dello spazio. Quest'immagine a 400 000 anni dal big bang non contiene né le stelle né le galassie, ma solo un gas diffuso che presenta zone un po' più dense e più calde, e zone meno dense e meno calde; si pensa che le zone più dense e più calde siano state i semi da cui si sono poi formati gli ammassi di galassie.

Possiamo spingerci ancora più oltre? Possiamo andare a vedere com'era l'universo a qualche microsecondo dal big bang? Non possiamo compiere osservazioni dirette, però

possiamo calcolare quelle che erano le condizioni fisiche in questo intervallo di tempo, fra qualche microsecondo dal big bang e 400 000 anni. Infatti noi sappiamo che la temperatura attuale dell'universo è circa 3 gradi assoluti o Kelvin, cioè -270°C , e la densità attuale dell'universo è dell'ordine di un milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo della densità dell'acqua. Se l'universo è in espansione la sua scala va continuamente aumentando – non parlo di raggio, perché non sappiamo se l'universo è finito o è infinito, ma con «scala» possiamo intendere la distanza fra due oggetti qualsiasi, per esempio fra due ammassi di galassie – e sappiamo che la temperatura cresce con l'inverso della scala, la densità cresce con l'inverso del cubo della scala, quindi noi possiamo, partendo dai valori attuali, andare a calcolare quali erano la temperatura e la densità dell'universo fra l'istante del big bang e 400 000 anni. Scopriamo così che nei primi istanti dopo il big bang l'unico possibile stato della materia doveva essere una zuppa di particelle elementari, le più elementari, neutrini, elettroni, quark, e forse molte altre particelle instabili che oggi vengono prodotte negli acceleratori di particelle o che non conosciamo.

Dal big bang alle stelle

Dopo qualche minuto, diciamo grossomodo fra uno e tre minuti dal big bang, si possono formare protoni e neutroni, che non sono propriamente particelle elementari, perché ciascuna contiene tre quark; e fra tre minuti e otto minuti protoni e neutroni danno luogo alle prime reazioni nucleari con formazione di idrogeno pesante, di elio, dei due isotopi dell'elio – elio 3 ed elio 4 – e di un po' di litio. Dopo otto minuti, indicativamente, le temperature e le densità diventano troppo basse perché si possano avere

altre reazioni nucleari, però lo stato della materia è lo stato di gas ionizzato, cioè in cui particelle cariche positivamente come i protoni e negativamente come gli elettroni sono separati. In un gas ionizzato la luce non può propagarsi, perché i fotoni rimbalzano, per così dire, avanti e indietro freneticamente da una particella carica all'altra senza potersi propagare: per questo motivo non possiamo vedere direttamente le immagini dell'universo primordiale. Ma a 400 000 anni la temperatura scende a 3000 gradi, il gas da ionizzato diventa neutro, cioè protoni, elettroni, particelle alfa (nuclei di elio) ed elettroni si combinano formando un gas neutro e trasparente alla radiazione. A questo punto noi possiamo osservare direttamente quell'immagine dell'universo a 400 000 anni che abbiamo già citato. Poi che cosa succede? Abbiamo un'epoca in cui ancora non ci sono le stelle che gli anglosassoni hanno chiamato *the dark age*, che significa «l'età oscura», ma anche «il medioevo». Poi si cominciano a formare le prime stelle, e poi le prime galassie. Quindi abbiamo, con la luce, «il Rinascimento».

Dalle stelle alla vita

Le nostre osservazioni ci dicono anche che l'universo uscito dal muro di luce all'età di 400 000 anni era composto di idrogeno, idrogeno pesante, elio 3, elio 4 e litio. Tutti gli altri elementi non c'erano. Ma nella galassia più lontana osservata dal telescopio spaziale, quella a tredici miliardi di anni luce, quando l'espansione era cominciata da appena 700 milioni di anni, ci sono già tutti gli elementi. Dove si sono formati? Gli elementi si possono formare solo in luoghi abbastanza densi e caldi, come l'universo primordiale o l'interno delle stelle. Quindi vuol dire che fra 400 000 anni e 700 milioni di anni dal

big bang, quando è nata la prima galassia, si dovevano essere formate anche grandi stelle che, evolvendo rapidamente, hanno generato al loro interno, con le reazioni nucleari, tutti gli elementi naturali che noi conosciamo sulla Terra, dall'idrogeno all'uranio. Esplorendo alla fine della loro vita queste stelle hanno arricchito il mezzo interstellare di tutti questi elementi necessari alla formazione delle successive galassie, di nuove stelle e dei loro pianeti, e quindi anche della vita. Oggi ci rendiamo conto che anche noi siamo fatti di elementi formati all'interno delle stelle, e quindi anche noi siamo il prodotto dell'evoluzione dell'universo, che ha permesso la formazione delle stelle, che hanno permesso la formazione degli elementi, che hanno permesso la formazione dei pianeti e della vita. Capire l'evoluzione dell'universo è un po' il prologo dell'evoluzione darwiniana: dalla zuppa di particelle elementari agli elementi, dagli elementi alla vita dei primi esseri monocellulari, da questi a esseri complessi come i mammiferi quali siamo noi.

APPROFONDIMENTI

Claudio Tolomeo

*

Astronomo, geografo e matematico, Tolomeo fu attivo ad Alessandria d'Egitto nel II secolo. La sua opera principale, *Mathematiké syntaxis*, composta da tredici libri e tradotta in arabo col nome di *Almagesto*, espone le conoscenze matematiche, geometriche (con il teorema che porta il suo nome) e astronomiche del tempo, riassumendo anche l'opera di Ipparco e affermando la validità del modello geocentrico, che perfezionò introducendo la teoria degli epicicli (sistema tolemaico); tale modello fu accettato dalla cultura occidentale fino al Cinquecento, quando, nonostante l'appoggio incondizionato della Chiesa contro ogni mutamento che togliesse l'uomo dal centro dell'universo e affermasse la validità del metodo scientifico contro il dogma, venne sostituito dal sistema eliocentrico di Copernico, dopo travagliate vicende che videro coinvolti i più illustri scienziati e filosofi del tempo (Galileo, Giordano Bruno, Keplero). Altrettanto importante fu la sua opera di geografo: negli otto libri della *Geographia* tracciò il più completo schema delle conoscenze del suo tempo su Europa, Asia e Africa, con carte in cui fece uso di latitudine e longitudine, elenchi dei nomi, suddivisione dei climi, venti ecc.

L'universo a due sfere

*

La cultura dell'età imperiale romana, corrispondente ai primi secoli dell'era cristiana, fu caratterizzata anche da un notevole progresso delle scienze. Tra le molte opere scientifiche di cui Tolomeo fu autore, la più famosa è senza dubbio l'Almagesto, scritto costituito di tredici libri, il cui titolo originale è Composizione matematica. In essa è portata a perfezione, con varie argomentazioni, l'ipotesi risalente a Platone e ad Aristotele – e sviluppata da Eudosso di Cnido (V-IV secolo a.C.) e Ipparco di Nicea (II secolo a.C.) –, secondo la quale l'universo sarebbe contenuto in una sfera di etere (il cielo), ruotante su se stessa, e la Terra sarebbe anch'essa una sfera, collocata al centro dell'universo, grande quanto un punto a paragone del cielo e completamente immobile. Altre sfere intermedie tra queste due dovrebbero poi essere ammesse per spiegare il movimento del Sole, della Luna e dei pianeti.

Nei capitoli iniziali dell'Almagesto, da cui è tratto il brano che presentiamo, Tolomeo presenta questa sua teoria come un complesso di ipotesi, suffragate dai fenomeni visibili e da dimostrazioni geometriche, e dunque basata su un metodo rigorosamente scientifico. In particolare egli giustifica l'ipo-

tesi che il cielo ruoti su se stesso con l'osservazione della rivoluzione di alcune stelle intorno a un polo, e l'ipotesi della sua forma sferica con il fatto che la sfera è la figura più facile a muoversi. La sfericità della Terra è dimostrata dal fatto che gli stessi fenomeni si osservano sulla sua superficie in ore diverse e dal fatto che i monti appaiono sempre più alti mano a mano che ci si avvicina a essi; la sua dimensione puntiforme è dimostrata dal fatto che le distanze fra gli astri appaiono le stesse da qualunque punto della Terra siano osservate. Particolare interesse presenta la dimostrazione dell'immobilità della Terra, condotta da Tolomeo contro l'ipotesi di una sua rotazione su se stessa, avanzata nel IV secolo a.C. da Eraclide Pontico. Pur riconoscendo che i fenomeni celesti non si oppongono all'ipotesi di Eraclide (che sarebbe stata ripresa da Copernico), Tolomeo sostiene che essa comporterebbe varie assurdità per i corpi che si muovono nell'atmosfera terrestre (nuvole, proiettili). Essi dovrebbero infatti apparire tutti in movimento in senso contrario alla Terra, poiché il supposto moto di questa dovrebbe essere più veloce di qualsiasi altro. Tolomeo invece non esamina l'ipotesi eliocentrica di Aristarco di Samo (III secolo a.C.).



Almagesto, I, 2-7

2. L'ordine dei Teoremi

L'opera che mi accingo a compiere comincia considerando la relazione generale della Terra nel suo insieme con il cielo nel suo insieme. Delle trattazioni parziali viene in seguito svolta per prima quella sulla posizione dell'eclittica e sui luoghi di quella parte della Terra abitata da noi, e inoltre sulla differenza che, nella loro successione, vi è tra l'uno e l'altro di tali luoghi quanto all'orizzonte di ciascuno (differenza che dipende dall'inclinazione). Que-

sta esposizione teorica preliminare rende più agevole l'indagine sui problemi restanti¹.

La seconda parte tratta del movimento del Sole, di quello della Luna e dei fenomeni a essi concomitanti; senza la comprensione preliminare di questi movimenti non sarebbe possibile affrontare dettagliatamente la teoria delle stelle.

L'ultima parte di questo stesso percorso svolge il discorso sulle stelle. Anche qui sarà secondo ragione permettere ciò che concerne la sfera delle stelle cosiddette fisse; seguirà ciò che concerne i cinque astri cosiddetti erranti².

Cercherò di esporre chiaramente ciascuna di queste sezioni, utilizzando come principi e, per così dire, fondamenti per lo stabilimento delle teorie i fenomeni evidenti e quelle indubitabili tra le osservazioni degli antichi e nostre; e conetterò le conoscenze che ne conseguono per mezzo delle dimostrazioni caratteristiche dei procedimenti geometrici³.

Si deve stabilire in generale preliminarmente che:
il cielo è sferico e si muove al modo di una sfera;

¹ L'eclittica è l'orbita dell'apparente moto annuo del Sole, inclinata rispetto all'equatore e perciò causa dell'alternò avvicinarsi del Sole ai due emisferi terrestri, che spiega l'alternarsi delle stagioni.

² Le stelle che appaiono sempre alla stessa distanza fra loro venivano chiamate «fisse» perché si supponeva che fossero infisse nella volta celeste. Gli astri erranti sono i pianeti (dal verbo *plánomai*, «errare»), che per Tolomeo erano cinque: Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno.

³ Ecco il metodo seguito da Tolomeo: partire dai fenomeni osservati e trarne le conseguenze per mezzo di dimostrazioni geometriche. Si tratta perciò di una teoria scientifica nel senso più rigoroso del termine, anche se essa verrà poi soppiantata da quella copernicana, basata su osservazioni più accurate e successivamente dimostrata con prove più convincenti.

la Terra, considerata come un tutto, è, per quanto ha effetto sulla nostra sensazione, sferica di figura;

la Terra è posta nel mezzo del mondo, al modo di centro;

quanto alla sua grandezza e alla sua distanza, la Terra sta alla sfera delle stelle fisse nel rapporto di un punto;

la Terra non compie nessun movimento locale.

Tratteremo brevemente ciascuno di questi punti, per stabilirli nella memoria.

3. Il cielo si muove come una sfera

È ragionevole ritenere che gli antichi siano giunti alle prime nozioni su queste cose muovendo da osservazioni del tipo seguente. Essi vedevano che il Sole, la Luna e gli altri astri si spostano da oriente a occidente sempre lungo cerchi paralleli, e che iniziano a salire partendo dal suolo, quasi venissero dalla stessa Terra; una volta pervenuti poco a poco a un punto più alto compiono un arco corrispondente in discesa e di nuovo tornano in basso fino a sparire, quasi ricaduti nella Terra. Poi di nuovo, dopo essere rimasti per un certo tempo nell'invisibilità, sorgono e tramontano, quasi avessero un altro inizio. E i tempi di questi percorsi, e inoltre i luoghi delle levate e dei tramonti, generalmente si corrispondono e sono dotati di ordine e regolarità⁴.

Ma ciò che soprattutto li portò alla nozione della sfericità fu l'osservazione della rivoluzione circolare degli astri sempre visibili, e l'unicità e identità del centro di tale rivoluzione. Di necessità quel punto divenne il polo della sfera celeste; gli astri che gli sono vicini gli si rivolgono

⁴ Il fenomeno che è sempre stato il più appariscente è quello del levarsi e del tramontare del Sole e degli altri corpi celesti, interpretabile come l'effetto del loro ruotare attorno alla Terra.

intorno secondo cerchi più piccoli, quelli che gli sono più lontani descrivono nella rivoluzione cerchi più grandi, in proporzione alle loro distanze, finché con l'allontanamento si giunge alle stelle che divengono invisibili. Tra queste, essi vedevano che quelle che sono vicine alle stelle sempre visibili rimangono nell'invisibilità per un tempo breve, quelle più lontane per un tempo più lungo, di nuovo in modo proporzionale. Così, queste osservazioni bastarono a che essi prendessero come principio la nozione della sfericità; poi, con il progresso della scienza, riconobbero gli altri fenomeni come in accordo con questi. Assolutamente tutti i fenomeni infatti testimoniano contro le concezioni diverse⁵.

Si supponga, per esempio, che lo spostamento delle stelle avvenga in linea retta all'infinito (come alcuni hanno creduto); come intendere allora il processo per cui si osserva che ogni giorno ogni stella si muove dallo stesso punto di partenza? Come potrebbero ritornare le stelle, se andassero verso l'infinito? Come non ci appare questo loro ritorno? Come nel loro sparire non diminuiscono a poco a poco di grandezza? Non le vediamo al contrario divenire più grandi in prossimità delle loro sparizioni, a essere ricoperte a poco a poco, e per così dire sezionate, dalla superficie della Terra?

Ma davvero sarebbe la cosa più assurda che esse si accendessero uscendo dalla Terra e poi ritornando alla Terra si spegnessero. Se si ammettesse che una disposizione siffatta nelle loro grandezze e nei loro numeri, e ancora nelle distanze, nei luoghi e nei tempi, si è realizzata

⁵Tolomeo si riferisce alle stelle che, nel corso della notte, danno l'impressione di spostarsi girando intorno a un polo celeste (quello dell'emisfero settentrionale è vicino alla stella polare), pur restando alla stessa distanza fra di loro. Naturalmente tale fenomeno è spiegabile, oltre che con l'ipotesi della rotazione del cielo, anche con quella della rotazione della Terra. Ma Tolomeo considera solo la prima.

così a caso e come capita, e che tutta una parte della Terra ha una natura capace di accendere, un'altra capace di spegnere, o, più precisamente, che la stessa parte è per certe genti capace di accendere, per altre di spegnere, e che alle stesse stelle capita di essere per gli uni già o accese o spente, mentre per gli altri non ancora – se, dico, si ammettono tutte queste cose ridicole, che cosa si dovrebbe dire delle stelle sempre visibili, che né sorgono, né tramontano? Per quale ragione le stelle che si accendono e si spengono non sorgono e tramontano per ogni parte della Terra, e quelle che non subiscono queste modificazioni non sono sempre sopra l'orizzonte per ogni parte della Terra? In effetti secondo tale concezione non sono le stesse stelle ad accendersi e spegnersi costantemente per gli uni e a non subire nulla di ciò per gli altri. Ma è ben chiaro che sono le stesse stelle che per alcuni sorgono e tramontano, per altri né sorgono né tramontano.

In breve, se si assume per lo spostamento delle cose celesti qualsiasi altra figura che non sia la sfera, le distanze dalla Terra alle diverse parti del cielo divengono di necessità disuguali, dovunque e comunque si collochi la Terra. Di conseguenza sia le grandezze sia le distanze reciproche delle stelle dovrebbero apparire disuguali alle stesse persone in ogni rivoluzione, dato che le stelle sarebbero ora più lontane ora più vicine. Ma non è questo ciò che ci accade di vedere. Infatti, non è una distanza minore ciò che fa sì che le grandezze appaiano maggiori in prossimità dell'orizzonte, ma l'esalazione tra la nostra vista e le stelle dell'umidità che circonda la Terra – così come le cose immerse nell'acqua ci appaiono maggiori, e tanto maggiori quanto più vanno verso il fondo⁶.

⁶Tolomeo mescola tra loro vari tipi di osservazioni e di supposizioni, ma l'ipotesi principale è sempre quella della sfericità e della rotazione del cielo.

Alla nozione della sfericità portano anche le considerazioni seguenti: gli strumenti costruiti per la misurazione del tempo non possono essere in accordo in nessun'altra ipotesi tranne che in questa; il movimento delle cose celesti è non impedito e il più facile a compiersi nella sua totalità, e tra le figure piane la più facile a muoversi è il cerchio, tra quelle solide la sfera; infine, dato che tra le diverse figure aventi uguale perimetro la più grande è quella che ha più angoli, e perciò il cerchio è la più grande delle figure piane, la sfera di quelle solide, anche il cielo è più grande degli altri corpi⁷.

Inoltre, certe ragioni fisiche possono spingere a questa concezione. Tra tutti i corpi l'etere è quello che consta delle parti più sottili e più simili; ma le superfici dei corpi che constano di parti simili constano di parti simili; ora, constano di parti simili tra i piani soltanto la superficie circolare, tra i solidi soltanto quella sferica; non resta se non che l'etere sia sferico, dato che non è piano ma solido. Parimenti, la natura ha costituito tutti i corpi terrestri e che si dissolvono da figure ricurve, ma dissimili nelle loro parti, tutti i corpi nell'etere e divisi invece da figure che constano di parti simili, cioè sferiche; se infatti questi corpi fossero piani o a forma di disco, non apparirebbero di forma circolare a tutti quelli che osservano nel medesimo tempo dai diversi luoghi della Terra; è perciò conforme a ragione che anche l'etere che li circonda, essendo di natura simile, sia sferico, e che si muova circolarmente e uniformemente per la similarità delle sue parti⁸.

⁷ Queste ultime considerazioni non sono frutto di osservazioni, ma di convinzioni di ordine geometrico.

⁸ Tolomeo riteneva, come Aristotele, che il cielo fosse formato di etere, elemento puro e incorruttibile, diverso dai quattro elementi terrestri (acqua, aria, terra e fuoco).

4. Anche la Terra, considerata come un tutto, è, per quanto ha effetto sulla sensazione, sferica

Si può giungere ad apprendere che anche la Terra, considerata come un tutto, è, per quanto ha effetto sulla percezione, sferica soprattutto nel modo seguente. Si può vedere che il Sole e la Luna e le altre stelle sorgono e tramontano non nello stesso momento per tutti quelli che stanno sulla Terra, ma sempre prima per quelli che stanno verso oriente, dopo per quelli che stanno verso occidente. Rileviamo infatti che il percepimento delle eclissi, soprattutto di quelle lunari, che si realizzano nello stesso tempo, non è registrato da tutti nella stessa ora, cioè a uguale distanza dal mezzogiorno; rileviamo anzi che sempre le ore in cui sono registrate dagli osservatori che stanno verso oriente sono più tarde di quelle di chi sta verso occidente. E poiché si rileva che la differenza delle ore è proporzionale alle distanze tra le regioni, con ragione si supporrà che la superficie della Terra è sferica, dato che l'assunzione della similarità della curvatura in tutte le parti ha come effetto che l'occultamento rispetto alle parti successive avviene sempre secondo un rapporto uguale. Se invece la figura della Terra fosse diversa ciò non potrebbe accadere, come si può vedere dalle seguenti considerazioni.

Se la Terra fosse concava gli astri sorgendo apparirebbero prima alle genti più a occidente. Se fosse piatta, sorgerebbero e tramonterebbero insieme e nello stesso momento per tutti quelli che stanno sulla Terra. Se fosse piramidale, cubica, o di qualche altra figura poliedrica, apparirebbero ugualmente nello stesso momento per tutti gli abitanti dello stesso piano. Ma non è affatto questo ciò che appare accadere.

E che la Terra non possa neppure essere cilindrica, in modo che la superficie circolare sia rivolta verso le levate e i tramonti e le basi piane verso i poli del mondo – tesi questa che si potrebbe supporre come più plausibile – è

chiaro da quanto segue: per nessuno di quelli che abitassero sulla superficie ricurva nessuna stella potrebbe essere sempre visibile, ma o le stelle senza eccezioni sorgerebbero e tramonterebbero, oppure resterebbero sempre invisibili per tutti le stesse stelle (cioè quelle che si trovano entro una data distanza dall'uno o l'altro dei due poli). Ora, quanto più avanziamo verso nord, tanto più numerose scompaiono le stelle meridionali e divengono sempre visibili quelle settentrionali. È allora chiaro che anche in questo caso la curvatura della Terra ha come effetto occultamenti secondo un rapporto uguale anche verso le parti disposte trasversalmente – ciò che dimostra che la figura della Terra è sferica in tutte le direzioni. A ciò si aggiunga che se navighiamo verso monti o luoghi elevati, da qualsiasi e verso qualsiasi direzione, ne vediamo aumentare a poco a poco la grandezza, come se emergessero dal mare stesso dopo esserne stati in precedenza immersi, a causa della curvatura della superficie dell'acqua⁹.

5. La Terra occupa il mezzo del cielo

Una volta considerato questo, se si passa ad affrontare il problema della posizione della Terra, si riconoscerà che i fenomeni attorno a essa giungono a compiersi soltanto se la collochiamo nel mezzo del cielo, come centro di una sfera. Se la cosa non stesse così, bisognerebbe che o la Terra fosse fuori dell'asse celeste e distante ugualmente dall'uno e dall'altro polo, oppure sull'asse ma spostata verso uno dei poli, oppure né sull'asse né equidistante dai poli.

⁹Gli argomenti addotti da Tolomeo a prova della sfericità della Terra sono perfettamente corretti e validi ancora oggi.

1) Alla prima di queste tre tesi si oppone quanto segue:

A) Se, relativamente a località determinate della Terra, si suppone la Terra spostata verso l'alto o verso il basso, si hanno queste conseguenze:

a) nel caso della sfera retta: non si produce mai il giorno equinoziale, dato che l'orizzonte divide sempre la sfera celeste in sezioni disuguali;

b) o, ancora, non si produce affatto il giorno equinoziale¹⁰, oppure si produce non nello stesso giorno in cui il Sole sorge nel punto intermedio tra il tropico d'estate e quello d'inverno, dato che gli intervalli in questione necessariamente divengono disuguali: infatti l'orizzonte divide in due parti uguali non più l'equatore (cioè il più grande dei cerchi paralleli descritti nella rivoluzione attorno ai poli), ma uno dei cerchi paralleli all'equatore, e a nord o a sud di questo. Ora, tutti assolutamente convengono che gli intervalli che stiamo considerando sono dovunque uguali, perché gli incrementi nella durata del giorno dall'equinozio fino al giorno più lungo nel tropico d'estate sono uguali ai decrementi fino al giorno più breve nel tropico d'inverno.

B) Se poi, relativamente a località determinate della Terra, si suppone la Terra spostata verso oriente od occidente, si hanno allora le conseguenze che le grandezze e le distanze delle stelle nell'orizzonte orientale non appaiono più uguali e le stesse rispetto a quelle

¹⁰ Il caso della «sfera retta» si verifica quando lo zenit dell'osservatore si trova sul piano dell'equatore. Il giorno equinoziale è quello in cui il giorno e la notte hanno la stessa durata. L'argomento di Tolomeo è che, se la Terra non fosse al centro del cielo, non vi sarebbe mai il giorno equinoziale, che invece è un fatto osservabile.

dell'orizzonte occidentale, e che il tempo dalla levata alla culminazione non risulta più uguale a quello dalla culminazione al tramonto – conseguenze che chiaramente sono entrambe del tutto in contrasto con i fenomeni.

2) Contro la seconda tesi, che suppone la Terra sull'asse del mondo, ma spostata verso l'uno o l'altro dei poli, si può poi obiettare quanto segue:

se la cosa sta così, per qualsiasi inclinazione il piano dell'orizzonte fa sì che la parte di cielo che sta sopra la Terra sia disuguale da quella che sta sotto la Terra. E questa disuguaglianza dipende in ciascun caso dalla misura dello spostamento, e si ha sia tra le parti che stanno sopra (o sotto) nelle diverse misure di spostamento, sia tra la parte che sta sopra e quella che sta sotto; infatti, solo nel caso della sfera retta l'orizzonte può dividere la sfera in due parti uguali, mentre nel caso della sfera inclinata (nella quale il polo più vicino resta sempre visibile) la parte di cielo che sta sopra la Terra diminuisce sempre, quella che sta sotto invece aumenta. Si ha allora la conseguenza che anche il grande cerchio dello zodiaco è diviso dal piano dell'orizzonte in parti disuguali. Ma ciò non è mai stato osservato. Infatti, sempre e per tutti delle dodici parti sei sono visibili sopra la Terra, mentre le altre sei sono invisibili, e poi di nuovo, allorché queste ultime sei sono tutte simultaneamente visibili sopra la Terra, le altre sei sono insieme invisibili; ed è allora chiaro che l'orizzonte divide l'eclittica in due sezioni uguali, visto che a essere tagliati via – ora sopra, ora sotto la Terra – sono gli stessi semicerchi nella loro interezza.

In generale, se la Terra non avesse la sua posizione sul piano dell'equatore, ma fosse spostata a nord o sud verso l'uno o l'altro dei poli, si avrebbe la conseguenza

che negli equinozi le ombre proiettate sui piani paralleli a quello dell'orizzonte dagli gnomoni alle levate e quelle ai tramonti non produrrebbero più una sola linea retta per la sensazione. Ora, dovunque questo allineamento è osservato in concomitanza con la posizione diametralmente opposta di levata e tramonto.

3) Ma è senz'altro chiaro che la Terra non può essere spostata neppure secondo la terza tesi: a questa si oppongono le conseguenze di entrambe le prime due tesi.

In breve, se la Terra non stesse al centro l'intero ordine osservato degli incrementi e decrementi di notte e giorno sarebbe completamente sconvolto. Inoltre, le eclissi di Luna non potrebbero avvenire nella posizione diametralmente opposta al Sole rispetto a tutte le parti del cielo, dato che spesso l'interposizione della Terra si avrebbe con questi due astri in posizioni non diametralmente opposte, ma separate da intervalli inferiori a un semicerchio.

6. La Terra sta ai cieli nel rapporto di un punto

Che la Terra stia, per quanto ha effetto sulla sensazione, nel rapporto di un punto rispetto alla sua distanza dalla sfera delle cosiddette stelle fisse, ha la seguente forte testimonianza a favore: le grandezze e le distanze reciproche degli astri, osservate da qualsiasi parte della Terra negli stessi tempi, appaiono dovunque uguali e simili; parimenti, le osservazioni delle stesse stelle compiute da latitudini diverse non consentono di rilevare neppure la minima discordanza¹¹.

Non si deve poi tralasciare che gli gnomoni, in qualsiasi parte della Terra siano posti, e i centri delle sfere armillari

¹¹ Ciò significa che la grandezza della Terra è del tutto irrilevante.

equivalgono al vero centro della Terra, cioè che gli esami compiuti con la diottra e i percorsi ricurvi delle ombre danno risultati in accordo con le ipotesi stabilite per i fenomeni, appunto come se le linee si trovassero a passare per il punto centrale stesso della Terra¹².

E un chiaro segno che le cose stanno così è anche che dovunque i piani passanti per i nostri occhi, che chiamiamo orizzonti, tagliano in tutti i casi l'intera sfera celeste in due parti uguali; se la grandezza della Terra rispetto alla distanza dei cieli fosse sensibile, ciò non potrebbe accadere, ma soltanto il piano passante per il punto centrale della Terra potrebbe dimezzare la sfera; invece i piani passanti per qualsiasi altro punto della superficie della Terra produrrebbero in tutti i casi le sezioni al di sotto della Terra maggiori di quelle al di sopra.

7. La Terra non compie nessun movimento locale

In base agli stessi argomenti esposti in precedenza si può dimostrare che la Terra non può compiere nessuno dei movimenti trasversali di cui si è detto, né in generale spostarsi dal luogo centrale. Si avrebbero infatti le stesse conseguenze che se si trovasse a occupare una posizione diversa dal centro. Mi sembra allora futile ricercare le cause dello spostamento verso il centro, una volta che è chiaro dagli stessi fenomeni che la Terra occupa il luogo centrale del mondo e che tutti i corpi pesanti si spostano verso di essa. E il più agevole e solo modo per comprendere ciò sta nel vedere che, una volta dimostrato che la Terra è sferica e nel mezzo del tutto (come si è detto), in

¹² Lo «gnomone» è un'asta piantata per terra allo scopo di misurare le ore con lo spostamento della sua ombra. La «sfera armillare» è uno strumento fatto di anelli concentrici che rappresenta il sistema solare. La «diottra» è uno strumento che serve per verificare se due superfici collimano tra di loro.

tutte le sue parti assolutamente le inclinazioni e i movimenti dei corpi pesanti (intendo i loro movimenti propri) si compiono sempre e dovunque ortogonalmente al piano tangente che passa per il punto di contatto della caduta. Perciò è chiaro che i corpi pesanti, se non fossero arrestati dalla superficie della Terra, proseguirebbero fino al centro stesso, dato che la linea retta che conduce al centro è sempre ortogonale al piano tangente la sfera tracciato sull'intersezione prodotta dal contatto¹³.

Quelli che ritengono un paradosso che il così grande peso della Terra non ondeggi da qualche parte, né si sposti, mi sembrano sbagliare in quanto fanno questo confronto riferendosi alle condizioni loro proprie e non alle proprietà del tutto. Non credo che ciò sembrerebbe loro ancora stupefacente, se considerassero che questa grandezza della Terra, confrontata con la totalità del corpo che la circonda, ha con essa il rapporto di un punto. Sembrerà loro così possibile che ciò che è relativamente piccolissimo sia sostenuto e sospinto da ogni lato con forza uguale e con angoli simili da ciò che è assolutamente grandissimo e simile nelle sue parti. Non c'è infatti per la Terra nel mondo un «alto» e un «basso», come neppure in una sfera si può concepire nulla di simile. Tra i composti che sono nel mondo, per quanto concerne lo spostamento loro proprio e naturale, quelli leggeri e sottili nelle loro parti si diffondono verso l'esterno, cioè verso la circonferenza, e sembrano slanciarsi verso ciò che di volta in volta è l'alto, giacché ciò che sta sopra il nostro capo, e che tutti chiamiamo «alto», è nella direzione della superficie che ci circonda. I composti pesanti e grossi nelle loro parti invece si spostano verso il mezzo e il centro, e sembrano cadere verso il basso, giacché ciò che va sotto i

¹³ Il fatto che i corpi pesanti tendano verso il centro della Terra, secondo Tolomeo, è la prova che questa non si sposta mai dal centro dell'universo.

nostri piedi, e che di nuovo tutti chiamiamo «basso», è nella direzione del centro della Terra. Ed essi producono comprensibilmente una subsidenza nel mezzo, per la resistenza e impatto di ugual forza e direzione dell'uno rispetto all'altro da ogni parte¹⁴.

Si comprende allora chiaramente che il volume della Terra è incomparabilmente grande rispetto ai corpi che si spostano verso di esso, e che la Terra non oscilla per la spinta dei pesi incomparabilmente piccoli, e, per così dire, assorbe la loro caduta. E se poi la Terra avesse un movimento comune, cioè un movimento uguale a quello degli altri corpi pesanti, nel muoversi li precederebbe evidentemente tutti, data l'enorme eccedenza della sua grandezza, e lascerebbe gli animali e gli altri corpi pesanti a mezz'aria, e alla fine essa stessa a grandissima velocità cadrebbe fuori dello stesso cielo. Al solo pensarle, queste cose appaiono del tutto ridicole¹⁵.

Ci sono alcuni che, pur non avendo nulla da opporre a questi argomenti, assentono a una tesi che credono più plausibile: ritengono che non si potrebbe addurre nulla contro l'ipotesi che, per esempio, il cielo sia immobile e la Terra ruoti attorno allo stesso asse da occidente verso oriente compiendo pressoché un giro ogni giorno¹⁶, o anche contro l'ipotesi che entrambi si muovano in certa misura,

¹⁴ Tolomeno suppone la teoria aristotelica dei «luoghi naturali», secondo la quale i corpi pesanti (solidi e liquidi) tendono per natura verso il basso, cioè verso il centro della Terra, e quelli leggeri (gas e vapori) tendono per natura verso l'alto, cioè verso la volta celeste.

¹⁵ La Terra non può ondeggiare, perché il suo volume, pur essendo paragonabile a un punto rispetto alla volta celeste, è incomparabilmente più grande di quello di tutti i corpi che si trovano su di essa.

¹⁶ Questa ipotesi era stata formulata nel IV secolo a.C. da Eraclide Pontico, scolaro prima di Platone e poi di Aristotele.

purché, come si è detto, sullo stesso asse e in modo da conformarsi al sorpassamento dell'uno rispetto all'altro¹⁷.

Ora, per quanto concerne i fenomeni celesti, non c'è forse nulla che si oppone a che la cosa stia secondo questa più semplice congettura; ma sfugge a costoro che in base a ciò che accade tra noi nell'aria siffatta tesi non può che apparire del tutto ridicola¹⁸. Infatti, concediamo pure a costoro ciò che è contro natura, cioè che i corpi le cui parti sono più sottili, e che sono i più leggeri, non siano dotati assolutamente di nessun movimento, o almeno di un movimento differenziato rispetto a quello dei corpi di natura contraria – ciò mentre chiaramente i corpi aerei, anche quelli che constano di parti meno sottili, compiono movimenti più veloci rispetto a tutti i corpi più terrosi –, e concediamo che invece i corpi le cui parti sono più grosse, e che sono i più pesanti, compiano un movimento proprio così celere e uniforme – ciò mentre di nuovo si conviene generalmente che in certi casi questi corpi non sono neppure atti a ricevere il movimento da altri corpi –; ma costoro dovranno convenire che il movimento di rotazione della Terra è assolutamente il più impetuoso, rispetto a tutti i movimenti che gli avvengono intorno, dato che compie una così grande rivoluzione in breve tempo; di conseguenza tutti i corpi non appoggiati sulla Terra appariranno compiere un solo movimento, quello contrario alla Terra, e non si vedrà mai andare verso oriente una

¹⁷ Forse Tolomeo allude all'ipotesi eliocentrica di Aristarco di Samo (III secolo a.C.); tuttavia in seguito non la discute.

¹⁸ Tolomeo riconosce che, dal punto di vista dei fenomeni celesti, cioè dei movimenti apparenti degli astri, l'ipotesi della rotazione terrestre è perfettamente sostenibile. Essa sarà adottata da Copernico e difesa soprattutto da Galileo. Ciò che a suo giudizio contrasta con tale ipotesi è il comportamento dei corpi nell'aria, cioè le nuvole, gli animali che volano e gli oggetti scagliati in alto.

nuvola, né nient'altro che voli o sia scagliato, perché la Terra nel suo movimento li sorpasserà e precederà sempre, e quindi tutti gli altri corpi sembreranno essere lasciati indietro e spostarsi verso occidente¹⁹.

Se poi costoro affermassero che l'aria è portata attorno insieme alla Terra nella stessa direzione e alla stessa velocità, nondimeno i composti nell'aria apparirebbero sempre lasciati indietro dal movimento dell'una e dell'altra; o se anche questi fossero portati attorno con l'aria, quasi unificati con essa, non apparirebbero più né avanzare né restare indietro, ma apparirebbero sempre statici, senza compiere una deviazione o uno spostamento neppure nei voli o nei lanci. Ma vediamo chiaramente compiersi tutto questo, come se la non immobilità della Terra non avesse nessuna conseguenza sulla lentezza o velocità di questi corpi²⁰.

Tratto da F. Franco Repellini, *Cosmologie greche*, Loescher, Torino 1980, pp. 283-97

¹⁹ Secondo Tolomeo il moto di rotazione della Terra dovrebbe essere velocissimo, dovendo essa compiere un intero giro su se stessa in sole ventiquattro ore. Perciò, se tale moto esistesse, darebbe l'impressione che tutti i corpi sospesi nell'aria si muovessero in senso contrario, il che invece non accade.

²⁰ Galilei dimostrerà questa tesi col celebre esperimento di ciò che accade all'interno di una nave in movimento, il quale introduce il concetto di relatività del moto e della quiete.

Niccolò Copernico

•

Nikolaj Kopernik (o Koppernigk, italianizzato in Niccolò Copernico) nacque a Toruń, in Polonia, nel 1473. Studiò matematica a Cracovia e quindi legge, astronomia, medicina e diritto canonico a Bologna, Ferrara e Padova. Nel 1503 tornò definitivamente in Polonia (Frombork) dove fu canonico. Riprendendo il pensiero di Aristarco di Samo e di altri, tra cui probabilmente il suo maestro Domenico Maria Novara, affermò (dapprima brevemente nel *Commentariolus*, intorno al 1512 e poi diffusamente nel *De revolutionibus orbium caelestium*, 1543) la validità del sistema eliocentrico in cui la Terra – rimossa da centro dell'universo – e i pianeti girano intorno al Sole su orbite circolari non complanari e in cui la Terra ruota su se stessa e la Luna attorno alla Terra. Sostenuta senza riserve da personaggi come Giordano Bruno e confutata da teologi e scienziati illustri come Martin Lutero, Melantone e Tycho Brahe, la sua teoria non venne accettata dagli scienziati dell'epoca perché l'ipotesi delle orbite circolari forniva risultati discordanti dalle osservazioni quanto quelli della teoria tolemaica. Pubblicato dal suo discepolo Giorgio Retico, dichiaratamente come ipotesi, quando Coper-

nico era già in punto di morte (si spense a Frombork nel 1543), il *De revolutionibus* fu messo all'indice nel 1616, in seguito al clamore suscitato dall'inquisizione di Galileo. Anche se la teoria copernicana fu accettata solo un secolo più tardi, grazie alle osservazioni di Galileo, alla teoria di Keplero e infine alla formulazione della legge di gravitazione di Newton, a Copernico si riconosce di aver gettato il primo seme di quella rivoluzione culturale che toglieva l'uomo dal centro dell'universo.

La dedica del «De revolutionibus»

*

Al tempo di Copernico non c'era ancora alcun sospetto che il nuovo modello per spiegare il moto dei corpi celesti potesse suscitare la violenta reazione delle autorità ecclesiastiche di cui, un secolo dopo, farà le spese Galileo. Lo stesso Copernico, infatti, dedica la sua opera maggiore, il De revolutionibus orbium caelestium (La rivoluzione delle sfere celesti, 1543), al papa Paolo III, l'iniziatore della Controriforma.

Come appare dal brano che presentiamo, Copernico fu indotto a formulare la sua teoria dai contrasti esistenti fra gli astronomi (i «matematici»), cioè dal fatto che costoro, per mezzo delle teorie più tradizionali, non riuscivano a risolvere problemi semplici come stabilire esattamente la lunghezza dell'anno solare, necessaria per redigere il calendario; nonché dal fatto che le teorie tradizionali o non spiegavano adeguatamente i fenomeni concernenti i moti degli astri, come la teoria eudossiana delle sfere omocentriche, o turbavano la simmetria dell'universo introducendovi alcune irregolarità, come la teoria tolemaica degli eccentrici e del punto equante. Conscio della novità della sua ipotesi, Copernico cerca di attenuarla richiamandosi alle teorie degli antichi pitagorici,

ma al tempo stesso sottolineandone la capacità di spiegare tutti i fenomeni celesti come prova della sua verità. Infine si appella al papa contro i calunniatori, alludendo probabilmente agli attacchi che la sua teoria aveva suscitato nel mondo protestante.



De revolutionibus orbium caelestium, Dedicata

Ma forse la Tua Santità non si meraviglierà tanto che io ardisca dare in luce le mie riflessioni, dopo che mi assunsi per elaborarle tanto lavoro che non dubitai di confidare anche per lettera i miei pensieri sul movimento della Terra²¹, bensì si aspetterà soprattutto di udire da me come mi venne in mente di osare d'immaginare – contro l'opinione universalmente accolta dai matematici, e quasi contro il senso comune – qualche movimento della Terra. Così non voglio nascondere alla Tua Santità che nient'altro mi mosse a pensare a un altro modo di calcolare i movimenti delle sfere del mondo, se non che compresi che i matematici non sono fra loro stessi concordi nell'indagarli.

Infatti, innanzi tutto sono tanto incerti sul movimento del Sole e della Luna da non poter dimostrare e osservare la grandezza costante dell'anno che volge²². Poi, nel fissare i moti sia di queste, sia delle altre cinque stelle erranti

²¹ Allusione al *Commentariolus*, operetta non pubblicata in cui Copernico espose per la prima volta, nel 1512, la sua teoria. Il contenuto di essa, reso noto dal suo discepolo Retico nel 1540 con l'opera *Narratio prima*, suscitò la reazione negativa di Lutero e Melantone, perché sembrava contrastare con l'interpretazione letterale della *Bibbia*.

²² Il calendario giuliano, risalente a Giulio Cesare, stabiliva la lunghezza dell'anno in 365 giorni, più uno da aggiungersi ogni quattro anni (nell'anno bisestile). Questa misura era in eccesso di undici minuti, perciò si rese necessario un nuovo calendario, detto gregoriano perché adottato dal papa Gregorio XIII nel 1582, al fine di adeguare il computo degli anni alla posizione esatta del Sole. Ma questo al tempo di Copernico non era ancora stato fatto.

[i pianeti], non ricorrono agli stessi principi, né agli stessi assunti, né alle stesse dimostrazioni delle rivoluzioni e dei movimenti apparenti. Alcuni, infatti, ricorrono solo a cerchi omocentrici, altri a eccentrici e a epicicli²³, con cui, però, non conseguono appieno ciò che cercano. Perché coloro che confidano nei cerchi omocentrici, sebbene abbiano dimostrato di poter comporre con essi alcuni diversi movimenti, non hanno tuttavia potuto stabilire nulla di certo che risponda veramente ai fenomeni. Coloro, poi, che escogitarono gli eccentrici, quantunque sembrano avere calcolato esattamente, grazie a essi, la maggior parte dei movimenti apparenti, hanno intanto ammesso, tuttavia, molte cose che sembrano contravvenire ai primi principi dell'uniformità dei movimenti²⁴. E la cosa principale, ossia la forma del mondo e la certa simmetria delle sue parti, non poterono trovarla, né in tal modo ricostruirla; ma accadde loro come a [un artista] che traesse da luoghi diversi mani, piedi, testa e altre membra, di per sé bellissime, ma non formate in funzione dello stesso corpo, e non corrispondentisi affatto fra loro, per comporre piuttosto un mostro che un uomo²⁵.

²³ La teoria che spiega i moti dei pianeti ammettendo che ciascuno di essi sia infisso in un gruppo di sfere omocentriche, cioè aventi lo stesso centro (la Terra) e assi diversi, fu formulata da Eudosso di Cnido (IV secolo a.C.), su sollecitazione di Platone, e fu adottata con alcune modifiche da Aristotele. La teoria che invece prevede la rotazione dei pianeti su epicicli, cioè su circoli aventi per centro un punto che a sua volta ruota su un eccentrico (circolo avente un centro vicino al centro della Terra, ma non coincidente con esso), fu formulata da Apollonio di Perge (III secolo a.C.), Ipparco di Nicea (II secolo a.C.) e Tolomeo (II secolo d.C.).

²⁴ Tolomeo, per spiegare esattamente il moto dei pianeti, fu costretto ad ammettere un punto diverso dal centro della Terra, rispetto al quale tali moti risultassero di velocità uniforme, detto punto «equante», cioè capace di rendere il moto uguale, o uniforme. Secondo Copernico questa teoria contravviene all'uniformità dei movimenti dei pianeti.

²⁵ La simmetria dell'universo, cioè la sua regolarità, la sua perfezione (violata dalla teoria dell'equante), costituisce per Copernico un principio indiscutibile, poiché il mondo, in quanto creato da Dio, deve essere perfetto.

Così, nel processo di dimostrazione che chiamano *mégon*, si trovano ad aver tralasciato qualcosa di necessario o ad avere accolto qualcosa di estraneo e per nulla pertinente. Il che non sarebbe capitato se avessero seguito principi certi. Infatti, se le ipotesi da loro assunte non fossero fallaci, tutto quello che ne conseguirebbe sarebbe senza dubbio verificato²⁶. Ciò che dico è forse oscuro, ma diventerà più chiaro a suo luogo.

Pertanto, dopo avere a lungo riflettuto su questa incertezza dell'insegnamento delle matematiche a proposito della ricostruzione dei movimenti delle sfere dell'orbe, fui preso da irritazione per il fatto che nessun calcolo sicuro dei movimenti della macchina del mondo – creata per noi dal migliore e più perfetto artefice – fosse noto ai filosofi, che pure avevano scrutato con tanta cura le minime cose di questo mondo. Perciò mi assunsi l'impresa di raccogliere i libri di tutti i filosofi, che potessi avere, al fine di indagare se mai qualcuno avesse opinato che i movimenti delle sfere del mondo fossero diversi da quelli che ammettono coloro che insegnano matematiche nelle scuole. E trovai così innanzi tutto in Cicerone che Niceto aveva pensato che la Terra si muovesse²⁷. Poi anche in Plutarco trovai che altri ancora erano della stessa opinione, e per rendere accessibili a tutti le sue parole, pensai di trascriverle qui: «Altri pensano che la Terra sia ferma, ma Filolao il Pitagorico ritiene che si muova ruotando intorno al fuoco con un cerchio obliquo, alla stregua del Sole e della Luna. Eraclide Pontico ed Ecfanto il Pitagorico fanno pure muovere la Terra, ma non

²⁶ La falsità, cioè la non corrispondenza ai fenomeni, delle conseguenze che derivano dalle teorie precedenti è la prova della falsità di tali teorie. Nell'osservare questo Copernico si basa su una legge della logica aristotelica, secondo cui dal vero non può derivare il falso.

²⁷ Cfr. Cicerone, *Academica*, IV, 29. Colui che Copernico qui chiama Niceto è in realtà Iceta di Siracusa (V secolo a.C.), probabilmente un pitagorico.

attraverso lo spazio, bensì a guisa di ruota, da occidente a oriente, intorno al suo stesso centro»²⁸.

Di qui, dunque, imbattutomi in questa opportunità, presi anch'io a pensare alla mobilità della Terra. E quantunque assurda apparisse tale opinione, tuttavia poiché sapevo che ad altri prima di me fu concessa la libertà di immaginare alcuni circoli per indicare i fenomeni degli astri, pensai che anche a me sarebbe stato facilmente permesso sperimentare se, posto un certo movimento della Terra, si potessero trovare più ferme dimostrazioni di quel che fossero le loro, nella rivoluzione degli orbi celesti²⁹.

Pertanto, supposti i movimenti che più avanti nella mia opera attribuisco alla Terra, trovai finalmente, dopo molte e lunghe osservazioni che se si rapportavano alla circolazione della Terra i movimenti delle altre stelle e si calcolavano per la rivoluzione di ogni stella, non solo ne conseguivano i fenomeni di esse, ma anche gli ordini e le grandezze delle stelle e di tutti gli orbi, e lo stesso cielo così si connette che in nessuna sua parte può trasporsi qualcosa senza che ne derivi confusione nelle altre parti e nella sua totalità³⁰. Perciò anche nel seguito dell'opera seguii que-

²⁸ Cfr. Plutarco, *De placitis philosophorum*, III, 13. Filolao (V secolo a.C.) ammetteva la rivoluzione della Terra non intorno al Sole, ma intorno a un fuoco che stava al centro dell'universo. Eraclide Pontico ed Ecfanto (IV secolo a.C.) ammettevano invece la rotazione della Terra su se stessa. È curioso che Copernico non citi anche la teoria di Aristarco di Samo (III secolo a.C.), che ammetteva la rivoluzione della Terra intorno al Sole, esattamente come faceva lui stesso.

²⁹ Copernico assume come premessa il movimento della Terra e prova a vedere quali conseguenze ne derivano. A dire il vero, se tali conseguenze sono vere, cioè corrispondono ai fenomeni, non si ha ancora una prova della verità delle premesse (in quanto, sempre per una regola della logica aristotelica, il vero può derivare anche dal falso), ma almeno si evita la certezza della loro falsità, in cui invece incorrevano le teorie precedenti.

³⁰ Copernico afferma di avere trovato non solo che le conseguenze della sua teoria corrispondono esattamente ai fenomeni, ma anche che esse

st'ordine, e nel primo libro descrivo tutte le posizioni degli orbi con i movimenti che attribuisco alla Terra, affinché questo libro contenga quasi la costituzione generale dell'universo. Negli altri libri, poi, rapporto i movimenti delle altre stelle e di tutti gli orbi alla mobilità della Terra, affinché di lì si possa dedurre in quale misura sia possibile salvare i movimenti e le apparenze delle altre stelle e degli orbi, se si rapportano al movimento della Terra³¹. E non dubito che gli ingegnosi e dotti matematici mi approveranno se – come la filosofia innanzi tutto richiede – vorranno conoscere e ponderare non superficialmente, ma a fondo ciò che porto in quest'opera a dimostrazione di queste cose. E affinché i dotti come gli ignoranti vedano che per parte mia non mi sottraggo affatto al giudizio d'alcuno, ho preferito dedicare queste mie riflessioni alla Tua Santità, piuttosto che a qualunque altro, perché anche in questo angolo remotissimo della Terra, in cui vivo, sei giudicato il personaggio più eminente per la dignità del grado come per l'amore di tutte le lettere e anche delle matematiche; così tu potrai facilmente con la tua autorità e con il tuo giudizio trattenere il morso dei calunniatori, quantunque il proverbio dica che non esiste rimedio al morso dei sicofanti³².

N. Copernico, *De revolutionibus orbium caelestium*, a cura di A. Koyré, Einaudi, Torino 1975, pp. 15-23



rendono più connesso, cioè più unitario, l'intero universo, cosa che non accadeva alle teorie precedenti.

³¹ L'espressione «salvare le apparenze», cioè i fenomeni osservabili dei movimenti celesti, era già stata impiegata da Platone quando propose ai suoi discepoli il problema di spiegare i moti dei pianeti, in risposta al quale Eudosso formulò la teoria delle sfere omocentriche.

³² Copernico si rivolge al papa da Frauenburg, in Polonia, centro di cultura cattolica. I «calunniatori» a cui egli si riferisce sono forse i protestanti, cioè Lutero e Melantone, che avevano condannato la sua teoria in quanto non conforme alla Bibbia, perché questa fa dire a Giosuè «fermati o Sole», il che sembra implicare che il Sole si muova.

Copernico e Tycho Brahe

di Owen Gingerich

*



«Le Scienze» n. 67, marzo 1974

Nel barocco frontespizio dell'*Almagestum novum* di G.B. Riccioli, edito nel 1651, la musa dell'astronomia Urania tiene in mano una bilancia con la quale sta pesando il sistema del mondo copernicano in contrapposizione a quello ticonico. Nel sistema copernicano tutti i pianeti compiono una rivoluzione attorno al Sole. Nel sistema geocentrico proposto da Brahe vari decenni dopo la pubblicazione dell'opera di Copernico, il Sole compie una rivoluzione attorno alla Terra, in quiete al centro, trascinando con sé i restanti pianeti. Agli occhi di Riccioli il sistema geocentrico ticonico prevaleva nettamente nei confronti dell'eliocentrismo copernicano. Oggi il sistema di Brahe viene considerato un gigantesco passo indietro, ma il fatto più sconcertante è che esso sia stato proposto dall'astronomo più innovatore nel campo dell'osservazione che sia esistito a partire dall'antichità. L'audace progetto realizzato da Brahe per accrescere la precisione delle osservazioni lo colloca nella corrente principale della moderna astronomia con un diritto forse maggiore di quello dello stesso Copernico.

Nel maggio del 1973 feci una scoperta che contribuisce a collocare Brahe in una luce più favorevole. Insieme a un'edizione del *De revolutionibus orbium caelestium* conservata alla Biblioteca vaticana, trovai il manoscritto originale degli appunti cosmologici di Tycho. È forse inutile aggiungere che questa scoperta produsse in me una grande sorpresa. Questi appunti personali finora sconosciuti rivelano sul nascere la concezione cosmologica di Tycho e contengono i primi abbozzi del suo sistema planetario.

Per poter valutare in tutta la loro importanza questi appunti, è opportuno considerare sotto una nuova prospettiva il contesto dell'astronomia copernicana nel Cinquecento. Quando Copernico introdusse la sua ipotesi eliocentrica, la Terra divenne un membro della famiglia dei pianeti che compivano una rivoluzione su orbite eccentriche attorno al Sole. Copernico cercava un sistema che fosse «in accordo con la ragione» ed era particolarmente soddisfatto della sua ipotesi perché in base a essa i pianeti si disponevano senza forzature a partire dal Sole, collocato al centro, secondo l'ordine delle loro velocità, col pianeta più lento collocato nell'orbita più esterna (il pianeta più lento noto a quell'epoca era Saturno).

Il sistema planetario di Tycho Brahe, in cui la Terra riguadagnò la sua posizione centrale privilegiata, sembra invece a tutta prima rozzamente architettato. Più importante, nel contesto dell'astronomia cinquecentesca, un secolo prima di Newton, era il fatto che la Terra immobile del sistema ticonico si adattasse alle leggi accettate dalla fisica meglio di quanto non facesse il modello copernicano della Terra mobile. Tycho si duole che il sistema di Copernico «assegni alla Terra, questo corpo pesante, e pigro, non idoneo al movimento, un moto veloce come quello delle luci eteree, e per di più un triplice moto». Nondimeno, per la maggior parte dei contemporanei di Brahe, questa critica non aveva molto senso, poiché gli

astronomi del Cinquecento consideravano per lo più un sistema astronomico come un insieme di ipotesi geometriche non aventi alcun legame con la realtà fisica. La graduale accettazione di una fisica celeste integrata con la fisica terrestre, culminante nella sintesi newtoniana, fu indubbiamente l'aspetto scientifico più significativo della rivoluzione copernicana.

In definitiva, lo scopo di un modello planetario è la previsione delle posizioni dei pianeti. Sotto questo aspetto il sistema epiciclico geocentrico proposto da Tolomeo attorno al 140 d.C. dava ottimi risultati. Per poter essere considerata seriamente, qualsiasi proposta alternativa doveva consentire gli stessi risultati pratici. Copernico se ne rese ben conto; perciò solo poche pagine del *De revolutionibus* riguardano direttamente la cosmologia eliocentrica. Il grosso del volume è dedicato all'esposizione di particolari tecnici propedeutici a tavole che descrivono i moti dei pianeti. Nel Cinquecento Copernico era considerato un grandissimo matematico non per la sua cosmologia innovatrice, bensì per la sua abilità nel prevedere le posizioni dei pianeti.

In realtà le tavole del *De revolutionibus* non segnavano grandi progressi nei confronti di quelle tolemaiche. Il fatto non sorprende se si considera la scarsità dei dati d'osservazione sulla cui base le tavole dovevano essere calcolate. Copernico fu costretto a ricorrere in modo massiccio alle stesse osservazioni registrate da Tolomeo. Nessuno si rese conto pienamente delle imperfezioni delle tavole copernicane fino al decennio 1570-80, quando Brahe iniziò il suo enorme programma di osservazioni sistematiche, ovvero fu in grado di stabilire se esse segnavano o no un progresso.

Benché gli astronomi del tempo di Copernico possedessero solo strumenti alquanto primitivi, era nondimeno

possibile eseguire talune osservazioni in modo abbastanza preciso anche senza disporre di alcuno strumento. La più antica osservazione registrata di Copernico, risalente al 1497, era una di queste. Egli aveva allora ventiquattro anni e studiava diritto canonico all'università di Bologna. Terminati i suoi studi all'università di Cracovia, Copernico si era recato a perfezionarsi in Italia. Il 9 marzo egli osservò un occultamento di Aldebaran, la stella più splendente della costellazione del Toro, da parte della Luna, occultamento che ebbe luogo alle undici di sera. Più tardi egli si servì di quest'osservazione nel suo libro a conferma della variazione della distanza della Luna dalla Terra.

Nel 1503 Copernico, allora trentenne, fece ritorno in Polonia per prendere possesso del canonicato di Frombork, che gli era stato concesso grazie al benevolo interessamento dello zio Lucas Watzenrode, allora vescovo di Warmia. Copernico amministrò i beni della cattedrale e funse da segretario privato e medico personale dello zio vescovo. La sua posizione di canonico gli diede il tempo e i mezzi per dedicarsi alla sua attività di astronomo, e nel 1504 egli poté compiere con ogni probabilità una serie particolarmente interessante di osservazioni.

In quell'anno tutti e cinque i pianeti visibili a occhio nudo (Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno), e inoltre anche il Sole e la Luna, stavano entrando nella costellazione del Cancro, fornendo una serie spettacolosa di congiunzioni. Fenomeni così meravigliosi attraevano naturalmente l'attenzione degli astrologi; le congiunzioni di Saturno e di Giove, poi, sono così rare, presentandosi solo una volta ogni vent'anni, che veniva loro assegnata un'importanza grandissima in astrologia. A quell'epoca le posizioni dei pianeti venivano predette in base alle tavole alfonsine, che erano state compilate nel Duecento dagli astronomi di Alfonso X il Saggio, re di Castiglia e di León. Fondandosi sul sistema tolemaico, tali tavole predicevano

che Giove avrebbe superato Saturno il giorno 10, giorno in cui i pianeti sarebbero stati troppo vicini al Sole per poter essere osservati con agio. Si prediceva nondimeno che importanti congiunzioni di Giove con Marte avrebbero avuto luogo il 4 gennaio e nelle prime ore del 22 febbraio, e una congiunzione di Saturno con Marte doveva cadere il 18 marzo.

Chiunque avesse avuto un interesse per l'astronomia paragonabile a quello di Copernico non avrebbe potuto non osservare questi fenomeni. Come le occultazioni di stelle da parte della Luna, le congiunzioni tra i pianeti possono essere osservate con una certa precisione anche senza disporre di strumenti. Se Copernico osservò i pianeti nell'inverno del 1503-04 non poté non rendersi conto del fatto che le predizioni dell'almanacco erano sbagliate di un intervallo di tempo di circa dieci giorni. Pur non esistendo documenti scritti che attestino l'esecuzione di tali osservazioni da parte di Copernico, Jerzy Dobrzycki, dell'Istituto di storia della scienza di Varsavia, mi suggerì un indizio grazie al quale possiamo essere certi che l'astronomo polacco seguì i moti planetari nell'anno della grande congiunzione.

Nella biblioteca dell'università di Uppsala sono conservati molti volumi provenienti dalla biblioteca personale di Copernico, portati in Svezia nel 1627 dall'esercito di Gustavo Adolfo durante la Guerra dei trent'anni. Di particolare interesse sono due volumi d'astronomia rilegati in pelle, con decorazioni nello stile degli artigiani di Cracovia della fine del Quattrocento. Le legature suggeriscono che Copernico abbia comprato questi libri quando era ancora uno studente a Cracovia e che a quell'epoca, già profondamente interessato all'astronomia, abbia cominciato ad annotarli. Un volume comprende una effemeride per gli anni dal 1492 al 1506; l'altro include l'edizione delle tavole alfonsine per il 1492. Alla fine di questo

secondo volume sono rilegati col testo sedici fogli in più sui quali Copernico aggiunse tavole scritte in buon ordine e appunti miscellanei. In fondo all'ultima pagina sono scritte in latino le due frasi:

Mars superat numerationem plus quam gradus II

Saturnus superatur a numeratione gradus I½

ossia: «Marte supera i numeri di più di due gradi; Saturno è superato dai numeri di un grado e mezzo».

Per analizzare quest'affermazione criptica, non datata, possiamo servirci di uno strumento utilissimo reso disponibile per la prima volta molti anni fa grazie all'uso di un veloce calcolatore elettronico. Bryant Tuckerman, della IBM, calcolò le posizioni reali dei pianeti dal 601 a.C. al 1649 d.C., fornendo una norma con la quale si possono confrontare almanacchi ed effemeridi compilati dagli astronomi del passato. La longitudine predetta dalle tavole alfonsine per ciascuno dei pianeti superiori (Marte, Giove e Saturno) presenta un caratteristico errore periodico. Nel sistema tolemaico la posizione di un pianeta è predetta calcolandone il moto nel grande cerchio orbitale chiamato deferente, e componendolo col moto in un epiciclo, o cerchio secondario, il cui centro si sposta lungo la circonferenza del deferente. L'errore concernente il moto sul deferente e quello relativo al moto sull'epiciclo si compongono, cosicché il modello dell'errore risultante è tipico e riflette una combinazione dei due moti. In termini copernicani, l'errore nella previsione della posizione di un pianeta risulta dall'imprecisione delle conoscenze disponibili sul moto orbitale attorno al Sole sia della Terra sia del pianeta.

Dal grafico degli errori risulta che all'epoca delle congiunzioni, nei mesi di febbraio e di marzo del 1504, c'era una combinazione di errori quasi unica: Giove si trovava

quasi nella posizione predetta, mentre Saturno era in ritardo sulle predizioni di circa un grado e mezzo e Marte era in anticipo di poco più di due gradi. Se l'assenza di annotazioni concernenti Giove indica che la sua posizione a quell'epoca non presentava errori apprezzabili nei confronti della posizione predetta, questi valori corrispondono con precisione agli appunti non datati di Copernico. Le due righe scritte sull'ultima pagina della sua copia delle tavole alfonsine diventano così una prova del fatto che egli osservò le congiunzioni del 1504.

Sarebbe interessante sapere se siano stati o no questi fenomeni celesti a dare l'impulso iniziale al desiderio di Copernico di riformare l'astronomia. Se così fosse ci sarebbe un notevole parallelismo fra Copernico e Tycho, il quale, dopo altre tre grandi congiunzioni, decise di dedicarsi all'astronomia avendo constatato che c'erano ancora errori nelle effemeridi del 1563. A quell'epoca le tavole alfonsine presentavano un errore ancora maggiore per Saturno, cosicché la predizione della grande congiunzione era in ritardo di un mese. Le effemeridi calcolate da Giovanni Stadio sulla base delle tavole pruteniche (prussiane), che si fondavano a loro volta direttamente sull'opera di Copernico, funzionavano molto meglio, sbagliando la previsione solo di un giorno o due, ma quest'errore era ancora sufficiente a colpire il sedicenne Tycho.

Benché le discrepanze esistenti fra le tavole e i fenomeni celesti rendessero tanto più urgente agli occhi di Copernico la necessità di una riforma, egli non se ne servì mai come di un argomento probante a favore del suo sistema cosmologico radicalmente nuovo. Era questo un atteggiamento molto saggio; Copernico sapeva infatti che tali errori avrebbero potuto essere corretti modificando semplicemente i parametri del vecchio sistema. Egli argomentò invece a favore del suo sistema eliocentrico fondandosi su argomenti filosofici e cosmologici, e una considerazione su cui egli

puntò molto era la semplicità della sua ipotesi. Nel *Commentariolus*, un trattatello scritto attorno al 1512 che circolò soltanto in forma manoscritta, Copernico scrisse a proposito dei moti planetari: «Il problema, difficile e quasi inesplicabile, mi si presentò infine solubile con mezzi più esigui e molto più convenienti di quelli usati in passato, purché mi fossero concesse alcune *petitiones*, che chiamano assiomi». Copernico passò poi a delineare la sua nuova disposizione eliocentrica dei pianeti, indicando che i moti celesti apparenti avrebbero potuto essere spiegati supponendo un triplice moto della Terra stessa: la rotazione sul proprio asse, la rivoluzione orbitale attorno al Sole e la librazione, od oscillazione del suo asse, destinata a render ragione della precessione degli equinozi.

Oltre a proporre la concezione eliocentrica, Copernico assegnò praticamente la stessa importanza a un secondo principio filosofico: il concetto platonico-pitagorico secondo cui i moti celesti devono essere composti da movimenti circolari uniformi. Tale principio si risolveva in una forte critica nei confronti di uno tra i principali accorgimenti tolemaici: l'equante. Per capire bene il significato dell'equante e la forza di quest'argomentazione avanzata contro di esso, si devono considerare innanzitutto i principali caratteri del meccanismo planetario messo in opera da Tolomeo. La Terra era collocata in prossimità del centro di una serie di grandi cerchi deferenti, senza però coincidere con esso. Ogni pianeta si muoveva di moto circolare uniforme su un epiciclo il cui centro era collocato sul deferente. L'epiciclo produceva le periodiche retrogradazioni del pianeta in occasione delle quali l'astro sembrava fermarsi per qualche tempo e poi «muoversi all'indietro» nel cielo verso occidente per poi fermarsi di nuovo (stazione) e riprendere il suo abituale moto «diritto» verso oriente. Nel sistema copernicano l'epiciclo è

considerato il risultato del moto orbitale della Terra attorno al Sole: la retrogradazione di un pianeta superiore è causata dal movimento più veloce della Terra mentre lo sta superando. Nel caso di Marte l'irregolarità generata dall'epiciclo era tale da poter incidere per ben 45 gradi nella sua posizione rispetto alla previsione fondata sul solo movimento circolare uniforme sul deferente.

Oltre all'irregolarità del moto del pianeta prodotta dall'epiciclo, era richiesto anche un moto non uniforme del centro dell'epiciclo sul deferente. Per ottenere questo moto non uniforme Tolomeo escogitò l'equante: un asse del moto uniforme all'interno del deferente ma eccentrico rispetto a esso. Soltanto da tale posizione il pianeta avrebbe dato l'impressione di muoversi di moto circolare uniforme. Anche la Terra era collocata, inoltre, in posizione eccentrica ma nella direzione opposta. Nel caso di Marte l'equante e l'eccentricità potevano modificare il moto uniforme fino a 12 gradi d'arco verso est o verso ovest. L'uso dell'equante, dell'epiciclo e del deferente eccentrico diede a Tolomeo un'elasticità sufficiente a far fronte alle irregolarità del moto dei pianeti superiori e di Venere; ricorrendo a un ulteriore piccolo cerchio centrale egli riuscì anche a rendere ragione in modo soddisfacente del moto di Mercurio.

Copernico aprì il suo *Commentariolus* con un attacco all'equante tolemaico, che appariva violare il principio del moto circolare uniforme. «Un tale sistema non sembrava né sufficientemente assoluto né sufficientemente razionale», egli scrisse. «Essendomi reso conto di ciò, meditai spesso sulla possibilità di trovare una disposizione di cerchi più razionale, da cui dipendessero tutte le ineguaglianze apparenti, *muovendosi tutti i cerchi in sé di moto uniforme, come richiede il principio del moto assoluto.*» Uno tra gli obiettivi principali dell'opera di Copernico divenne perciò l'eliminazione geometrica dell'equante, che sostituì con un pic-

colo epiciclo. Ne seguì che, pur avendo semplificato il sistema planetario grazie all'eliminazione dei grandi epicicli, la sua devozione al principio del moto circolare uniforme lo costrinse a introdurre nuove complicazioni.

Alla fine del *Commentariolus* Copernico osservò: «Così dunque trentaquattro cerchi in tutto sono sufficienti a spiegare l'intera costruzione dell'universo e tutte le danze degli astri». Commentatori del secolo scorso diedero libero corso all'immaginazione per abbellire l'affermazione di Copernico, sostenendo, senza preoccuparsi di verificare la veridicità delle loro ossezioni, che all'epoca di Copernico il sistema di Tolomeo, di per sé abbastanza semplice, era stato sovraccaricato di decine di cerchi secondari.

Può darsi che alla formazione di questa leggenda abbia contribuito Alfonso X, alla fine del Duecento; al saggio sovrano è attribuita l'affermazione che, se fosse stato presente alla Creazione, egli avrebbe dato a Dio qualche utile suggerimento. Questo aneddoto alimentò la mitologia, cosicché un recente articolo dell'*Encyclopaedia Britannica* sostiene addirittura che per ogni pianeta si richiedevano da quaranta a sessanta epicicli!

Lo stesso tipo di analisi fatta con l'aiuto del calcolatore usato per decifrare la breve nota di Copernico su Marte e Saturno mi fu utile per seppellire questa popolare leggenda sulla grandissima complessità del sistema geocentrico nel basso medioevo. Al fine di verificare tale asserzione, ricalcolai con cura le tavole alfonsine nella loro totalità per dimostrare che esse si fondano sulla forma classica e semplice della teoria tolemaica con solo due o tre mutamenti marginali di un parametro. Usai poi queste tavole duecentesche per calcolare un'effemeride, giorno per giorno, per 300 anni. I risultati ottenuti furono poi messi a confronto con i precisi calcoli moderni, eseguiti da

Tuckerman, delle longitudini planetarie e ne emersero modelli ripetuti di errori che sono altrettanto tipici delle impronte digitali. Tutte le antiche effemeridi precopernicane, calcolate dai più importanti astronomi dell'epoca, dimostrano esattamente gli stessi tipi di errore. Ne concludi così che per la predizione delle posizioni dei pianeti fu usato solo lo schema tolemaico, con un solo epiciclo per ciascun pianeta.

È possibile che siano esistiti epicicli mobili su altri epicicli, che però non siano mai stati usati nella compilazione di almanacchi? Ricerche recenti su fonti islamiche compiute da E.S. Kennedy e da suoi allievi all'università americana di Beirut hanno rivelato che proprio modelli elaborati di questo tipo furono discussi da astronomi duecenteschi e trecenteschi della scuola di Maragha e in particolare da Ibn al-Shatir a Damasco. Come Copernico, essi erano guidati nella loro ricerca di modelli da considerazioni filosofiche ed è improbabile che il loro schema sia mai stato usato nel calcolo di vere tavole planetarie. Se Copernico sia giunto indipendentemente alla sostituzione dell'equante con un secondo epiciclo o se abbia ereditato questa soluzione dagli arabi attraverso qualche canale finora sconosciuto è un problema che non siamo in grado di risolvere con certezza.

Tra il 1520 e il 1530 Copernico si dedicò molto all'elaborazione delle sue teorie, e particolarmente alla teoria planetaria, se dobbiamo giudicare dalle osservazioni sul moto dei pianeti sparse qua e là nel *De revolutionibus*. A quell'epoca egli si trovava nella Polonia settentrionale, ma una quantità di compiti amministrativi lo distoglieva spesso dalle sue ricerche astronomiche. In questo periodo Copernico si affaticò nella stesura di un trattato monumentale paragonabile per vastità all'*Almagesto* di Tolomeo. Esso doveva includere i due principi che il Sole si trova al centro del sistema solare e che i moti planetari

sono composti di moti circolari uniformi. I moti celesti risultarono più complicati di quanto egli avesse supposto nel *Commentariolus*. In particolare, le linee degli apsidi, ovvero le linee congiungenti la Terra e i punti equanti nel sistema tolemaico, apparivano dotate di un lento moto di rotazione rispetto alle stelle fisse. Soltanto poche osservazioni, alcune delle quali contraddittorie, erano state tramandate e Copernico si sobbarcò un lavoro lungo e frustrante per venirne a capo. Infine abbandonò i doppi epicicli del *Commentariolus* a favore del deferente eccentrico e di un solo epiciclo, una disposizione che rendeva conto più facilmente dello spostamento degli apsidi. Egli conservò nondimeno il doppio epiciclo per Mercurio, ma non per sostituire l'equante bensì il cerchio centrale addizionale postulato esclusivamente per tale pianeta da Tolomeo. Alla fine Copernico riuscì a cavarsela accumulando un numero di piccoli cerchi superiore perfino a quello di Tolomeo.

La maggior parte del *De revolutionibus* è dedicata a un'analisi particolareggiata dei moti del Sole, della Luna e dei pianeti mediante combinazioni di cerchi grandi e piccoli. Quest'analisi, unitamente a un commento di tipo matematico e alle tavole astronomiche, costituisce il 96 per cento del volume. Soltanto una ventina di pagine sono dedicate alla nuova cosmologia eliocentrica. I primi capitoli passano in rassegna le antiche argomentazioni a favore di un'immagine del mondo geocentrica insieme a controargomentazioni di tono curiosamente medievale. Essi lasciano ben poco prevedere quanto sarà presentato nel capitolo X «Sull'ordine delle sfere celesti». Tale capitolo è una squillante difesa del sistema eliocentrico fondata interamente sull'estetica, e in particolare sul principio di semplicità. In una possente perorazione dell'immagine eliocentrica dell'universo, Copernico scrive: «Al centro di tutto sta il Sole. Chi infatti, in questo bellissimo tempio,

avrebbe potuto disporre questa lampada in un posto migliore di quello da cui possa illuminare nello stesso tempo il tutto?... E certo il Sole come da un soglio regale governa la famiglia degli astri che gli ruotano attorno».

Il sistema eliocentrico offriva una spiegazione elegante del moto retrogrado, compresi taluni particolari che non avevano una spiegazione razionale nello schema tolemaico. Inoltre, nella disposizione dei pianeti attorno al Sole, anche gli intervalli che li dividevano non erano più arbitrari, ma venivano pienamente spiegati dall'architettura del tutto. È questa, sicuramente, una tra le considerazioni estetiche più persuasive a favore della cosmologia copernicana. Poche persone, nel Cinquecento, compresero però l'armonica unità estetica che Copernico vedeva nel cosmo.

Il pensiero che Copernico stesse parlando di un sistema reale dev'essere sparito rapidamente dalla mente di quei pochi astronomi che riuscirono ad aprirsi faticosamente la via nella restante parte del trattato. L'applicazione del secondo principio estetico di Copernico, quello del moto circolare uniforme, era lungi dall'essere scevra di ambiguità. Come Tolomeo, anch'egli si soffermava qua e là per accennare a disposizioni geometriche alternative. Il colpo decisivo a una qualsiasi realtà fisica dei piccoli epicicli planetari, se ce ne fosse stato bisogno, fu inferto nel VI libro, dove Copernico fu costretto ad adottare, per la previsione delle latitudini delle posizioni planetarie, espedienti diversi da quelli messi in opera per la previsione delle longitudini. Benché pochi lettori siano mai riusciti a spingersi fino a questo punto, la natura ipotetica delle costruzioni era stata asserita al principio dell'opera, non da Copernico, in verità, ma dal curatore anonimo dell'opera in una prefazione: «Al lettore sulle ipotesi di quest'opera». La gran parte dei maggiori astronomi dei decenni seguenti era al corrente che

autore di tale prefazione era un teologo luterano, Andreas Osiander, il quale aveva probabilmente preferito non firmarsi in considerazione del fatto che l'opera era scritta da un cattolico ed era dedicata al papa. Nella prefazione di Osiander si asseriva che l'autore, conformemente al compito tradizionale degli astronomi, aveva escogitato ipotesi che consentivano di calcolare le posizioni dei pianeti per qualsiasi tempo. «Ma tali ipotesi non hanno bisogno di esser vere e neanche verosimili – egli scrisse – bensì è sufficiente che forniscano un calcolo in accordo con le osservazioni.»

Un attento lettore del *De revolutionibus* interessato unicamente ai particolari tecnici del sistema planetario può aver trovato grande soddisfazione nella fedeltà di Copernico al principio del moto circolare uniforme, e sicuramente sarebbe stato d'accordo con l'analisi di Osiander, mentre d'altra parte un lettore più incline alla speculazione filosofica, cogliendo il carattere estetico del principio eliocentrico, avrebbe potuto trovarsi in violento disaccordo con Osiander.

Ma il *De revolutionibus* ebbe in realtà qualche lettore attento? Questo interrogativo sorse in una conversazione che ebbi tre anni fa con un altro studioso di Copernico, Jerome Ravetz. Giungemmo allora alla conclusione che è probabilmente più elevato il numero delle persone vive oggi che abbiano letto con attenzione il *De revolutionibus* rispetto a quello delle persone che lo lessero attentamente nell'intero Cinquecento. Contammo sulle dita di due mani i candidati cinquecenteschi: 1) Giorgio Joachim detto Retico, il matematico di Wittenberg che si recò in Polonia e persuase Copernico a pubblicare l'opera; 2) Erasmo Reinhold, il professore di Wittenberg che rimase in patria e che più tardi compose le *Tabulae prutenicae*, fondate sull'opera di Copernico; 3) Giovanni Schöner, lo studioso di Norimberga che si occupò da vicino della stampa del libro e a cui Retico indirizzò la sua prima

relazione edita a stampa sul sistema copernicano; 4) Tycho Brahe; 5) Cristoforo Clavio, il gesuita tedesco che progettò la riforma del calendario gregoriano; 6) Michele Maestlin, l'insegnante d'astronomia di Keplero; 7) Giovanni Keplero stesso.

A quell'epoca godevo dell'anno di congedo per ricerche dallo Smithsonian Astrophysical Observatory. Due giorni dopo la conversazione con Ravetz, mi capitò di visitare la notevole Crawford Collection di libri astronomici rari al Royal Observatory di Edimburgo, dove ammirai, tra i pezzi di maggior pregio, una copia della prima edizione del *De revolutionibus*, accuratamente annotata con inchiostri leggibili di vario colore. Esaminando il libro, mi resi conto che le annotazioni, intelligenti e precise, erano state redatte sicuramente prima del 1551, ossia a non più di otto anni di distanza dalla pubblicazione dell'opera, avvenuta nel 1543. Le conclusioni da me raggiunte due giorni prima nella conversazione con Ravetz sembravano d'improvviso demolite poiché mi sembrava poco probabile che, se i lettori attenti del *De revolutionibus* erano così rari come avevo supposto, la prima copia che mi capitava di vedere dopo quella discussione fosse così ben annotata.

A questo punto mi venne in mente una seconda idea: forse la copia della Crawford Collection era stata annotata da uno dei pochissimi astronomi che avevamo menzionato. L'elenco si ridusse rapidamente a Retico, Reinhold e Schöner, gli unici attivi prima del 1550. Prove di carattere interno suggerirono che il lettore dovesse essere Erasmo Reinhold, il cui nome non compariva nel libro ma le cui iniziali E R erano ancora leggibili nella decorata rilegatura originale. Nel giro di pochi istanti da questa scoperta il mio entusiasmo iniziale fu offuscato quando, presa un'impronta della copertina, appoggiando su di essa un foglio di carta bianca e sfregando con una matita, apparve una lettera S di cui non mi ero accorto essendo essa ricoperta

da una macchia. Venivo ad avere così le iniziali E R S, che mi riportavano in alto mare. Solo due settimane dopo, lavorando al British Museum e alla Royal Astronomical Society, accertai che Reinhold associava sempre al suo nome l'aggettivo *Salveldensis*, dal nome della sua città Saalfeld; si aveva così un perfetto accordo con le iniziali. Infine riuscii a procurarmi altri campioni della grafia tipica di Reinhold e il problema fu così risolto al di là di ogni possibile dubbio.

Una tra le annotazioni più interessanti contenute nella copia di Reinhold appare sul frontespizio, dov'egli aveva scritto in latino: «L'assioma dell'astronomia: il moto celeste è circolare e uniforme o composto di parti circolari e uniformi». Reinhold era manifestamente affascinato dalla fedeltà dimostrata da Copernico al principio del moto circolare, mentre la scarsità di annotazioni nelle prime venti pagine dimostrano che egli non era particolarmente interessato al principio eliocentrico. Evidentemente egli accettava l'asserzione di Osiander secondo cui l'astronomia si fondava su ipotesi. Reinhold era particolarmente interessato agli aspetti geometrici dell'ipotesi di Copernico e all'intera idea di meccanismi alternativi per esprimere i moti dei pianeti. In tutti i punti in cui, nel *De revolutionibus*, apparivano tali alternative, egli segnò nei margini vistose enumerazioni in numeri romani.

Reinhold viene spesso annoverato tra i primi fautori della cosmologia eliocentrica per aver pubblicato le tavole pruteniche, utilissime per calcolare le posizioni dei pianeti sulla base dell'opera di Copernico. La natura delle tavole è nondimeno tale da renderle del tutto indipendenti da qualsiasi sistema cosmologico. Benché l'introduzione di Reinhold sia inoltre piena di elogi a Copernico, il professore di Wittenberg non menziona mai la cosmologia eliocentrica. Dato il grande interesse da lui manifestato per i meccanismi alternativi, c'è ragione di sospettare che Rein-

hold fosse in procinto di scoprire indipendentemente il sistema ticonico, ma morì di peste nel 1553, a quarantadue anni, prima di poter formulare speculazioni cosmologiche proprie. Eccitato dal successo ottenuto nella identificazione della copia di Reinhold, decisi di esaminare il maggior numero possibile di copie del libro al fine di accertare l'identità dei lettori e dei proprietari, nella speranza di trovare altri appunti interessanti. Per tre anni ricercai sistematicamente copie del libro in posti così vari e distinti fra loro come Budapest e Boston, Leningrado e Louisville, Copenaghen e San Juan Capistrano. Nel corso di queste ricerche vidi e fotografai copie annotate da Keplero (a Lipsia), da Maestlin (a Sciaffusa), da Tycho (una seconda edizione, a Praga) e da Retico (una copia donata dall'autore, conservata nel Connecticut). Trovai anche copie annotate da astronomi che avevamo dimenticato di inserire nell'elenco originario: dal compilatore di effemeridi Giovanni Stadio (copia conservata all'Accademia militare di West Point) e da Caspar Peucer, il successore di Reinhold alla cattedra di astronomia a Wittenberg (copia conservata all'Osservatorio di Parigi). In tutto, fino alla primavera scorsa, riuscii a vedere 101 copie del *De revolutionibus*. Questa ricerca confermò che il libro aveva avuto lettori poco attenti, almeno tra coloro che sono abituati a leggere con la penna in mano. Nonostante ciò, ebbi l'impressione che il libro avesse avuto una cerchia di lettori casuali molto maggiore di quanto non si ritenga comunemente.

Nel maggio 1973 ebbi l'opportunità di visitare Roma, dove c'erano sette copie della prima edizione che non avevo ancora esaminato. Mi recai dapprima alla Biblioteca vaticana, dove arrivai armato di signature fornitemi dal mio collega polacco Dobrzycki. Alcuni tra i volumi presenti alla Biblioteca vaticana vi erano pervenuti con l'eccentrica regina Cristina di Svezia, la quale aveva abdicato al trono nel 1654, abbandonando il suo regno prote-

stante per Roma. Il padre di lei Gustavo Adolfo aveva saccheggiato durante la Guerra dei trent'anni l'Europa settentrionale e tra le altre cose si era impadronito della maggior parte della biblioteca personale di Copernico. Dobrzycki si era recato a Roma alla ricerca di materiali copernicani che la regina Cristina poteva aver portato con sé trasferendosi in Italia. Alla Vaticana egli trovò tra i manoscritti una copia del *De revolutionibus* non catalogata. Poiché il libro era stato pubblicato proprio mentre Copernico stava morendo, Dobrzycki sapeva che tale copia non poteva essere appartenuta a Copernico e così passò allo studio di altri materiali. Fortunatamente per me, egli mi diede la segnatura del volume, che non avrei potuto trovare nei cataloghi della Vaticana.

Quando esaminai questa copia, mi resi conto che le estese annotazioni sui margini dovevano essere opera di un astronomo di grandi capacità. Alla fine del volume erano rilegate trenta pagine manoscritte di estremo interesse, piene di diagrammi eseguiti da qualcuno che lavorava nella stessa direzione di Tycho e datati 1578. Sul volume non c'era alcun nome e congetturai che gli appunti potessero essere dell'astronomo gesuita Cristoforo Clavio poiché non avevo ancora trovato la sua copia del *De revolutionibus*. Eccitatissimo da questa possibilità, mi misi in contatto con D.J.K. O'Connel, l'ex direttore della Specola vaticana. Col suo aiuto riuscii ad avere xero copie di due lettere di Clavio conservate negli archivi dei gesuiti. Tornai ansioso alla Biblioteca vaticana, dove la mia ipotesi crollò nel giro di pochi minuti. Non c'era alcuna possibilità che la mano che aveva annotato il *De revolutionibus* fosse quella di Cristoforo Clavio.

Lasciai Roma deluso e turbato per prendere parte a un congresso su Copernico che si teneva a Parigi. Quivi, per una coincidenza fortunatissima, ricevetti il nuovo facsimile

della copia della seconda edizione del *De revolutionibus* conservata a Praga e contenente annotazioni di mano di Tycho. Il cuore mi si fermò per un istante quando vidi la grafia del facsimile: mi resi conto allora che la copia della prima edizione che avevo visto a Roma era anch'essa annotata probabilmente di pugno da Brahe. Quella che avevo trovato alla Biblioteca vaticana era la copia di lavoro originale di Tycho, forse il più importante manoscritto di Brahe che si sia conservato. La seconda edizione, conservata a Praga, era una copia derivata dalla prima; essa era stata annotata da Tycho nella prospettiva di una pubblicazione.

Modificai le prenotazioni dei miei voli e tornai a Roma. Dopo avere messo l'uno accanto all'altro il facsimile di Praga con la copia della Vaticana, bastarono pochi minuti per fugare tutti i miei dubbi. Successivamente i bibliotecari della Vaticana confermarono che il libro era appartenuto alla regina Cristina, la quale ne era entrata in possesso nel 1648, quando le sue truppe si erano impadronite, a Praga, delle collezioni raccolte dall'imperatore Rodolfo II.

Sul frontespizio della copia di Tycho conservata alla Vaticana appaiono le stesse parole che Reinhold aveva scritto sulla sua copia: «L'assioma dell'astronomia: i moti celesti sono circolari e uniformi o composti di parti circolari e uniformi». Avevo già accertato che nel 1575, tre anni prima delle annotazioni datate presenti in questo volume, Tycho aveva fatto visita al figlio di Reinhold a Saalfeld e aveva visto i manoscritti di Reinhold. Conoscendo questo fatto, avevo congetturato che le concezioni cosmologiche di Tycho avessero ricevuto l'impulso decisivo a Wittenberg da una tradizione che onorava Copernico ma seguiva l'ammonizione di Osiander secondo cui il compito dell'astronomo si riduce alla concezione e all'elaborazione di ipotesi, nell'impossibilità di raggiungere in alcun modo le vere cause. La copia di Tycho così venuta in luce confermò in modo clamoroso quest'eredità intellettuale, non solo

mediante il motto sul frontespizio, ma anche, all'interno del libro, attraverso numerose annotazioni copiate parola per parola da Reinhold. In particolare, Tycho, come Reinhold, segnò specificamente in margine con numeri le varie disposizioni alternative di cerchi indicate da Copernico. Come Reinhold, Tycho deve aver visto in Copernico semplicemente l'inventore di modelli geometrici ipotetici. L'aspetto più interessante del volume vaticano è costituito dalle trenta pagine manoscritte alla fine del volume. Si tratta chiaramente dei primi appunti di Tycho sul proprio sistema geocentrico. In principio è la data «27 gennaio 1578»: il giorno dopo l'ultimo avvistamento della spettacolare cometa apparsa nel 1577. I diagrammi contenuti sulle prime due pagine sono eliocentrici e una nota in un angolo specifica che il disegno era stato eseguito sulla base della terza ipotesi di Copernico, corrispondente a una delle enumerazioni di mano di Tycho Brahe che compaiono in margine al volume stampato.

Diagrammi disegnati circa tre settimane dopo presentano per la prima volta una disposizione geocentrica e Tycho osserva: «Questo nuovo tipo di ipotesi fu da me scoperto il giorno 13 febbraio del [15]78». Raramente possiamo stabilire con tanta precisione il momento di una scoperta vecchia di secoli! In una serie di carte Tycho indagò posizioni alternative del singolo epiciclo per Venere e della coppia di epicicli per Mercurio.

Due giorni dopo, nella pagina immediatamente successiva, Tycho tracciò il diagramma più interessante dell'intera sequenza. È facile riconoscere in esso un sistema proto-ticonico: la Terra è situata al centro, circondata dalla Luna e dal Sole. Tycho collocò le orbite di Mercurio e di Venere attorno al Sole. Egli dispose ancora i tre pianeti superiori in orbite attorno alla Terra, ma diede a ciascun epiciclo la stessa grandezza dell'orbita solare. Egli

tracciò allora una linea dalla Terra al centro di ciascuno dei tre epicicli e congiunse il centro di ogni epiciclo al relativo pianeta con una linea verticale. Questa linea verticale corrisponde in tutti i casi alla distanza Terra-Sole in virtù dell'eguaglianza degli epicicli e dell'orbita solare. Tutto quel che occorre per finire la costruzione del sistema ticonico nella sua versione definitiva è completare il parallelogramma congiungendo con una linea retta il Sole e ciascun pianeta superiore.

Tycho era ormai in vista della versione finale del suo sistema. La didascalia da lui apposta al diagramma è nondimeno degna di nota: «Sfera delle rivoluzioni, dalle ipotesi di Copernico, adattata all'immobilità della Terra». Tycho stava muovendosi sul piano astronomico-geometrico, nella più assoluta fedeltà al modello copernicano, e veniva formulando l'ipotesi che un sistema geocentrico fosse compatibile con l'insegnamento eliocentrico del maestro.

È curioso il fatto che Tycho non pubblicò il suo nuovo sistema se non un decennio dopo. All'epoca in cui redasse queste note, Tycho era un giovane di trentun anni, già ben sistemato nell'isola di Hven, ma forse ancora incerto sulla direzione in cui lo avrebbero portato le sue osservazioni intraprese al fine di riformare l'astronomia. Un passo del *De mundi cetherei recentioribus phamomenis* ci rivela che egli non ideò certo il sistema ticonico fin verso il 1583, cinque anni dopo aver disegnato questi diagrammi. Posso supporre soltanto che quei cinque anni abbiano coinciso con un periodo di grande maturazione. Nel frattempo Tycho deve aver speculato sul movimento della grande cometa del 1577, comprendendo che essa avrebbe infranto le sfere cristalline dell'antica astronomia, se fossero esistite, nel suo moto attraverso il cielo. Forse egli cominciò a ricercare una maggiore certezza nel campo dell'astronomia e a supporre che le osservazioni compiute con gli strumenti giganti di cui era dotato il suo osservatorio di

Uraniborg avrebbero potuto condurre, al di là dell'ipotesi, alla realtà fisica. In tal caso, come i suoi contemporanei in quest'epoca prenewtoniana, predinamica, egli deve aver considerato la fisica della Terra, pigra e grave, un fenomeno importantissimo da salvare. Possiamo immaginarci come Tycho, con l'adozione del proprio sistema geocentrico, fosse convinto di compiere un grande passo avanti verso la comprensione della realtà fisica dell'universo.

Fatto abbastanza curioso, il sistema ticonico conservò molti tra i vantaggi offerti da Copernico: le orbite planetarie erano legate fra loro in un'unità coerente e i moti retrogradi erano spiegati in modo «naturale». Benché questo schema concedesse ben poco alle proprietà speciali del Sole tra i pianeti, esso preservava con la massima cura l'unicità veneranda della Terra centrale. Nell'architettura del sistema di Brahe mancava però un elemento di importanza capitale per l'ulteriore sviluppo della fisica. Nel sistema copernicano i pianeti sono ordinati armonicamente, dal Sole verso l'esterno, secondo la durata crescente del periodo di rivoluzione. Proprio questo elemento avrebbe aperto la via alla matematizzazione e alla meccanicizzazione dell'universo.

Osservato retrospettivamente, il sistema ticonico, che sembrava avere un peso tanto grande nella bilancia di Urania, ci appare rozzo ed errato: un monumentale passo indietro. Tycho viene perciò oggi rifiutato come cosmografo ed esaltato come il geniale costruttore di strumenti le cui osservazioni sistematiche fornirono le basi delle leggi di Keplero. Keplero, a sua volta, è salutato come il «numerologo» le cui orbite ellittiche vanificarono infine l'antico postulato dei componenti circolari uniformi per i moti celesti.

Confrontato allo schema ticonico, il sistema eliocentrico appare oggi a noi, posteri di Newton, nitido e ordinato. Di fatto, è proprio quest'elegante organizzazione

che Copernico trovò conforme alla ragione e che lo condusse alla sua cosmologia. All'inizio del *De revolutionibus* egli scrisse: «In questa disposizione scopriamo perciò una meravigliosa simmetria dell'universo e un legame armonico tra i movimenti delle sfere e le loro dimensioni quali non possono essere trovati in alcun altro modo».

Proprio in questa disposizione Keplero vide la reale possibilità di una fisica celeste e fece il primo passo, ancora a tastoni, verso una dinamica celeste che, riplasmata e formulata in modo geniale da Newton, si dimostrò in definitiva la primaria giustificazione dell'universo eliocentrico. Può darsi che la visione kepleriana di una fisica cosmica abbia influito sullo sviluppo della scienza in modo assai più significativo che non la scoperta delle tre leggi dei moti planetari. È possibile inoltre che la stessa insistenza di Tycho, su un'astronomia fisicamente accettabile e non semplicemente ipotetica, abbia influito sulla concezione della natura dell'universo del giovane Keplero. Nella scia di questa tradizione, sia Keplero sia Galileo ci hanno insegnato a usare i nostri sensi per distinguere tra le varie ipotetiche immagini del mondo, accettando solamente quelle coerenti con le osservazioni.

Soltanto nella nostra generazione abbiamo imparato a infrangere i legami che ci tengono avvinti alla Terra; gli uomini in volo verso la Luna hanno visto la Terra ruotare, azzurro pianeta viaggiante nello spazio. Veniva così giustificata con l'evidenza l'audace concezione di Copernico. Il concetto del moto della Terra, visto da lui soltanto con gli occhi della mente, divenne il primo passo essenziale verso una fisica che abbracciava sia la Terra sia il cielo. Così il quinto centenario della nascita di Copernico finisce con l'essere in realtà anche una celebrazione delle origini della scienza moderna e della nostra attuale comprensione dell'universo. È dunque opportuno che, in-

sieme al famoso astronomo polacco, onoriamo anche i suoi illustri successori: Keplero, Newton e, sotto una nuova luce, Tycho Brahe.



Owen Gingerich è professore emerito di astronomia e storia della scienza all'università di Harvard e *senior astronomer emeritus* allo Smithsonian Astrophysical Observatory.

Le ossa di Copernico

di Dennis Danielson

*



«Le Scienze» n. 492, agosto 2009

Nel 2005 uno scavo archeologico riportò alla luce i resti di Niccolò Copernico (1473-1543). O almeno, questa era l'ipotesi, che però andava confermata. Perciò gli archeologi polacchi al lavoro nella cattedrale di mattoni rossi di Frombork – dove Copernico aveva ricoperto la carica di amministratore e, nel tempo libero, aveva ideato una nuova cosmologia – chiesero aiuto agli specialisti della polizia. Senza rivelare il nome della «vittima», inviarono il cranio al laboratorio centrale della scientifica, a Varsavia. E la ricostruzione al computer delle sembianze di un rugoso settantenne corrispondeva così da vicino all'auto-ritratto di Copernico in età più giovane che i ricercatori si dichiararono certi al 97 per cento che quello fosse realmente il volto del celebre astronomo. Prove ancora più recenti, basate sull'analisi del DNA, indicano che la loro conclusione era corretta.

Ma lo studio dell'eredità di Copernico non è certo iniziato tre anni fa. Egli è considerato da molti il fondatore della scienza moderna, grazie alla sua teoria, proposta all'inizio del Cinquecento, che il globo su cui viviamo

non si trova al centro dell'universo, ma appartiene a una classe di corpi sferici in rotazione, i pianeti, che orbitano intorno al Sole. Il prestigio e il fascino di Copernico sono tali che da 400 anni gli scienziati lo considerano come una specie di patrono. Oggi tuttavia, sembrano aprirsi nuove opportunità per ricostruire con maggiore esattezza, oltre ai lineamenti del volto di Copernico, anche la sua eredità scientifica.

A metà del Novecento, l'astronomo Hermann Bondi chiamò in causa Copernico per sostenere la cosmologia dello stato stazionario, proposta da lui e da due colleghi di Cambridge. Bondi coniò il termine di «principio copernicano» (CP, da *Copernican Principle*) per esprimere il concetto che la Terra «non si trova in una posizione centrale, particolarmente favorita» nell'universo. Da allora il CP continua a essere accettato dagli scienziati, anche dopo il declino della cosmologia dello stato stazionario.

Nel 1973, anno del quinto centenario della nascita di Copernico, Stephen Hawking e George Ellis pubblicarono il volume *The Large Scale Structure of Space-Time* e «arruolarono» il principio copernicano a beneficio della cosmologia del big bang. La geometria di questo universo in espansione (a grande scala) è tale che esso appare identico in tutte le direzioni, indipendentemente dalla posizione dell'osservatore. Perciò la negazione della centralità proposta da Copernico è entrata a far parte di quello che oggi è denominato modello standard.

Ma Hawking ed Ellis, anziché limitarsi a un'interpretazione della geometria cosmica, ammisero esplicitamente che alla loro concezione del CP non era estraneo «un elemento ideologico»: «Dall'epoca di Copernico, la Terra è stata via via retrocessa al ruolo di un pianeta di medie dimensioni che ruota intorno a una stella di medie dimensioni ai margini esterni di una galassia del tutto normale, che a sua volta è semplicemente una compo-

nente di un gruppo locale di galassie. In effetti, ormai siamo così democratici da non ritenere che la nostra posizione nello spazio si distingua *per qualsiasi aspetto* [il corsivo è un'aggiunta]».

Eppure oggi la crescente consapevolezza dell'insostenibilità storica di un'interpretazione così allargata del CP, insieme all'accumularsi di obiezioni di natura scientifica, stanno spingendo alcuni cosmologi a ipotizzare che il principio copernicano sia pronto per la sepoltura.

La diffusa interpretazione «pessimista» del principio copernicano, e dell'opera di Copernico in generale, diventa sempre più debole via via che gli studiosi si rendono conto che né l'astronomo né i suoi seguaci consideravano l'allontanamento della Terra dal centro dell'universo come una diminuzione. Secondo Aristotele, la cui teoria fisica fu la più accettata fino al Seicento secolo inoltrato, la sfera terrestre stava immobile nel centro dell'universo perché la terra (uno dei quattro elementi insieme con aria, acqua e fuoco) era la più pesante di tutte le sostanze, e il centro dell'universo era il luogo dove andavano a collocarsi gli oggetti pesanti. Perciò era semplicemente la pesantezza della Terra, e non la sua nobiltà o privilegio, a spiegare la centralità cosmica di noi terrestri.

Per di più, gli scrittori del medioevo e del Rinascimento non interpretavano affatto quella posizione come eccelsa. Dante, nell'*Inferno*, fece coincidere i più profondi gironi infernali con il centro della Terra, che quindi costituiva il centro esatto dell'universo. Nel 1486, nell'*Orazione sulla dignità dell'uomo*, opera spesso considerata come un manifesto dell'umanesimo, il filosofo Giovanni Pico della Mirandola affermò che la Terra occupava «le parti vili e turpi del mondo inferiore». In questa prospettiva, all'epoca assai diffusa, il centro era dunque associato a una connotazione

spregiativa. Nel 1568, un quarto di secolo dopo la morte di Copernico, il filosofo francese Michel de Montaigne scrisse che l'uomo è «relegato nella sporcizia e nell'impurità del mondo, inchiodato e incatenato alla parte peggiore e più putrida dell'universo, nel piano più basso della casa, e più remoto rispetto all'arca celeste [...]».

La centralità della Terra era vista quindi assai più come un esilio che come una posizione dominante. Ma Copernico spezzò quei vincoli. Il primo resoconto dell'uso del telescopio in astronomia – il *Sidereus Nuncius* di Galileo del 1610 – contiene l'emozionata e fiera affermazione dell'autore che la Terra (essendo un pianeta) non è più esclusa «dal novero degli astri erranti [...] e dimostreremo che gira e supera lo splendore della Luna, e non è sentina delle terrestri sordidezze e brutture».

Dove la cosmologia aristotelico-tolemaica implicava che la posizione della Terra fosse bassa e umile, Galileo poteva sentire la nuova prospettiva copernicana dell'umanità come esaltante, perfino presuntuosa.

L'altro grande copernicano dell'inizio del Seicento secolo, Giovanni Keplero, vide anch'egli la nuova posizione planetaria della Terra come una promozione cosmica. Ora potevamo immaginarci impegnati in «un periplo annuale su questa imbarcazione che è la nostra Terra, per eseguire le nostre osservazioni... Non vi è globo più nobile o più adatto all'uomo della Terra», che occupa una posizione «esattamente nel mezzo dei globi principali... Sopra di essa vi sono Marte, Giove e Saturno. Entro l'abbraccio della sua orbita girano Venere e Mercurio, mentre al centro ruota il Sole [...]». Solo con l'*abolizione* del geocentrismo, quindi, si poteva dire che occupiamo una posizione astronomica ottimale.

L'interpretazione opposta, negativa, di una Terra «decentrata» sembra sia nata in Francia oltre un secolo dopo

la morte di Copernico. Cyrano de Bergerac, pur non citando alcuna prova, associa il sistema geocentrico precopernicano con «l'insopportabile arroganza dell'Umanità, la quale si illude che la Natura sia stata creata solo per servirla». Più influente fu l'opinione di Bernard le Bovier de Fontenelle che nelle *Conversazioni sulla pluralità dei mondi* loda Copernico – che «prende la Terra e la scaccia dal centro del Mondo» – per avere umiliato «la Vanità degli uomini che si erano innalzati al seggio più eminente dell'universo».

Questa fu l'immagine di Copernico accettata e propagata dall'Illuminismo, magistralmente illustrata nel 1810 dalle parole di Johann Wolfgang von Goethe: «Nessuna scoperta o opinione ebbe mai un effetto più grande sullo spirito umano degli insegnamenti di Copernico», poiché egli costrinse la Terra «ad abbandonare il colossale privilegio di essere il centro dell'universo».

Questo ritratto pessimistico e ideologico di Copernico è tuttora accettato dalla maggioranza degli insegnanti e degli scienziati. Anche cosmologi attenti come Paul Davies, dell'Arizona State University, continuano a dire che il modello geocentrico di Tolomeo rappresentava l'umanità – per «naturale corollario» – come «il culmine della creazione divina» e quindi che Copernico ne determinò la retrocessione cosmica. Ma è sempre più chiaro che un simile quadro non va accettato acriticamente e che i suoi sostenitori dovranno portare argomenti più solidi di «elementi ideologici» e convinzioni vecchie di 200 anni. Una copiosa documentazione storica indica che, come afferma il cosmologo Don Page dell'università dell'Alberta, «di per sé la rivoluzione copernicana non comportò l'abbandono di una posizione privilegiata al centro dell'universo, ma spesso fu interpretata come un'esaltazione dell'umanità, dalle profondità di un fetido pozzo alla più celestiale collocazione su un pianeta».

E oggi come viene visto il principio associato al nome di Copernico? Ho chiesto a un gruppo di cosmologi e astronomi qual era la loro opinione in proposito. Il resto di questo articolo si basa sull'insieme delle loro risposte, che si sono dimostrate sorprendentemente diverse tra loro.

Tranne che su un punto: quasi tutti rifiutano uno dei concetti che i primi teorici dello stato stazionario associavano al principio copernicano. Bondi, infatti, non asseriva solo che l'universo debba apparire identico indipendentemente dalla posizione dell'osservatore nello spazio; proponeva anche un «principio cosmologico perfetto» in base a cui «l'universo mostra lo stesso aspetto da qualunque posizione in qualunque momento». Le successive elaborazioni del modello standard hanno distrutto il sogno di una perfezione cosmologica uniforme e immutabile nel tempo.

Harvey Richter, studioso di astronomia stellare all'università della British Columbia, fa osservare che determinati tipi di evoluzione delle galassie sono un presupposto necessario per la comparsa e il mantenimento di forme di vita: «Per esempio, è necessario un certo livello di elementi pesanti, che vengono sintetizzati nell'interno delle stelle in processi di lunga durata. Perciò molti miliardi di anni fa non avremmo potuto essere "qui"».

Che l'epoca attuale sia speciale è indicato anche da uno sguardo nel futuro. Virginia Trimble dell'università della California a Irvine, spiega che molte galassie, compresa la nostra, hanno un problema di «ultimo respiro»: «L'attuale riserva di gas interstellare non potrà sostenere a lungo la velocità di formazione stellare che si osserva oggi. Alcuni, seguendo una sorta di "ortodossia copernicana", affermavano che l'apporto di gas primordiale avrebbe potuto conservare la disponibilità di gas ai livelli attuali per almeno altri 10-15 miliardi di anni, per cui la situazione odierna è nella media». Ma poiché «la velocità di formazione stellare è andata decrescendo continuamente a par-

tire da circa metà dell'età attuale dell'universo, si può dire che viviamo in un momento per certi versi speciale». Infatti i processi che si riteneva potessero garantire la sostenibilità galattica sono in via di esaurimento.

Se il principio cosmologico perfetto di Bondi e dei teorici dello stato stazionario avesse bisogno di ulteriori confutazioni, Lawrence Krauss dell'Arizona State University e Robert Scherrer della Vanderbilt University hanno recentemente pubblicato uno studio che tenta di anticipare le condizioni che esisteranno tra 100 miliardi di anni. Se vi saranno ancora osservatori, potranno esaminare la nostra galassia perché è gravitazionalmente legata. Ma, a causa dell'espansione accelerata del cosmo nel suo complesso, le altre galassie saranno diventate invisibili e anche la radiazione cosmica di fondo non sarà rilevabile.

Così, nel lontano futuro, la stessa espansione cosmica risulterà celata, insieme a tutti i fossili che oggi ci permettono di studiare l'archeologia dell'universo. È per questo che Krauss e Scherrer prevedono la «fine della cosmologia». Per gli abitanti di questo cosmo del lontanissimo futuro, quindi, l'espansione che ci impedisce di credere in un universo statico sarà invisibile, ed essi non avranno alternative al «modello standard dell'universo del 1900». In un simile modello, la galassia è l'universo. Scomparsi i principali indizi dell'evoluzione cosmica, l'illusione di una stasi sovratemporale potrebbe avere la sua rivincita.

Per ora, tuttavia, considerata la mole delle prove contrarie, l'ipotesi di un'omogeneità temporale a grande scala è chiaramente da scartare in partenza. Da un punto di vista cronologico, ci troviamo effettivamente in prossimità del centro, ovvero in quella che appare sempre più come una sorta di età dell'oro cosmologica. Krauss e Scherrer concludono così: «Viviamo in un'epoca molto speciale dell'evoluzione dell'universo: l'epoca in cui possiamo verificare

per via osservativa che viviamo in un'epoca molto speciale dell'evoluzione dell'universo!».

Anche passando dal tempo allo spazio c'è una notevole unanimità nei confronti della geometria associata al principio copernicano. Copernico è noto per aver dichiarato che «non esiste un solo centro»; affermazione che Galileo confermò puntando il suo telescopio al cielo e scoprendo i quattro «astri medicei» intorno a Giove. Ma oggi i cosmologi si spingono ancora più avanti, dichiarando sia che *non c'è* un centro (unico), sia che il centro è *ovunque*. Come è possibile?

Come osserva il premio Nobel Steven Weinberg, il principio copernicano è coerente con la geometria dello spazio-tempo implicita nella metrica di Robertson-Walker, che descrive un universo sferico in quattro dimensioni. L'analogia più semplice è una sfera tridimensionale (una palla perfettamente tonda) sulla cui superficie si trovano, in punti diversi, alcune coccinelle. La superficie della sfera è il loro «spazio». Ogni coccinella potrebbe pensare di essere al centro del suo spazio, dato che l'ambiente spaziale mostra le stesse caratteristiche geometriche in tutte le direzioni: è isotropo. E in un certo senso avrebbe ragione, perché in qualunque direzione effettui una misura, si troverebbe equidistante dal limite esterno del suo spazio. Tuttavia, se affermasse che la sua particolare posizione è il centro, diremmo che sbaglia perché sappiamo che le misurazioni eseguite da tutte le altre coccinelle sulla sfera danno esattamente gli stessi risultati.

Allo stesso modo, nell'universo del modello standard ogni punto dello spazio si comporta geometricamente come se fosse il centro. Non solo questa affermazione – spesso detta «principio di mediocrità» – è coerente con l'asserzione del principio copernicano che non c'è un unico centro, ma in realtà le due proposizioni sono le facce di una stessa medaglia. Sulla nostra sfera, le osservazioni di ciascuna

coccinella sembrano effettuate da un punto di vista centrale; ma, da una prospettiva più ampia, si può interpretare ogni posizione non tanto come centrale, quanto come mediocre, o semplicemente tipica: una conseguenza dell'isotropia e dell'omogeneità di questo «universo».

L'idea che il nostro universo, dal punto di vista spaziale, sia isotropo e omogeneo è nota come «principio cosmologico». Secondo Jim Peebles, uno dei pionieri moderni della cosmologia fisica, fu «introdotto come un presupposto filosofico *ad hoc* di lavoro», secondo un metodo che «potrebbe rispecchiare l'influenza del principio copernicano». Ma ora, spiega, «le osservazioni hanno parlato» e il principio cosmologico «ha fatto il suo tempo».

Del terzetto di principi che abbiamo citato, quello cosmologico è dunque il meno problematico. Esso dichiara la propria identità già nel nome: è di natura cosmologica e il suo contenuto è, senza ambiguità, geometrico e scientifico. Gli altri due, viceversa, sembrano invitare interpretazioni scientifiche divergenti. Alla domanda di quale sia, secondo loro, il rapporto tra principio copernicano e principio di mediocrità, Paul Davies risponde di usarli «come sinonimi»; Wendy Freeman, che dirige i Carnegie Observatories di Pasadena, in California, replica semplicemente: «Nessun rapporto».

Un problema ancora maggiore sia del principio copernicano sia di quello di mediocrità sono le inferenze non scientifiche che ne sono state tratte, sia da scienziati sia da non specialisti. Come abbiamo già detto, fin dalla metà del Seicento l'eredità di Copernico ha frequentemente fornito supporto ad argomentazioni «misanthropiche». Se aggiungiamo a questa tendenza la potenziale ambiguità, o addirittura l'offensività, di termini come «mediocre», «non speciale» e «non privilegiato», non c'è da stupirsi che spesso il rigore scientifico abbia ceduto il passo a dilettoneschi sproloqui filosofici. Persino libri di testo

molto diffusi, come *Cosmology* di Edward Harrison, presentano la «rinuncia al privilegio cosmico dell'umanità» come conseguenza del progresso della scienza.

Supponiamo comunque di limitare il principio copernicano e il suo gemello geometrico, il principio di mediocrità, ai loro ruoli scrupolosamente scientifici. Non è comunque vero che Copernico e il processo da lui avviato hanno reso la Terra e i suoi abitanti assolutamente minuscoli rispetto alla grandezza dell'universo?

L'affermazione di Copernico che l'orbita terrestre è incommensurabilmente piccola in rapporto alla grandezza della sfera delle «stelle fisse» comportò un ampliamento del volume dell'universo pari a non meno di nove ordini di grandezza. E questo accadeva prima che l'astronomia telescopica dispiegasse visioni di immensità senza fine. Non sorprende dunque che un astronomo esperto come Jay Pasachoff del Williams College concluda: «Non ritengo che la Terra o la specie umana abbiano un significato speciale nel cosmo». Nelle parole di Peebles si coglie quasi una vena poetica crepuscolare: «Siamo frammenti assolutamente trascurabili, un pizzico di polvere, nel grande progetto della natura».

Tuttavia alcuni scienziati consigliano cautela riguardo chiavi di lettura tanto «pessimistiche» della storia della cosmologia. Usando parole che forse sarebbero piaciute allo stesso Copernico, Freedman afferma che «c'è differenza tra essere in un luogo significativo e fare qualcosa di significativo». Possiamo non essere nulla di particolare «a scala cosmica, ma il fatto che, come specie, abbiamo sviluppato la curiosità di osservare lo spazio e di porci queste domande è comunque molto significativo».

Queste riletture del ruolo cosmico della Terra e dei suoi abitanti sono ispirate da tre tendenze attualmente domi-

nanti in cosmologia, tutte direttamente correlate a problemi di scala o massa dell'universo. La più ovvia, come già suggerito da Richter, consiste nel riconoscere che non potremmo esistere se l'universo non fosse così grande, e quindi così antico. Sarebbe dunque vano lamentare la nostra piccolezza rispetto all'immensità del cosmo, dal momento che la nostra stessa esistenza dipende da quelle proporzioni colossali.

Oltre a ciò, si riconosce sempre più chiaramente quanto sia atipica, dal punto di vista cosmico, la materia di cui siamo fatti. Le stime più recenti indicano che la materia barionica – gli atomi di cui sono fatti galassie, stelle ed esseri umani – costituirebbe non più del cinque per cento della massa totale dell'universo (il resto sarebbe materia oscura ed energia oscura). Jaymie Matthews dell'università della British Columbia, che si occupa della ricerca di pianeti extrasolari, osserva che «solo tre decenni fa ritenevamo di essere composti dagli ingredienti primordiali fondamentali dell'universo: la farina della Ricetta Cosmica. Oggi siamo considerati il condimento, o forse (mi piace pensare) le spezie».

E aggiunge: «Questo ci rende insignificanti? Solo se preferite pranzare in un mondo dove le spezie non esistono».

Perciò il «problema della grandezza» può avere due facce. Superficialmente, quanto più l'universo è grande tanto più piccoli e insignificanti ci sentiamo in rapporto a esso. D'altra parte, quanto più l'universo è grande e per lo più troppo caldo, troppo freddo o comunque ostile alla vita, tanto più eccezionali, rari e speciali sembrano essere l'habitat terrestre e l'esistenza cosciente.

La terza tendenza riguarda non tanto la rarità della nostra posizione o della nostra esistenza, quanto il carattere speciale, la regolazione fine, dell'universo osservabile

nel suo complesso. L'esistenza di un cosmo in cui (per esempio) possono formarsi le stelle, che forniscono i pre-requisiti per la vita basata sul carbonio, appare così altamente improbabile che molti cosmologi hanno proposto scenari con un numero molto elevato, o addirittura infinito, di altri universi possibili o reali. La motivazione per simili proposte di «multiverso» deriva almeno in parte dal desiderio di bilanciare le probabilità che si oppongono all'esistenza di un universo così assolutamente speciale come il nostro.

Perciò, anche riconoscendo che forme di vita potrebbero esistere altrove nell'universo, dichiara Don Page, è del tutto possibile che la vita stessa sia «cosmologicamente speciale, dato che potrebbe svilupparsi solo in una frazione molto piccola dell'universo o multiverso». In ogni caso, perché dovremmo lasciarci convincere che grande è meglio? Certamente, afferma Page, «chiunque può riconoscere che la sola dimensione o frazione dell'universo occupata da forme di vita non è poi così importante».

A questo punto, in che situazione si trovano Copernico e il principio copernicano? La semplice risposta è: non necessariamente nella stessa. Copernico raggiunse i suoi grandi risultati perché cercava la bellezza nella struttura del mondo; non era soddisfatto di modelli che si limitavano a «salvare le apparenze» (voleva sapere come funziona *realmente* l'universo); si aspettava una concordanza tra natura e matematica; e si rendeva conto che la posizione, il moto e la partecipazione degli osservatori sono fattori da prendere in considerazione per ottenere un quadro scientificamente coerente del cosmo.

Molti dei temi che compaiono nell'attuale agenda cosmologica – teoria delle stringhe, inflazione, misure di anisotropia, le discussioni sul multiverso, effetti di sele-

zione antropica e così via – sono sostenuti e guidati da questi solidi impulsi copernicani. In questo senso, Copernico è ancora vivo e attuale.

Il principio cosmologico è in buona salute, ma potrebbe stare anche meglio se si distaccasse totalmente dal suo *alter ego* che esibisce la stessa sigla «CP». Anche il principio di mediocrità può continuare a essere utile, ma solo se limitato all'unico ambito nel quale è realmente valido: la geometria cosmologica. Il principio copernicano vero e proprio, viceversa, è nei guai. Page lo definisce «un'ipotesi di lavoro che, nel suo ristretto significato originario, trova sempre meno consensi».

Altri lo considerano già defunto. Max Tegmark è tra i più ansiosi di scriverne l'epitaffio. Se gli si chiede un'opinione sul CP, risponde semplicemente che «è erroneo e ormai storicamente superato». Citando diversi parametri di particolarità e regolazione fine di cui abbiamo già parlato nell'articolo, sostiene che «è chiaramente erroneo anche nella regione di spazio che possiamo osservare (ci troviamo in una galassia anziché in un vuoto intergalattico, il nostro pianeta ha la caratteristica insolita di essere abitabile, viviamo sulla sua superficie anziché nel suo più voluminoso interno, e così via)».

Il principio copernicano conserva un suo valore, dichiara Tegmark, solo «perché è esempio di come anche i grandi scienziati possono sbagliare».

Quindi è estremamente evidente che almeno alcuni scienziati siano pronti a seppellirlo. Secondo Tegmark, questo intero capitolo della cosmologia potrebbe essere suggellato in maniera molto semplice: «CP RIP».



Dennis Danielson è uno storico che si occupa della rivoluzione scientifica e degli aspetti storici, letterari e culturali dell'astronomia. È preside dell'English Department all'università della British Columbia. L'autore esprime la sua sincera gratitudine a Paul Davies, George Ellis, Wendy Freedman, Owen Gingerich, Lawrence Krauss, Jaymie Matthews, Don Page, Jay Pasachoff, Jim Peebles, Martin Rees, Harvey Richer, Leonard Susskind, Max Tegmark, Virginia Trimble e Steven Weinberg. L'originale di questo articolo è stato pubblicato su «American Scientist», gennaio-febbraio 2009.

IN SINTESI

di

Piergiorgio Odifreddi

Proviamo a tornare con la mente a 2000 o 2500 anni fa, in un villaggio o una città della Grecia antica. Che cosa si poteva fare la sera, in uno di questi luoghi? Non essendoci (fortunatamente) la televisione, si poteva sedersi nel cortile della propria casa, oppure in mezzo ai prati, e guardare il cielo. Uno spettacolo meraviglioso, tra l'altro, perché all'epoca non esistevano le luci elettriche, e dunque neppure l'inquinamento luminoso: quindi si vedeva un bel cielo nero pieno di stelle.

Ci si accorse rapidamente che in cielo c'erano, anzitutto, due oggetti diversi dagli altri. Uno era il Sole, che si vedeva di giorno e illuminava completamente il cielo, impedendo la vista di tutto il resto. L'altro era la Luna, che era all'incirca della stessa grandezza del Sole, ma si vedeva principalmente di notte e brillava molto meno. C'erano poi le stelle visibili a occhio nudo. Esse ruotavano tutte insieme

nel corso della notte, attorno a un punto fisso che oggi è la Stella Polare. Poiché non cambiavano le proprie posizioni reciproche, furono chiamate per l'appunto «stelle fisse». Infine, a parte il Sole, la Luna e le stelle fisse, i cui moti erano abbastanza regolari, c'erano cinque altri oggetti luminosi che si muovevano invece in maniera molto strana, e che i greci chiamarono appunto *planètes* (erranti).

Gli scienziati dell'epoca, dopo aver osservato il cielo, cercarono di capire quali fossero i moti di questi corpi celesti. Non era difficile immaginare quelli delle stelle fisse: si poteva infatti pensare che esse fossero tutte ancorate a una sfera che ruotava intorno alla Terra. Ma spiegare il moto dei pianeti, delle stelle erranti, era molto più complicato. Ci si misero in parecchi, e dovettero confrontarsi con varie anomalie, perché questi corpi celesti andavano a volte avanti in una direzione, poi tornavano indietro in direzione contraria, poi ripartivano di nuovo, e così via. Era molto complicato cercare di stabilirne il moto, ma alcuni dei grandi scienziati dell'antichità ci riuscirono: in particolare, Eudosso e Ipparco.

Una grande sintesi della visione antica del cosmo fu effettuata da Tolomeo. Il suo nome si legò per secoli a quello del «sistema tolemaico», che dava ragione dei moti celesti come venivano visti dalla Terra. Il sistema tolemaico divenne col passare dei secoli, soprattutto dopo che se ne appropriarono gli scolastici, l'«ortodossia» della visione del mondo. Anche se la descrizione matematica di Tolomeo era

molto complicata, e comprendeva orbite circolari, i «deferenti», sui quali ruotavano i centri di orbite più piccole, gli «epicicli».

Questo sistema rimase fisso e immutabile per più di un millennio, ma nel 1543 arrivò un abate polacco di nome Copernico, che rivoluzionò la visione tolemaica del mondo. Copernico immaginò di essere non sulla Terra, ma sul Sole, e si accorse che da quel punto di osservazione i pianeti sembravano semplicemente girare in tondo, secondo orbite circolari. Egli ritenne dunque più semplice adottare un sistema in cui il Sole, e non la Terra, fosse il centro del sistema di riferimento.

Oggi noi sappiamo che i sistemi di Tolomeo e di Copernico sono assolutamente equivalenti, da un punto di vista matematico. Quello di Tolomeo è più complicato, perché descrive le cose da un punto di osservazione non privilegiato. Poiché la Terra è uno dei pianeti che girano intorno al Sole, se noi vogliamo descrivere il moto degli altri pianeti visti dalla Terra, dobbiamo naturalmente aggiungere la sua orbita (l'epiciclo) all'orbita di questi pianeti attorno al Sole (il deferente). Il sistema tolemaico è dunque più complicato di quello copernicano, ma in fondo risolveva un problema più complicato: non il moto dei pianeti attorno al Sole, bensì il loro moto attorno alla Terra.

Copernico fu avversato soltanto quasi un secolo dopo la sua morte, quando Galileo si impossessò del suo sistema e i filosofi e i teologi iniziarono a discuterne. Porre la Terra al centro dell'universo

era in accordo con una visione antropocentrica del mondo. Porre il Sole al centro, no. Anzi, era come dire che in fondo la Terra è soltanto uno dei tanti pianeti, senza una posizione privilegiata nel cosmo. E, in particolare, era come dire che gli uomini che vivono sulla Terra non hanno nulla di speciale. Dunque, difficilmente possono essere stati creati «a immagine e somiglianza di Dio».

In realtà, come abbiamo detto, i sistemi di Tolomeo e Copernico sono soltanto due modi diversi, ma equivalenti, di guardare a una stessa realtà. È per questo che ne abbiamo parlato insieme in un unico volumetto: il primo in cui, invece di affrontare soltanto idee matematiche astratte, come quelle di Pitagora e Archimede, si incominciano ad affrontare visioni scientifiche concrete, applicate alla descrizione del mondo.

Margherita Hack è nata a Firenze il 12 giugno 1922 e si è laureata in fisica nel gennaio 1945 con una tesi di astrofisica. Ha passato una vita fra le università di Firenze, Milano e poi di Trieste dove ha vinto la cattedra di astronomia nel 1964 e dove ha diretto il locale osservatorio astronomico dal '64 all'87 e il dipartimento di astronomia dall'85 al '97 portandoli a riconosciuto livello di eccellenza internazionale. Dal '97 è professore emerito dell'Università di Trieste. È membro dell'Unione astronomica internazionale, membro onorario della Società astronomica italiana, e membro della Società italiana di fisica e della Società Europea di Fisica. È stata membro di vari consigli scientifici della NASA e dell'Agenzia spaziale europea (ESA) e visiting professor presso varie università e istituti di ricerca europei e americani.

Ha dato alle stampe più di 250 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali e una ventina di libri sia di livello universitario che di divulgazione. Negli anni '40 ha svolto attività atletica a livello agonistico vincendo due campionati universitari nel salto in alto e in lungo ed è arrivata terza a due campionati italiani assoluti.

Nel 1998 ha avuto il premio Sport e Scienza dell'Associazione Nazionale Azzurri d'Italia.

Nel 2004 ha avuto il premio Grinzane Cavour per la divulgazione scientifica. È socio nazionale dell'Accademia dei Lincei.

