



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Scienze Storiche, Geografiche e dell'Antichità

Corso di Laurea in Storia

La rivoluzione copernicana e il nuovo paradigma della
scienza rinascimentale

Relatore:
Professor Giovanni Silvano

Laureando:
Lorenzo Pasinato
Matricola: 1231012

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Indice generale

1. INTRODUZIONE.....	6
2. LA NUOVA SCIENZA NEL RINASCIMENTO.....	8
3. RIVOLUZIONI O EVOLUZIONI?.....	12
4. LA TRADIZIONE ASTRONOMICA ANTICA.....	14
4.1. L'eredità di Aristotele e la Chiesa.....	17
5. I PRECURSORI DELLA TEORIA ELIOCENTRICA: FU DAVVERO COPERNICO IL PRIMO A PORRE IL SOLE AL CENTRO?.....	19
5.1. I Pitagorici.....	19
5.2. Platone.....	22
5.3. Eraclide Pontico ed Ecfanto.....	24
5.4. Aristarco e Seleuco.....	25
6. ALLA BASE DELLE RIVOLUZIONI: NUOVI PARADIGMI.....	28
7. COPERNICO: VITA, STUDI E SVILUPPI CHE PORTARONO ALLA REDAZIONE DEL <i>DE REVOLUTIONIBUS</i>	32
8. LA RIVOLUZIONE COPERNICANA.....	41
8.1. Gli sviluppi in campo astronomico dopo Copernico.....	44
8.2. Ulteriori progressi fino a Newton.....	47
9. CONCLUSIONI.....	50

1. INTRODUZIONE

Questo lavoro si concentra nell'analizzare il passaggio tra scienza antica e scienza moderna che si verificò nel corso del Rinascimento, con particolare attenzione alla rivoluzione che più di qualsiasi altra incarna il nuovo spirito scientifico del tempo: la rivoluzione copernicana.

Il nuovo sapere che si sviluppa è caratterizzato da una fiducia nelle capacità conoscitive dell'uomo, dall'abbandono dei principi trascendenti precedentemente utilizzati per spiegare la realtà naturale, dalla rivalutazione dei sensi e dell'esperienza diretta e dalla pretesa di un sapere che non sia solo contemplativo, ma anche pratico e operativo. Nel '500 è ancora in vigore un concetto di scienza legato a una visione del mondo di tipo qualitativo, ma è con il '600 che si afferma una concezione della scienza come un sapere oggettivamente verificabile: la scienza moderna infatti respinge dal proprio ambito qualsiasi problematica di tipo metafisico, per concentrarsi invece solo sulle cause dei fenomeni, alla ricerca di leggi verificate da esperimenti elaborati in termini matematici. Proprio questa matematizzazione della natura porta a una cruciale riforma del metodo di indagine e all'adozione di modelli meccanici utili per spiegare i fenomeni naturali.

2. LA NUOVA SCIENZA NEL RINASCIMENTO

Nel passaggio dal Medioevo all'età moderna si può subito notare una marcata discontinuità fra le tradizioni scientifiche che caratterizzano questi due periodi: la natura dei moderni viene interrogata in condizioni artificiali, infatti le esperienze dei moderni sono esperimenti artificialmente costruiti al fine di confermare o falsificare teorie; il sapere scientifico dei moderni assomiglia all'esplorazione di un nuovo continente, quello dei medievali al paziente approfondimento dei problemi sulla base di regole codificate. I temi che furono centrali nel corso di questa rivoluzione furono il rifiuto della concezione sacerdotale o ermetica del sapere, la nuova valutazione della tecnica, i tentativi di impiegare i modelli della filosofia meccanica e l'introduzione della dimensione del tempo nella considerazione dei fatti naturali.

Presso gli antichi era in vigore una concezione antropomorfa del mondo, che privilegiava le sensazioni e i comportamenti e le percezioni dell'uomo. La scienza moderna invece non è nata sul terreno della generalizzazione di osservazioni empiriche, ma su quello di un'analisi capace di astrazioni, capace cioè di abbandonare il piano del senso comune, e il principale strumento che rese possibile la rivoluzione concettuale della fisica fu la matematizzazione della fisica.

In ambito cosmologico i presupposti che fu necessario abbattere e abbandonare per costruire una nuova astronomia furono la divisione dell'universo in due sfere (una perfetta e l'altra soggetta al cambiamento), la convinzione del carattere necessariamente circolare dei moti celesti e il presupposto dell'immobilità della Terra e della sua centralità nell'universo. Nel 1609 Galilei, servendosi del cannocchiale, iniziava una serie di osservazioni che verranno poi rese pubbliche nel *Sidereus Nuncius*: egli si rese conto che la superficie della Luna “non è affatto liscia e uniforme e di sfericità esattissima, come di essa e degli altri corpi celesti una numerosa schiera di filosofi ha ritenuto, ma al contrario diseguale...¹”. Altra figura fondamentale fu Copernico, il quale però non assunse nessun atteggiamento rivoluzionario: scrisse infatti la sua opera

1 P. Rossi, *La nascita della scienza moderna in Europa*, Roma-Bari, Laterza 2005.

principale, il *De revolutionibus orbium coelestium*, in continuo parallelismo con l'Almagesto di Tolomeo (Keplero osservò che egli più che interpretare la natura aveva interpretato Tolomeo). Copernico elaborò quattro punti che dovevano dare luogo a una nuova scienza: ci sono due centri di rotazione; il centro della Terra non coincide con il centro dell'universo; tutte le sfere ruotano attorno al Sole; tutti i moti che appaiono nel firmamento non derivano da moti del firmamento, ma dal moto della Terra; ciò che ci appare come movimenti del Sole non deriva dal moto del Sole stesso, ma dal moto della Terra.

Alle radici della grande rivoluzione scientifica del Seicento sta la compenetrazione fra tecnica e scienza che era assente nella civiltà antica e in quella medievale. Le sette arti liberali del trivio e del quadrivio si chiamano liberali perché sono le arti proprie degli uomini liberi in quanto contrapposti ai non liberi o schiavi che esercitano le arti meccaniche o manuali. In generale far entrare gli strumenti nella scienza e concepirli come fonti di verità non fu una impresa facile. Si sviluppa un po' alla volta un sapere nel quale l'attenzione per le opere e la ricerca empirica fossero preminenti rispetto a un sapere esclusivamente verbale. Nel *De humani corporis fabrica* Andrea Vesalio prende posizione contro la dicotomia che si è creata nella professione del medico. La letteratura del Quattrocento e del Cinquecento è straordinariamente ricca di trattati di carattere tecnico; inoltre nasce un tipo di sapere che ha a che fare con la progettazione di macchine ad opera di ingegneri che vengono così ad assumere una posizione di prestigio pari o superiore a quella del medico. Il gesto, storico o leggendario che sia, di Carlo V che si piega a raccogliere il pennello a Tiziano è il simbolo del passaggio degli artisti a un nuovo status sociale. Leonardo da Vinci è stato l'uomo che ha incarnato il superamento dell'antica separazione fra arti meccaniche e arti liberali, fra le operazioni delle mani e quelle della mente.

La comunicazione e la diffusione del sapere ma anche la pubblica discussione delle teorie non sono state sempre avvertite come valori. Queste ultime devono essere integralmente comunicabili e non riservate a una cerchia ristretta di persone. Scrive William Gilbert "Impieghiamo talvolta parole nuove. Ma non, come fanno gli

alchimisti, per velare le cose ma perché le cose nascoste risultino appieno comprensibili”².

Nella letteratura scientifica dissimulare, non rendere pubbliche le proprie opinioni vuol dire solo truffare o tradire: la segretezza, per la scienza, è diventata un disvalore. Le Accademie che presero vita nel Seicento non si ponevano come scopo la trasmissione del sapere, erano luoghi dove venivano scambiate informazioni e realizzati in comune esperimenti. Alla base di queste istituzioni sta una domanda di lavoro collettivo, in particolare l’esigenza di sottoporre i prodotti dell’ingegno alla critica degli altri. La prima organizzazione definibile come società scientifica fu l’Accademia dei Lincei che ebbe origine nel 1603 e della quale entrò a far parte Galilei. In Francia nel 1666 venne fondata la Academie Royale des Sciences, che divenne un luogo per la ricerca direttamente finanziato dallo Stato (al suo interno venne effettuato il calcolo del raggio terrestre e il calcolo della distanza tra la Terra e il Sole). A Londra la Royal Society fu ufficialmente costituita nel 1662, ma a differenza di quella francese era del tutto indipendente dallo Stato. In Germania, sulle orme del progetto ipotizzato da Leibniz di una grande Accademia dotata di una grande autonomia, la Societas Regia Scientiarum fu fondata nel 1700, e qualche anno dopo Federico II le fece assumere il nome di Accademia Reale Prussiana delle Scienze.

Fra la riscoperta degli antichi e il senso del nuovo che caratterizzano la cultura del Rinascimento, i maggiori esponenti della rivoluzione scientifica ebbero, nei confronti dell’antichità, un atteggiamento molto diverso da quello degli umanisti: basti pensare che Bacone e Cartesio negano il carattere esemplare della civiltà classica.

La collaborazione degli artisti ebbe nelle scienze descrittive effetti rivoluzionari: Leonardo fu un osservatore metodico e sistematico e a questo suo atteggiamento è legata la sua tesi della superiorità dell’occhio sulla mente. Egli fornisce la sintesi delle molteplici interazioni tra arte e anatomia, con le sue tavole anatomiche molto accurate non solo della superficie corporea, ma delle vene, dei muscoli e degli organi interni, compresa la prima riproduzione di un feto nell’utero. L’esempio più pertinente di questo nuovo connubio sono le tavole anatomiche disegnate per il *De humani corporis fabrica* di Vesalio. Egli affermava con energia la necessità di una piena saldatura fra la

2 P. Rossi, *La nascita della scienza*, p. 27.

medicina clinica e la dissezione e proponeva una nuova immagine del medico, del professore di medicina e del rapporto che intercorre, nelle scienze sperimentali, fra il lavoro delle mani e l'opera dell'intelletto. Lamenta il fatto che i medici si siano limitati a prescrivere farmaci e abbiano abbandonato il resto della medicina a coloro che "essi chiamano chirurghi e considerano appena come schiavi"³. I medici infatti non si arrischiavano ad operare, mentre quelli a cui questo incarico era affidato erano troppo ignoranti per leggere gli scritti dei dottori.

Caratteristica comune alle varie rivoluzioni scientifiche che si susseguirono nel corso del Rinascimento non è unicamente la sostituzione di nuove teorie alle vecchie, ma la comparsa di scienze non prima presenti. In particolare la fisica e la biologia non sono considerate scienze per molti secoli, fino ai contributi nel Seicento di Galileo Galilei e di William Harvey: a caratterizzare la fisica di Galilei e le ricerche del medico inglese è il metodo sperimentale, basato sull'integrazione tra il rigore dell'analisi matematica e l'osservazione attenta della natura. Harvey in particolare dimostrò con esperimenti che il cuore riceve ed espelle durante l'azione combinata di espansione e contrazione una quantità significativa di sangue e calcolò che l'intero volume del sangue deve compiere nel corpo almeno cinquanta circolazioni al giorno. È proprio con Galilei che si realizza la costruzione di uno studio fisico della natura in chiave meccanicistica ed è proprio grazie a questa svolta che si assiste al passaggio dello sguardo medico da qualitativo a quantitativo. Galilei è convinto dall'uniformità della natura e quindi della possibilità di scoprire le leggi che la reggono e la governano: egli si adoperava per misurare tutto ciò che accadeva con la matematica per ricostruire la natura in laboratorio. Secondo la sua visione il comportamento della natura è costante e governato da cause che è compito della scienza indagare sperimentalmente.

3 P. Rossi, *La nascita della scienza*, p. 63.

3. RIVOLUZIONI O EVOLUZIONI?

Ma si trattò veramente di rivoluzioni? Da più di cent'anni si è assistito a un dibattito tra i sostenitori di due differenti modelli: quello della rivoluzione e quello dell'evoluzione. Per la maggior parte degli storici e degli scienziati l'evoluzione trasmette l'immagine di un progresso cumulativo, una somma di mutamenti che producono il loro effetto poco alla volta e in modo complessivo piuttosto che singolarmente. Bernard Cohen nella sua opera *La rivoluzione nella scienza* del 1985 si propone di analizzare i vari aspetti della nozione di rivoluzione: questo termine assume, sia nel suo significato etimologico di un ritorno o di un moto periodico, sia nel senso di una rivoluzione radicale, la doppia natura della rivoluzione nella scienza come un processo di produzione di nuovi insiemi di convinzioni che sono una trasformazione di idee già esistenti. Secondo Cohen la rivoluzione si verifica quando uno scienziato escogita una soluzione radicale a qualche problema principale: questo processo ha sempre inizio come un esercizio puramente intellettuale da parte di un individuo o di un gruppo di individui, tuttavia affinché possa influire sugli altri scienziati la scoperta deve essere comunicata ai colleghi. In seguito se non ci sono forti opposizioni e critiche questa proposizione preliminare può trasformarsi in una bozza di stampa. Tra i candidati al riconoscimento di aver prodotto una rivoluzione Cohen pone Vesalio, anche se lo stesso anatomista afferma nella sua opera di non aver prodotto qualcosa di nuovo o inaudito, ma di aver presentato i risultati dei suoi studi come la rinascita di quanto già proposto dagli antichi (egli quindi concepisce l'idea di stare realizzando una rinascita e una rivoluzione nel senso del ritorno a una condizione precedente, anche con miglioramenti). Egli però non assunse un atteggiamento rivoluzionario anti galenico al contrario di Harvey, il quale da vero rivoluzionario voleva mettere definitivamente da parte la base della fisiologia galenica⁴. Questo atteggiamento conciliatorio può essere messo a confronto con quello del ribelle Paracelso che arrivò a gettare pubblicamente alle fiamme le opere mediche di Avicenna:

4 R. Argelà, *La fabbrica del corpo umano. La medicina moderna tra storia e storiografia*, Genova, Casa del silenzio 2020, pp. 82-87.

quando fu nominato medico e professore a Basilea si rifiutò di pronunciare il consueto giuramento, inoltre tenne lezioni in tedesco e non in latino come era tradizione fossero svolte.

4. LA TRADIZIONE ASTRONOMICA ANTICA

Nella concezione aristotelica vi è una netta distinzione fra mondo celeste e mondo terrestre e tra moto naturale e moto violento, in particolare il mondo terrestre risulta composto dalla mescolanza di quattro elementi (aria, fuoco, terra, acqua), la cui concentrazione inficia il peso o la leggerezza di un singolo corpo. Il mondo terrestre è il mondo del mutamento, della generazione e della corruzione, mentre il cielo è inalterabile ed eterno, i suoi moti sono regolari: i corpi celesti non sono formati dagli stessi elementi di cui sono composti i corpi terrestri, ma da un quinto elemento, ovvero l'etere. I pianeti si muovono in moto circolare, che nella prospettiva degli aristotelici si presenta come uniforme e perenne e contrapposto al moto rettilineo tipico del mondo sublunare.

Un passo avanti importante fu compiuto da Claudio Tolomeo, la cui opera *Almagesto* diventò un fondamento del sapere astrologico: al suo interno viene ipotizzato che l'universo abbia al suo centro la Terra immobile. Tolomeo utilizza molto spesso eccentrici ed epicicli per spiegare i moti dei pianeti, anche se queste entità non hanno realtà fisica (egli esordisce sempre con la formula "immaginatoci un cerchio"). Essi sono semplicemente un mezzo più semplice per spiegare i moti dei pianeti.

Per entrare più nello specifico nella questione della rivoluzione copernicana ho preso in considerazione il testo di Thomas S. Kuhn, ovvero *La rivoluzione copernicana*.

L'astronomia planetaria nello sviluppo del pensiero occidentale: dal titolo si può già ben capire che la trattazione è di ampio respiro e non soltanto limitata al campo astronomico, come sottolinea James B. Conant nell'introduzione del volume: "Kuhn non si occupa soltanto di un avvenimento nella storia della scienza ma di tutta una serie di avvenimenti collegati che sono influenzati, e a loro volta influenzano, l'atteggiamento di uomini di pensiero i cui interessi sono assai lontani dal campo dell'astronomia in senso stretto. Egli non si è posto il compito relativamente facile di riscrivere semplicemente la storia dello sviluppo dell'astronomia durante il periodo della rivoluzione. È invece riuscito a presentare un'analisi delle relazioni fra dottrina,

osservazione e credenze [...] Egli indica la strada che bisogna seguire per far sì che la scienza si integri nella cultura del nostro tempo”.

Ogni civiltà e ogni cultura di cui abbiamo documentazione ha dato una risposta al quesito “qual è la struttura dell’universo?”. Tra le cosmologie primitive il caso più famoso è sicuramente quello egizio, dove il cielo era abitato da innumerevoli figure mitologiche; in questo contesto le prime osservazioni in campo astronomico furono quelle relative al sole e alle stelle, attività che svolsero un ruolo cruciale nella costruzione delle prime cosmologie scientifiche dell’antica Grecia.

Per la maggior parte degli astronomi e filosofi greci, dal IV secolo in avanti, la Terra era una minuscola sfera sospesa e ferma nel centro geometrico di una sfera molto più grande e ruotante, che portava le stelle, mentre il sole si muoveva nel vasto spazio fra la terra e la sfera delle stelle (al di fuori della quale non c’era nulla). Questa visione prende il nome di universo a due sfere, una interna per l’uomo e una esterna per le stelle.

Questo modello fornisce allo scienziato informazioni sul comportamento del sole e delle stelle in regioni del mondo (come per esempio l’emisfero australe e i poli terrestri) dove egli non è mai stato, inoltre lo informa anche sul moto di stelle che egli non ha mai osservato. La concezione a due sfere dell’universo non fu però la sola teoria cosmologica proposta nell’antica Grecia, fu però quella più accettata dal massimo numero di persone; cosmologie alternative (come quelle proposte da Leucippo e Democrito, Pitagora, Eraclide di Ponto e Aristarco) furono respinte, e i motivi per farlo erano eccellenti: esse infatti erano in contrasto con i primi e più fondamentali suggerimenti che i sensi ci danno sulla struttura dell’universo. Questa limitazione era dovuta al fatto che i greci potevano soltanto contare sull’osservazione e sulla ragione, senza l’aiuto del telescopio e di complicate argomentazioni matematiche non erano in grado di produrre nessuna prova reale che la terra fosse una pianeta in movimento. Il modello allora in vigore fu ampiamente accettato perché le osservazioni effettuabili ad occhio nudo si adattavano benissimo all’universo a due sfere.⁵

Il grado successivo dello sviluppo cosmologico è legato al problema dei pianeti, infatti se il Sole e le stelle fossero i soli corpi celesti visibili ad occhio nudo, l’uomo moderno potrebbe ancora accettare i principi dell’universo a due sfere; tuttavia esistono altri

5 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana: l’astronomia planetaria nello sviluppo del pensiero occidentale*, Torino, Einaudi 2000, pp. 53-58.

importanti corpi celesti, i pianeti in particolare, e l'interesse dell'astronomo per questi corpi è la causa principale della rivoluzione copernicana. Come è possibile ridurre i moti planetari ad uno schema semplice e ricorrente e, soprattutto, come spiegare i loro moti di retrocessione? Ciò non è possibile se si adotta il modello che prevede orbite circolari: come il modello a due sfere aveva fornito un meccanismo preciso per i moti giornalieri, permettendo in tal modo studi particolareggiati delle principali irregolarità planetarie, così il sistema epiciclo-deferente, offrendo una certa riproduzione dei principali moti planetari, permise di individuare con l'osservazione alcune irregolarità minori. Esso però non costituiva la risposta finale al problema dei pianeti, infatti rappresenta soltanto un punto di partenza che si prestò subito ad ulteriori sviluppi, i quali culminarono nell'elaborato sistema planetario di Tolomeo (100-178 d.C.), la cui opera, intitolata *Almagesto*, fu il primo trattato organico e matematico che forniva una spiegazione completa e quantitativa di tutti i moti celesti.

Risalendo indietro nel tempo, metà del IV secolo a.C., ci si imbatte nelle opere di Aristotele le cui idee costituiscono la base di partenza della massima parte del pensiero cosmologico medievale e di molta parte di quello rinascimentale. Aristotele affermò che la Terra è immobile e la sua parola fu presa molto sul serio dai successori che non osavano contraddire la visione del più grande scienziato e filosofo dell'antichità; tuttavia più tardi molte delle sue affermazioni vennero facilmente respinte, infatti nel mondo antico vi furono altre scuole di pensiero scientifico e cosmologico poco influenzate dalla sua dottrina. Va però sottolineato come nessuno dei successori di Aristotele suggerì mai che la Terra fosse un pianeta e che fosse posta fuori dal centro dell'universo. Aristotele sosteneva non solo che il vuoto non esiste nella realtà del mondo terrestre, ma che per principio non vi può essere vuoto in nessun luogo dell'universo (come già detto, per lui lo stesso concetto di vuoto rappresentava una contraddizione di termini in quanto lo spazio può essere definito soltanto in funzione del volume occupato da un corpo). Proprio l'impossibilità del vuoto è il fondamento della finitezza dell'universo: l'universo non può essere infinito perché uno spazio infinito non ha centro.

4.1. L'eredità di Aristotele e la Chiesa

Aristotele fu l'ultimo grande cosmologo dell'antichità e Tolomeo, vissuto cinque secoli dopo, ne fu l'ultimo grande astronomo. Copernico sembra essere il loro erede diretto, poiché nei tredici secoli che separano la morte di Tolomeo dalla nascita di Copernico, la loro opera non subì alcuna trasformazione importante e duratura. Durante i secoli in cui la cultura europea toccò il suo più basso livello, si ebbe una grande rifioritura della scienza nel mondo islamico, anche se non va dimenticato che i musulmani raramente furono degli innovatori radicali nel campo della dottrina scientifica (la civiltà islamica è importante soprattutto perché ha salvato e moltiplicato, per gli studiosi europei posteriori, i documenti dell'antica scienza greca).

Per tutto il medioevo e gran parte del rinascimento la Chiesa cattolica fu l'autorità intellettuale dominante in tutta Europa: dal IV al XVII secolo il suo atteggiamento verso la scienza e la struttura dell'universo fu un fattore determinante del progresso o del ristagno dell'astronomia. Nei primi secoli dell'era cristiana i padri della Chiesa sostenevano che la scienza, ad eccezione di quando serviva per la vita quotidiana, era inutile. Sant'Agostino nel suo manuale dei cristiani consigliava il fedele in questo modo: "è sufficiente al cristiano credere che la sola causa di tutte le cose create, celesti o terrene, visibili o invisibili, è la bontà del Creatore, il solo vero Dio; e che nulla esiste che non derivi da Lui la sua esistenza"⁶. Una riscoperta della scienza antica avvenne durante il XI e XII secolo, allorché le principali regioni d'Europa continentale erano state convertite, con la conseguenza che uomini di chiesa ora dedicarono una parte del tempo libero creato dalla nuova prosperità ad un intenso studio del mondo culturale che era stato riscoperto. Chiaramente la struttura fisica e cosmologica del nuovo universo cristiano fu soprattutto aristotelica, anche se non fu sempre possibile adottare le sue concezioni alla lettera: nessun cristiano infatti poteva accettare il principio di Aristotele che l'universo era sempre esistito. A questo scopo molti studiosi si impegnarono per dimostrare che la fede cristiana era compatibile con buona parte dell'antica cultura, e questo obiettivo fu ottenuto riducendo Aristotele nell'ambito dell'ortodossia.

Un dato molto interessante è costituito dal fatto che gli europei non crearono alcuna tradizione astronomica originale in grado di competere con quella tolemaica fino alla

6 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, p. 38.

metà del XV secolo, periodo le cui caratteristiche ebbero degli effetti più concreti sull'astronomia. Il rinascimento infatti fu un'epoca di grandi viaggi ed esplorazioni, fattori che contribuirono a creare una richiesta di astronomi capaci: così facendo gli uomini apprendevano quanto potevano essere sbagliate le antiche descrizioni della Terra, in particolare la visione di Tolomeo. Ancora più determinante per la pratica dell'astronomia rinascimentale fu il movimento per la riforma del calendario, infatti nell'ottica di Copernico per ottenere un calendario più preciso era necessaria la riforma dell'astronomia.⁷

⁷ T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 128-162.

5. I PRECURSORI DELLA TEORIA ELIOCENTRICA: FU DAVVERO COPERNICO IL PRIMO A PORRE IL SOLE AL CENTRO?

5.1. I Pitagorici

Spesso si fa riferimento ai pitagorici come ai primi che professarono il movimento della Terra o intorno al suo asse o anche intorno al Sole, tuttavia questa convinzione deriva dalla confusione che si fece dei dogmi esposti da Pitagora con quelli di Filolao e di alcuni filosofi posteriori, le cui opinioni fornirono loro il nome di “pitagorici” anche se al tempo questo ordine filosofico era già estinto. Se è accertato che i pitagorici ammettessero il movimento della Terra, una notizia più problematica del moto della Terra viene attribuita ad Anassimandro Milesio che visse tra il 610 e il 547 (quindi 40 anni prima di Pitagora). La regola che vigeva all’interno del gruppo dei pitagorici di non lasciare per iscritto nessuna delle loro dottrine non facilita il compito di appurare quali fossero le loro teorie in materia astronomica: non abbiamo infatti nessun documento per provare che Pitagora abbia ammesso il moto della Terra, inoltre tutti quelli che hanno scritto di lui nell’antichità gli attribuiscono opinioni conformi a quelle su cui si era basato Tolomeo per creare il suo sistema. Tuttavia, anche se non possiamo attribuire ai primi pitagorici idee diverse da quelle che furono più comuni nell’antichità, siamo in grado di constatare che lo sviluppo dei principi fisici di quella scuola ha dovuto condurre per logica concatenazione di idee alla teoria del movimento della Terra. Per spiegare il movimento proprio di ciascun pianeta da ponente e levante (prima si pensava che essi si muovessero insieme alla volta celeste durante il moto diurno) i pitagorici assunsero come motore dei corpi celesti non una macchina che a sua volta richiedeva una forza movente, ma un principio animatore dell’universo, collocato al centro ed operante a distanza per mezzo delle leggi dell’armonia e dei numeri. Essi si resero conto che il movimento dei singoli pianeti lungo lo zodiaco e il movimento diurno non si compivano intorno allo stesso asse di rivoluzione e che quindi con una sola forza

movente collocata al centro non era possibile spiegare entrambi i moti: giunsero di conseguenza ad attribuire il moto diurno a un moto della Terra.

Il sistema cosmico più celebre delle scuole pitagoriche è quello che si attribuisce a Filolao (visse tra il 500 e il 400 a.C.). Al suo tempo la società fondata da Pitagora a Crotona si era già dispersa e ogni discepolo poteva ora professare i culti lì sviluppati; fu così che Filolao entrò in contatto con le dottrine di Pitagora, egli infatti poneva l'armonia come fondamento del mondo, mondo al cui centro si trovava ciò che lui chiamava "focolare dell'Universo" o "altare"; il mondo era terminato esteriormente dall'Olimpo (presentato come una sfera cava di fuoco), al di là del quale esiste l'infinito. Fra la sfera dell'Olimpo e il focolare dell'Universo si muovono dieci corpi divini: il più esterno quello che porta le stelle fisse, poi i cinque pianeti, il Sole e la Luna, la Terra e infine l'Antiterra (probabilmente aggiunto solo per raggiungere il numero di dieci, ritenuto come espressione della perfezione). Secondo la sua teoria il giro della Terra intorno al fuoco centrale si compie nello spazio di un giorno, inoltre egli considerava che il Sole non fosse dotato di luce propria, ma che assorbisse la luce invisibile dell'Olimpo e la materializzasse rendendola a noi sensibile (così facendo Filolao evitava l'incongruenza di collocare fuori dal centro dell'Universo un altro focolare di attività).

PIANETA	RIVOLUZIONE SECONDO FILOLAI	RIVOLUZIONE SECONDO I MODERNI
Saturno	10752,75 giorni	10759,22 giorni
Giove	4301,10 giorni	4332,58 giorni
Marte	693,71 giorni	686,98 giorni
Venere, Mercurio, Sole	364,50 giorni	365,26 giorni
Luna	29,50 giorni	29,53 giorni

Da notare come nessuno dei numeri di Filolao è in errore di più di un centesimo del suo valore.

Spesso il sistema elaborato da Filolao è stato considerato un'anticipazione di quello di Copernico, il quale però fa chiarezza sull'argomento nella prefazione della sua opera, in particolare all'interno dell'epistola dedicatoria a papa Paolo III, dove il passo citato da Platone ha l'obiettivo di mettere in luce come,

secondo quanto ideato da Filolao, il Sole ha intorno al fuoco centrale un moto analogo a quello della Terra e della Luna: “Pertanto, dopo avere a lungo riflettuto su questa incertezza dell'insegnamento delle matematiche a proposito della ricostituzione 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 muovesse. 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 attraverso lo spazio, bensì a guisa di ruota, da occidente a oriente, intorno al suo stesso centro». 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 celesti. 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 connette che in nessuna sua parte può trasporsi qualcosa senza che ne derivi confusione nelle altre parti e nella sua totalità.”⁸

5.2. Platone

Il carattere “semi-poetico” della tante allusioni che Platone fa delle cose celesti e la tendenza a utilizzare frasi di senso misterioso e non ben determinato, hanno condotto molti studiosi a un’incredibile divergenza di opinioni. Oltre questa, un’altra difficoltà non indifferente sta nelle contraddizioni che si trovano comparando le opinioni che Platone esprime in diversi tempi e in diversi scritti. Il professore Gruppe all’interno della sua opera *Die Kosmischen der Griechen* sostiene che nelle idee platoniche sul cosmo vi sia una serie di gradazione, partendo da opere come il *Fedro*, il *Fedone*, i libri della *Repubblica* e il *Timeo*, per arrivare ai libri delle *Leggi* e dell’*Epinomide* scritti durante la vecchiaia.

Negli scritti del primo periodo l’immobilità della Terra e la sua posizione centrale sono affermate in modo perentorio. Nel *Fedro* si parla di luoghi “sotto il cielo e sopra il cielo”, ma le espressioni qui utilizzate non si possono interpretare come rappresentazioni di un sistema astronomico; nozioni più chiare si trovano nel *Fedone*, dove Socrate è introdotto a cercare se la Terra sia piana o rotonda: qui Platone, sotto il nome di Socrate, afferma la sfericità della Terra. Il decimo libro della *Repubblica* invece ci porta nei cieli, per descrivere il funzionamento dei quali anche qui Platone non rinuncia alle sue espressioni poetiche avvolte dal mistero, anche se bisogna dire che nel complesso il terreno risulta meno accidentato. Una buona interpretazione del passo in cui viene esposto il movimento dei cieli è fornito da H. Martin all’interno dell’*Astronomia* di Teone Smirneo (1849): qui la Terra non sembra più essere sospesa come nel *Fedone*, ma è trapassata dall’”asse adamantino” attorno a cui si avvolgono le otto “spole deferenti” che conducono in giro i corpi celesti; anche qui la Terra viene considerata immobile in quanto il moto diurno è prodotto dalla rotazione della sfera più esterna, che si propaga poi anche a quelle più interne. Neanche in questo punto vi è alcuna traccia di accenni al movimento della Terra. Confrontando la descrizione del

8 G.V. Schiaparelli, *I precursori di Copernico nell’antichità*, <https://www.nuovorinascimento.org/n-rinasc/astrit/pdf/schiaparelli/precursori.pdf>, p. 13.

mondo contenuta nel *Timeo* con quella della *Repubblica* si può notare come le maggiori differenze concernono, più che le forme dei moti celesti, le cause di questi movimenti. Esponendo la forma data da Dio all'Universo Platone così scrive: "Egli lo fece rotondo e sferico, in modo che vi fosse dappertutto la medesima distanza tra centro e le estremità, e gli diede la forma sferica, che di tutte le figure è la più perfetta [...] E gli assegnò il movimento proprio alla sua forma, quello dei sette movimenti [...]. Dunque fece che girasse uniformemente, circolarmente, senza mutare di luogo"⁹. Entrambi i sistemi contenuti in questi due dialoghi pongono la Terra immobile al centro dell'Universo e attraversata dall'asse che tiene unito l'insieme del mondo. Nel *Timeo* però non è più presente la concezione di una macchina mossa da forze fatali (come il "fuso" che "si avvolge fra le ginocchia della Necessità", il cui movimento è controllato dalla volontà delle Parche); ora nei corpi celesti si trovano una serie di divinità intelligenti che si muovono nei cerchi in cui è divisa l'anima del mondo secondo leggi armoniche.

Con il *Timeo* si chiude il primo dei due periodi nei quali si può suddividere l'evoluzione del pensiero di Platone sulla geometria del mondo. Plutarco all'interno delle *Questioni platoniche* scrive che "Teofrasto narra che Platone divenuto vecchio si pentiva grandemente di aver collocato la Terra nel mezzo dell'Universo in luogo ad essa non conveniente". Platone durante la sua vita fece due viaggi in Sicilia dove ebbe l'opportunità di apprendere le teorie dei pitagorici: egli quindi venne a conoscenza della dottrina del fuoco centrale, che durante gli anni della sua vecchiaia lo spinsero a mettere in dubbio il modello proposto da Aristotele.

Lo stesso Platone ci parla di questo suo cambiamento all'interno del trattato *delle Leggi*, dove sotto la forma di un ospite ateniese dichiara l'assurdità dell'opinione della stabilità della Terra. Egli sostiene che la molteplicità delle vie apparenti dei pianeti è un'illusione, e che ogni pianeta ha un solo corso: ciò corrisponde a verità solo nel caso in cui il moto diurno si attribuisca alla Terra; Platone afferma inoltre che l'astro in apparenza più veloce è in realtà il più lento (Saturno) e che quello che in apparenza è più lento, corre più veloce (Luna).

9 G.V. Schiaparelli, *I precursori*, p. 22.

Un altro passo carico di significato è contenuto nell'*Epinomide*, opera che rappresenta la continuazione del trattato *delle Leggi*. Platone dopo aver descritto il corso del Sole, della Luna e dei cinque pianeti, giunge a parlare dell'ottavo movimento: "E converrà pur parlare dell'ottavo circuito, che si può a buon diritto chiamare il mondo superno, il quale si muove in senso contrario agli altri, e trae seco gli altri nel suo movimento: come sembra agli uomini che poco intendono di queste cose. Ma noi bisogna che parliamo di ciò che è sufficientemente noto: perché la vera scienza di queste cose si manifesta soltanto a quelli che possiedono una piccola parte della retta intelligenza della divinità". Platone anche qui afferma che gli uomini che poco si intendono delle cose celesti credono alla rivoluzione diurna del cielo. Se egli si esprime secondo questo sistema è per adattarsi alla comune intelligenza: sorge ora qui il problema se Platone con il moto diurna intendesse il moto rotatorio o il moto intorno al fuoco centrale. Né l'ipotesi pitagorica né la teoria dei motori celesti del *Timeo* conobbero ulteriori sviluppi, a differenza invece del sistema proposto nel libro X della *Repubblica* che fu adottato e perfezionato da Eudosso. Egli ne trasse la teoria delle sfere omocentriche che, completata da Aristotele e da Callippo, rimase in voga fino a quando Ipparco propose la teoria degli eccentrici e degli epicicli; tuttavia neanche allora le sfere omocentriche furono definitivamente abbandonate, esse infatti, incorporate con gli epicicli, tornarono utili agli scolastici e formarono l'ossatura del Paradiso dantesco.¹⁰

5.3. Eraclide Pontico ed Ecfanto

Eraclide studiò presso Atene alla scuola di Platone ed ebbe occasione di entrare in contatto con le opinioni degli ultimi pitagorici. Queste sue relazioni spiegano bene il progresso che fece nelle speculazioni sulla struttura dell'universo: da quel poco che rimane del suo libro *Sulle cose celesti* si capisce che egli considerava i pianeti come sospesi nell'etere e pensava che le comete fossero delle nubi altissime e illuminate dal fuoco superiore (che è quasi sicuramente quello dell'Olimpo pitagorico). Eraclide spiegava il moto diurna apparente del cielo con un moto diurna della Terra e non come Filolao con una circolazione intorno al fuoco centrale, ma "con un moto rotatorio da occidente in oriente, che si compieva nello spazio di quasi un giorno intorno al proprio

¹⁰ G.V. Schiaparelli, *I precursori*, pp. 16-33.

asse”. È qui chiaramente espressa l’idea della rotazione della Terra, anche se non è ben chiaro se fosse una sua produzione originale o se l’avesse ereditata da Platone. Spesso il nome di Eraclide è accompagnato da quello di Ecfanto, un pitagorico contemporaneo o addirittura posteriore ad Eraclide: egli faceva ruotare la Terra intorno al proprio centro da occidente a oriente. Per comprendere questa evoluzione non va tralasciato di descrivere il clima generale in cui vennero a cambiare alcune delle idee pitagoriche. Con l’allargamento dell’orizzonte geografico la supposizione di un’Antiterra divenne sempre più inverosimile: questo, forse anche insieme al desiderio di non discostarsi troppo dalle volgari apparenze del cielo, indussero probabilmente gli ultimi pitagorici a mutare lo schema di Filolao (il fuoco centrale conservò la sua posizione, ma della Terra e dell’Antiterra si composero due emisferi di un unico astro, al cui centro fu posto il focolare dell’Universo). Fu Eraclide però a compiere un ulteriore passo decisivo verso la teoria copernicana: egli infatti è l’autore del sistema cosmico nel quale il Sole è posto al centro dei movimenti di Venere e Mercurio (questi due pianeti dunque non ruotavano intorno alla Terra). Curioso come questo modello proposto da Eraclide non riscosse alcuna reazione tra i greci, mentre pare abbia avuto più successo tra i romani (lo cita per esempio Vitruvio nel libro IX dell’*Architettura*).¹¹

5.4. Aristarco e Seleuco

Il sistema proposto da Eraclide Pontico, con Venere e Mercurio che ruotavano intorno al Sole e con la Terra posta al centro dei movimenti dei pianeti più esterni, veniva meno l’annoso problema delle retrogradazioni. Ciò deve aver spinto qualcuno a cercare se con un procedimento simile non si potessero spiegare anche le retrogradazioni dei restanti pianeti, ponendo il Sole al centro anche delle loro orbite. I pitagorici conservavano in questo modo il ruolo del focolare dell’Universo, che per giunta ora non era più un qualcosa di aleatorio, ma visibile e sensibile nei suoi effetti. Così Teone (oppure Adrasto) si esprime: “Ed infatti, nei corpi animati altrove è il centro della grandezza, altrove la sede del principio animatore: così negli uomini e negli animali il principio animatore sta nel luogo più caldo, cioè nel cuore, onde derivano i movimenti e tutte le

¹¹ G.V. Schiaparelli, *I precursori*, pp. 34-40.

facoltà dell'anima, la forza di appetire, di intendere [...]. Or quello che dei piccoli, fortuiti e mortali esseri si può dire, sarà pur probabile dei grandissimi, ed onorevolissimi e divini corpi dell'universo mondo; cioè che il centro della grandezza sia dove sta la Terra, in luogo freddo e immobile: e che il centro dell'animazione sia nel Sole come cuore dell'Universo"¹².

Aristarco di Samo visse verosimilmente tra il 310 e il 239 a.C., celebre come astronomo e matematico, studiò presso il Liceo fondato da Aristotele dove studiò le cose naturali. Egli, a differenza dei filosofi fin qui citati, non si dedicò solamente alle speculazioni, ma diventò un ottimo geometra come dimostra il suo libro *Sulle grandezze e sulle distanze del Sole e della Luna*. Numerose sono le testimonianze che rimangono del suo sistema cosmico: egli è citato insieme a Eraclide Pontico per aver professato l'opinione del moto diurno della Terra intorno all'asse dell'equatore; Aristarco è considerato come il principale autore di un sistema che, ponendo il Sole nel centro, faceva girare la Terra intorno ad esso, spiegando con l'inclinazione dell'asse rotatorio della Terra le variazioni delle stagioni. Fra le ragioni che forse hanno spinto Aristarco a collocare il Sole nel centro del mondo ci fu l'enorme grandezza di questo astro, che lui stimava essere 6/7 volte più grande della Terra in diametro, e circa 300 volte maggiore in volume (persino ai suoi tempi poteva far sembrare assurdo far girare un corpo così voluminoso attorno ad un altro tanto più piccolo). Una testimonianza di questo sistema ci è fornita da Archimede nel suo *Arenario*, dove così si esprime: "Di queste cose parlò nei suoi scritti Aristarco di Samo, confutando le ipotesi degli astronomi: dove conclude dalle sue supposizioni, che il mondo sia molte volte più grande di quello che abbiano detto. Suppone egli infatti, che così le stelle, come il Sole, rimangano immobili: che la Terra giri secondo la circonferenza di un circolo intorno al Sole, collocato nel centro; e che la sfera delle stelle fisse, collocata intorno al medesimo centro del Sole, sia di tale grandezza, che il circolo, nel quale dice muoversi la Terra, abbia alla distanza delle stelle fisse la medesima proporzione che il centro della sfera ha alla sua superficie". Sulla questione della struttura dell'universo urge però chiarire la differenza che per gli antichi intercorreva tra fisica e astronomia. Alla fisica, che per loro era un ramo della filosofia, davano l'incarico di spiegare le ultime ragioni dei fenomeni, mentre

¹² G.V. Schiaparelli, *I precursori*, p. 41.

limitavano il dovere dell'astronomo all'ideare tali ipotesi geometriche. Aristarco era appunto un matematico e astronomo e come tale avrà creduto necessario presentare la sua costruzione come una semplice ipotesi, allo stesso modo in cui successivamente Tolomeo presentò i suoi epicicli.

A completare l'opera di Aristarco ci pensò Seleuco, il quale si dedicò anche alla questione del flusso e del riflusso dell'oceano, esponendo a riguardo una teoria del tutto nuova: secondo lui l'oceano fluttua a secondo del moto lunare, il quale si agita dalla parte opposta di quello terrestre. Oltre alla rotazione, Seleuco ammetteva nella Terra anche un moto traslatorio. Egli fu l'ultimo rappresentante della dottrina del movimento della Terra.¹³

13 G.V. Schiaparelli, *I precursori*, pp. 40-52.

6. ALLA BASE DELLE RIVOLUZIONI: NUOVI PARADIGMI

Questa questione è affrontata in modo approfondito nell'opera *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* di T. Kuhn, all'interno della quale egli introduce il concetto di "scienza normale" per indicare una ricerca stabilmente fondata su uno o più risultati raggiunti dalla scienza del passato. Coloro la cui ricerca si basa sui paradigmi condivisi dalla comunità scientifica si impegnano ad osservare le stesse regole e gli stessi modelli nella loro attività scientifica. La presenza di un paradigma è fondamentale per qualsiasi attività scientifica, infatti in assenza di esso può succedere che tutti i fatti che possono interessare lo sviluppo di una data scienza sembrano egualmente rilevanti. Ma quindi in che modo l'emergere di un paradigma incide sulla struttura del gruppo che svolge la propria attività nel campo relativo? Quando un individuo o un gruppo costruiscono per la prima volta una sintesi capace di attrarre la maggior parte dei ricercatori della generazione successiva, le vecchie scuole gradualmente scompaiono. Una più rigida definizione del gruppo scientifico presenta ulteriori considerazioni: quando lo scienziato può accettare un paradigma come vero non ha più bisogno nelle sue opere principali di tentare di ricostruire il campo dai fondamenti, infatti ora lo scienziato può cominciare a concentrarsi esclusivamente sugli aspetti più sottili e complessi dei fenomeni naturali che interessano il suo gruppo (ed è quello che fece Copernico con il suo *De Revolutionibus*).¹⁴

In una scienza un paradigma rappresenta lo strumento che consente un'ulteriore articolazione e determinazione sotto nuove o più restrittive condizioni: all'inizio il suo successo è solo una promessa di successo che si può intravedere in alcuni esempi ancora incompleti. La scienza normale consiste nella realizzazione di questa promessa, ottenibile estendendo la conoscenza di quei fatti che il paradigma indica come particolarmente rivelatori, accrescendo così la misura in cui questi fatti si accordano con le previsioni del paradigma. Il compito della scienza normale quindi non è quello di scoprire nuovi generi di fenomeni, l'ambito della sua ricerca infatti è rivolta all'articolazione di quei fenomeni e di quelle teorie che sono già fornite dal paradigma.

14 T. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi 2009, pp. 28-40.

La progressiva opera di perfezionamento produce non solo nuove informazioni, ma anche un paradigma più preciso ottenuto eliminando le ambiguità che rimanevano nel paradigma originario dal quale erano partite tutte le dissertazioni. Abbandonare un paradigma significa cessare di praticare la scienza che esso definisce, tuttavia capita in alcuni casi che ciò avvenga e questo rappresenta uno dei cardini attorno a cui ruotano le rivoluzioni scientifiche. È importante sottolineare come la caratteristica più notevole dei problemi della scienza normale sia la scarsa tendenza a produrre novità fondamentali, essa ha una struttura altamente cumulativa, tuttavia nonostante il suo compito sia quello già citato di estendere stabilmente la portata e la precisione della conoscenza scientifica, la ricerca mette in luce continuamente nuovi fenomeni che portano alla formulazione di teorie rivoluzionarie.

Ma qual è l'atteggiamento degli scienziati di fronte alla crisi? Sotto un certo punto di vista tutti i problemi che la scienza considera come rompicapo possono essere visti come possibile ragione di crisi, però va anche detto che lo scienziato che si sofferma ad esaminare ogni anomalia incontrata raramente riesce a concludere una ricerca significativa. Quindi che cos'è che rende un'anomalia degna di essere sistematicamente analizzata? Quando una anomalia si presenta come qualcosa di più che un nuovo rompicapo della scienza normale, allora la transizione alla crisi è iniziata: l'anomalia viene ora riconosciuta come tale da parte della maggior parte degli scienziati, i quali si dedicano con maggiore attenzione al campo in questione. Quali possono essere gli effetti di una crisi? A livello generale, tutte le crisi iniziano con l'indebolimento del paradigma e col conseguente allentarsi delle regole che governano la ricerca normale. Sotto questo aspetto, la ricerca che avviene in periodo di crisi assomiglia molto alla ricerca che si conduceva durante il periodo preparadigmatico. Tutte le crisi poi si concludono con l'emergere di un nuovo candidato per il paradigma e con il conseguente scontro per la sua accettazione. Durante il periodo di transizione si assisterà a una sovrapposizione tra i problemi che possono essere risolti col vecchio paradigma e quelli che possono essere risolti con il nuovo.¹⁵

Ma per quale ragione un "semplice" mutamento di paradigma dovrebbe essere chiamato rivoluzione? Le rivoluzioni scientifiche sono introdotte da una sensazione crescente, si

¹⁵ T-Kuhn, *La struttura*, pp. 103-118.

badi bene però avvertita solo da un settore ristretto della comunità scientifica, che un paradigma esistente ha cessato di funzionare adeguatamente: proprio questa sensazione di cattivo funzionamento è un requisito preliminare di ogni rivoluzione, il cui carattere estremamente innovativo però apparirà tale solo a coloro che usavano i paradigmi che vengono colpiti. Sebbene una teoria fuori moda possa essere considerata come un caso particolare della teoria più moderna che le è succeduta, per apparire tale deve però essere opportunamente trasformata (e tale trasformazione può essere tentata soltanto con l'aiuto della teoria più recente). Paradigmi successivi ci dicono cose differenti sugli oggetti che si trovano nell'universo e sul comportamento di tali oggetti; essi si differenziano anche alla scienza precedente in quanto determinano la tipologia di problemi e i modelli di soluzione accettati da una comunità scientifica di un determinato periodo, a tal punto che vecchi problemi possono essere trasferiti ad un'altra scienza o dichiarati non scientifici (guidati da un nuovo paradigma, gli scienziati adottano nuovi strumenti e guardano in nuove direzioni).

Il prossimo quesito da porsi è quale sia il processo che porta una nuova teoria che ha i requisiti per diventare un paradigma a soppiantare il vecchio paradigma. Nessuna delle due scuole in competizione riconoscerà come validi tutti i presupposti empirici di cui l'altra ha bisogno per sostenere la propria tesi, questo principalmente perché la competizione tra paradigmi diversi non è una battaglia il cui esito possa essere deciso sulla base delle dimostrazioni. I sostenitori di paradigmi in lotta saranno spesso in disaccordo sui problemi concreti che ogni teoria candidata a diventare paradigma dovrebbe risolvere, questo perché i loro criteri e le loro definizioni di scienza non sono gli stessi; svolgendo la loro attività in mondi differenti, i due gruppi di scienziati vedono cose diverse quando guardano dallo stesso punto nella stessa direzione, e proprio per questo motivo prima che possano sperare di comunicare completamente, uno dei due gruppi deve fare l'esperienza di quella conversione che si definisce cambiamento di paradigma.¹⁶

Che cos'è che spinge gli scienziati a compiere questo passaggio? La pretesa più importante avanzata dai sostenitori di un nuovo paradigma è quella di essere in grado di risolvere problemi che hanno portato il vecchio paradigma alla crisi: Copernico

¹⁶ T. Kuhn, *La struttura delle*, pp. 120-182.

afferitava di aver risolto il problema della lunghezza dell'anno celeste, mentre Newton sosteneva di aver riconciliato la meccanica terrestre con quella celeste. Di fatto però la teoria di Copernico non era più accurata di quella di Tolomeo e non introdusse nessun immediato miglioramento nel calendario, però presentava alcuni nuovi aspetti che non si erano mai neppure sospettati quando prevaleva il vecchio paradigma: egli suggeriva che i pianeti dovevano essere simili alla Terra e che l'universo doveva essere molto più vasto di quanto si era supposto in precedenza. Per questo, quando sessanta anni dopo la morte di Copernico con l'aiuto del telescopio si arrivò a rivelare l'esistenza di montagne sulla Luna e un numero immenso di stelle che prima non si era nemmeno ipotizzato, queste osservazioni convertirono alla nuova teoria molti scienziati. La tendenza generale è proprio questa, ovvero soltanto molto più tardi, dopo che il nuovo paradigma è stato ulteriormente elaborato e accettato, compaiono argomentazioni che appaiono decisive; si può quindi concludere che se un nuovo candidato alla funzione di paradigma dovesse essere giudicato fin dall'inizio soltanto dal punto di vista della sua capacità nel risolvere problemi, le scienze subirebbero un numero decisamente minore di rivoluzioni fondamentali. Non va dimenticato però che nei dibattiti sui paradigmi non si discutono realmente le relative capacità nel risolvere i problemi: il vero punto di discussione consiste nel decidere quale paradigma debba guidare la ricerca in futuro e per questo colui che abbraccia un nuovo paradigma fin dall'inizio deve aver fiducia che esso riuscirà in futuro a risolvere i molti problemi che gli stanno davanti.¹⁷

¹⁷ T. Kuhn, *La struttura delle*, pp. 184-190.

7. COPERNICO: VITA, STUDI E SVILUPPI CHE PORTARONO ALLA REDAZIONE DEL *DE REVOLUTIONIBUS*

Nato il 19 febbraio 1473 a Torun, una città del sudest della Prussia in Polonia, perse il padre a soli 10 anni, e ad aiutare la famiglia fu il fratello della madre che era in stretto contatto con la chiesa locale. Lucas (lo zio) aveva frequentato l'Università Jagellonica di Cracovia, e aveva poi proseguito i suoi studi in Italia; spinse perciò anche i suoi nipoti a fare altrettanto. Nel frattempo, a coronamento della sua carriera ecclesiastica, riuscì a farsi eleggere vescovo della diocesi di Varmia nel 1489. Nel 1491 Lucas fece entrare Nicolò e suo fratello all'università di Cracovia cosicché potessero anche loro intraprendere la carriera di vescovo.

L'università di Cracovia al tempo non aveva rivali nell'Europa settentrionale per quanto riguarda lo studio dell'astronomia, infatti vi erano due professori a insegnare la materia. All'epoca il programma di studio di quasi tutte le università europee prevedeva la classica divisione tra le sette arti liberali. Al primo livello si trovavano le arti del trivio (grammatica, logica e retorica) che probabilmente Nicolò aveva già approfondito a dovere prima di arrivare a Cracovia; questo gli permise di concentrarsi maggiormente nelle arti a contenuto più matematico (aritmetica, geometria, musica e astronomia). Le lezioni si tenevano in latino e consistevano nel leggere le opere di Aristotele, di cui gli studenti imparavano la concezione del mondo e dei cieli. Con lo sviluppo delle università i professori iniziarono ad analizzare e a commentare le opere del filosofo greco, e fu proprio su questi testi che Copernico studiò. Gli studenti si cimentavano anche in matematica e geometria, in particolare quella di Euclide: la geometria permise a Copernico di sviluppare le capacità necessarie allo studio dell'astronomia. Per lo studio di questa materia invece si faceva affidamento all'opera del greco Claudio Tolomeo, anche se per le letture universitarie si era soliti utilizzare la versione "semplificata" realizzata da Johannes Sacrobosco attorno al 1220 *De sphaera*. Ben presto però questo testo si rivelò troppo elementare per Copernico, che per i suoi studi aveva bisogno di un manuale più avanzato; trovò soddisfazione nel consultare un libro

composto da tavole astronomiche redatte a Parigi durante il XIII secolo: le *Tavole alfonsine* consentivano a un astronomo di poter calcolare le posizioni dei pianeti senza dover necessariamente prendere in mano ogni volta la geometria degli antichi.

Nicolò lasciò l'università nel 1495 dopo i primi 4 anni senza laurearsi; poco dopo il suo trasferimento a Frombork (capitale della diocesi in cui operava lo zio) nel 1495, uno dei canonici della Cattedrale di Varmia morì, e così lo zio lo nominò al suo posto. All'età di 24 anni Nicolò non era ancora sicuro della strada che voleva seguire; nel 1496 lo zio lo mandò a studiare diritto canonico a Bologna: non si sa se in realtà Nicolò intendesse continuare i suoi studi astronomici, ma considerando che era lo zio a provvedere al suo sostentamento non si oppose a questa decisione. Agli inizi del 1497 Copernico si accasò con il professore di astronomia Domenico Maria da Novara: fu così in grado di aiutarlo con le sue osservazioni e di leggere gli ultimi libri sull'astronomia. Novara si occupava di realizzare pronostici astrologici, ed è quindi probabile che Copernico abbia appreso le questioni che più agitavano il campo astronomico. Riuscì a ottenere una copia del sommario dell'astronomia di Tolomeo realizzato da Regiomontano, grazie al quale fu in grado di approfondire le questioni matematiche che c'erano dietro la redazione delle tavole astronomiche. Così egli notò che il modello di Tolomeo, sebbene permettesse di stimare correttamente la posizione dei pianeti, non seguiva l'ideale della perfezione geometrica ipotizzata da Aristotele. Grazie ai suoi studi sulla trigonometria Copernico intendeva risolvere il problema dei moti retrogradi dei pianeti in quanto la soluzione approntata da Tolomeo non lo convinceva.

Lasciò anche questa volta l'università al termine dei 4 anni e senza aver conseguito un titolo di studio per tornare a casa, dopo aver visitato Roma per qualche mese insieme al fratello in occasione della celebrazione del Giubileo. Nel 1501 Nicolò si recò a Padova per studiare medicina: lasciò l'università due anni dopo senza aver concluso i suoi studi perché i costi per la laurea erano troppo elevati. Si recò quindi a Ferrara nel 1503 dove ottenne la laurea in diritto canonico per poi tornare in Polonia.¹⁸

All'età di 30 anni iniziò ad eseguire i suoi doveri come canonico della diocesi di Varmia, ma questo non gli impedì di continuare a coltivare i suoi interessi scolastici che lo portarono a imparare il greco. Copernico non possedeva strumenti che gli

¹⁸ O. Gingerich, *Copernicus: a very short introduction*, New York, Oxford University Press 2016, pp. 3-9.

permettessero di calcolare con precisione la discrepanza tra l'effettiva posizione dei pianeti e quella corrispettiva contenuta nelle tavole astronomiche. Tuttavia quando i pianeti si muovevano vicini tra di loro, ovvero quella che si chiama congiunzione, il compito diventava più facile: Nicolò scoprì che le previsioni risultavano errate per le posizioni di Saturno e di Marte. Allo stesso tempo Nicolò continuò a studiare l'*Epitome dell'Almagesto* di Regiomontano, studi che lo portarono a proporre un nuovo modello planetario: i tre pianeti esterni ruotavano intorno al Sole mentre il Sole si muoveva intorno alla terra (egli ancora quindi non era giunto a creare un sistema eliocentrico).¹⁹ Gli storici sono soliti datare il periodo più intenso dell'attività di Copernico che lo portò a creare il modello eliocentrico tra gli anni 1508 e 1510. Fu durante questi anni che Nicolò decise di non seguire più la carriera ecclesiastica che tanto desiderava lo zio, permettendogli così di avere più tempo a disposizione da dedicarsi alla formulazione di un nuovo sistema che spiegasse in modo esaustivo il movimento dei pianeti. Ciò che egli scrisse a riguardo non ha un titolo ufficiale, ma al giorno d'oggi si è soliti attribuire il nome di *Commentariolus*: nei 30 anni successivi egli approfondì ed ampliò le sue teorie, per poi pubblicarle nel 1543 sotto il titolo di *De revolutionibus orbium coelestium*. In quest'opera Copernico introduce ufficialmente l'idea che la Terra non sia immobile al centro dell'universo, ma non spiega mai perché egli abbia deciso di compiere questa radicale rivoluzione. Il ritrovamento di alcune copie del *Commentariolus* ha permesso di scoprire informazioni che non sono contenute nel successivo *De revolutionibus*: si scopre infatti che Copernico trovava poco funzionale il sistema dell'equante creato da Tolomeo. L'obiettivo di Copernico era quello di eliminare gli equanti e di realizzare una cosmologia eliocentrica, fattori essenziali per creare una visione più armoniosa del funzionamento dei cieli. Come molti altri astronomi del suo tempo, Copernico pensava che i pianeti fossero contenuti in sfere trasparenti ognuna della quali si muoveva attorno al suo centro; il problema delle sfere che si intersecano divenne cruciale quando Copernico cercò di far convergere tutti i movimenti dei pianeti all'interno di un singolo schema. In particolare non vi furono problemi per Giove, Saturno e Marte perché gli epicicli di Tolomeo si univano in un solo cerchio (quello dell'orbita del Sole intorno alla Terra); però la sfera che conteneva

19 J. MacLachlan, O. Gingerich, *Nicolaus Copernicus: making the Earth a Planet*, New York, Oxford University Press 2005, pp. 53-57.

Marte si intersecava con quella del Sole, e questo rappresentava una contraddizione secondo Copernico, per il quale le sfere celesti non potevano passare le une attraverso le altre. Per risolvere il problema egli mise la Terra in movimento e all'interno di una propria sfera, mentre il Sole ora stava al centro immobile. Dopo questa introduzione, Copernico all'interno del *Commentariolus* enuncia sette principi fondamentali del suo nuovo universo: 1. non c'è un solo centro comune per tutte le sfere; 2. la Terra non si trova al centro dell'universo, si trova solo al centro della sfera lunare; 3. tutte le sfere ruotano intorno al Sole, quindi il centro dell'universo si trova in prossimità di quest'ultimo; 4. la distanza Terra-Sole in rapporto all'altezza della volta celeste è così minima da non notarsi; 5. i moti apparenti nel firmamento non sono reali, ma sono dovuti al movimento della Terra (che ruota attorno ai suoi poli fissi); 6. i moti apparenti del Sole non sono reali ma derivano dal moto di rivoluzione della Terra (Copernico aggiunge al moto di rotazione giornaliero quello di rivoluzione); 7. non esistono movimenti retrogradi dei pianeti, ancora una volta questa sensazione è dovuto al moto della Terra (che quindi spiega molte apparenti irregolarità dei moti celesti). In particolare quest'ultimo punto fu di cruciale importanza per Copernico per provare il suo nuovo sistema eliocentrico, infatti i movimenti retrogradi esistono solo se si considera la Terra immobile come aveva fatto Tolomeo (in parole povere, sembrava che Marte si muovesse al contrario perché la Terra, che si muove più velocemente, lo raggiungeva e superava ogni due anni).²⁰

Nel 1515 a Venezia venne stampato un testo che fu di cruciale importanza per Copernico: si trattava della traduzione in latino della formulazione del sistema geocentrico proposto da Tolomeo (il titolo originale sarebbe stato *Mathematike syntaxis*, ma gli astronomi arabi lo cambiarono in *Almagesto*). Copernico era già a conoscenza, sebbene a grandi linee, di quanto era contenuto nel libro considerando che, come già detto in precedenza, era entrato in possesso dell'epitome latina dell'opera realizzata da Georg Peurbach e Johannes Regiomontanus. La consultazione di questo libro fece realizzare a Copernico che anche lui avrebbe avuto bisogno di un testo del genere per spiegare la sua visione dei cieli; capì anche che per reggere il confronto con Tolomeo, egli avrebbe dovuto disporre di un considerevole numero di osservazioni per ciascun

²⁰ J. MacLachlan, O. Gingerich, *Nicolaus Copernicus*, pp. 61-68.

pianeta. All'interno del *De revolutionibus* Copernico descrive gli strumenti che utilizzò in 20 anni per compiere questi faticosi calcoli: una meridiana per misurare l'altezza del Sole al mezzogiorno; dei righelli parallattici (o *triquetrum*) usati per determinare l'altitudine dei corpi celesti; quello che Tolomeo chiama "astrolabio" ma che noi oggi definiremmo una sfera armillare, un oggetto composto da anelli di metallo che rappresentano uno dei circoli della sfera celeste. Copernico delle 40 osservazioni che compì in questo lasso di tempo ne riportò soltanto 27 all'interno della sua opera principale.

Tra il 1511 e il 1529 Copernico fu molto occupato come canonico della sua diocesi (ottenne un importante riconoscimento dal papa di riformare il calendario, svolse compiti diplomatici nelle dispute territoriali dell'epoca, ebbe voce in capitolo sulla riforma della moneta...), ma questo non gli impedì di effettuare occasionalmente delle osservazioni astronomiche. Egli annotava tutte le misurazioni della posizione dei pianeti per confrontarle con quanto previste dalle tavole di Tolomeo: chiaramente egli dovette realizzarle tutte ad occhio nudo, ma a differenza di Tycho Brahe non era un buon osservatore, con la conseguenza che molte di queste risultarono errate. Dopo il 1529 Copernico iniziò a scrivere il suo libro sulla revisione dell'astronomia di Tolomeo, conservando le sue teorie ma cercando di aggiornare quanto già detto dallo scienziato greco. Copernico fu sempre scettico per quanto riguarda la pubblicazione della sua opera che non riteneva mai pronta; molte pressioni gli vennero dall'amico Tiedemann Giese che nel 1537 divenne vescovo, ma la spinta decisiva avvenne in seguito alla visita nel 1539 del matematico Rheticus che insegnava presso l'università di Wittenberg. Egli decise di recarsi presso la città di Copernico per conoscere meglio le sue idee, e lì vi rimase per più di due anni diventando l'unico allievo di Copernico. Egli portò con sé tre volumi di grande interesse per Copernico: un'edizione in greco dell'*Almagesto* di Tolomeo, un trattato di Pietro Apiano e uno dell'ottico polacco vissuto nel XIII secolo Witelo, un lavoro di Regiomontano sui triangoli (il *De triangulis*) e la prima edizione greca degli *Elementi* di Euclide. Rheticus fornì anche all'amico alcune importanti osservazioni di Mercurio, che aveva precedentemente chiesto al dr. Schoner (uno dei principali autori in materia) presso Norimberga; Copernico infatti voleva fornire 4 osservazioni aggiornate di ciascun pianeta per verificare se le costanti fornite da

Tolomeo fossero ancora valide. Ciò non presentò alcun problema per i tre pianeti più esterni, tuttavia non riusciva a venire a capo della minima variazione che caratterizzava l'orbita di Venere (problemi simili ebbe anche con Mercurio vista la sua scarsa "osservabilità"). Fu Rheticus a far stampare nel 1540 una sua lettera inviata a un amico con il titolo di *Narratio Prima*, nella quale era contenuto un sommario di quanto sviluppato da Copernico. Le pressioni combinate di Giese e Rheticus convinsero l'ormai 67enne Nicolò a pubblicare la sua opera per intero: per i successivi due anni il maestro e l'allievo lavorarono alle ultime revisioni e correzioni. Fu Rheticus ad occuparsi della pubblicazione, che avvenne sotto la cura di Johannes Petreius presso Norimberga, almeno fino al 1542 quando lasciò il progetto per andare ad insegnare matematica all'università di Lipsia; egli affidò il compito di seguire le fasi finali al luterano Andreas Osiander. Il processo di stampa di tutte le 400 grandi pagine impiegò 10 mesi, durante i quali Copernico si dedicò alla redazione della pagina degli errata da stampare anch'essa; tuttavia in questo periodo la sua salute gli impedì di continuare il suo lavoro, a tal punto che il suo amico Giese ci dice che Copernico vide il suo lavoro completo solo il giorno della sua morte (24 maggio 1543). Ad analizzare con cura il risultato della stampa fu sempre il suo amico Giese, il quale si accorse che era stata aggiunta un'introduzione anonima in cui l'autore affermava che il lettore non avrebbe dovuto prendere troppo sul serio la teoria della terra in movimento, in quanto si trattava di mere ipotesi. Questa parte spuria fu realizzata proprio dall'uomo a cui Rheticus aveva affidato il compito di seguire il processo finale di stampa, ma questo non venne alla luce prima del 1609.²¹ Analizzando ora il suo capolavoro, il *De revolutionibus*, si evince da subito che Copernico aveva usato l'*Almagesto* di Tolomeo come modello. Entrambi infatti esordivano con una parte introduttiva dove si affermava che l'universo era sferico e che la Terra è veramente piccola a confronto dell'estensione dei cieli. Nella prima parte dell'*Almagesto* si trovava una sezione in cui l'autore sosteneva che "la Terra è completamente priva di alcun movimento", e Copernico decise di intitolare la parte corrispondente della sua opera "perché gli antichi decisero che la Terra si trovava immobile al centro dell'universo", per poi farla seguire da una parte dove spiegava che queste credenze erano errate. Le restanti sezioni della prima e della seconda parte di

21 J. MacLachlan, O. Gingerich, *Nicolaus Copernicus*, pp. 37-50.

queste due opere erano dedicate ai principi matematici che stavano alla base dei loro rispettivi sistemi astronomici. Anche la terza parte presenta lo stesso argomento, ovvero i “movimenti del Sole” per Tolomeo e “i movimenti apparenti del Sole” per Copernico. Nella parte in cui quest’ultimo descrisse la sua visione dei movimenti della Luna, corresse il grossolano errore che Tolomeo aveva compiuto nella misurazione della distanza Luna-Terra. La sezione successiva delle loro opere è dedicata ai moti dei pianeti, in particolare quella realizzata da Copernico mostra come egli fu in grado di raggiungere una spiegazione soddisfacente senza utilizzare gli equanti di Tolomeo, che secondo lui forzavano soltanto il sistema generale delle sfere celesti.

Nonostante molti storici siano soliti datare l’inizio della rivoluzione scientifica nel 1543, ovvero quando fu pubblicato il *De revolutionibus*, va notato come in realtà le reazioni a questo testo furono piuttosto tiepide; non ci furono infatti attacchi diretti a Copernico e neppure decise prese di posizione sull’argomento. Il contributo più decisivo per l’affermazione delle teorie di Copernico avvenne nel 1551 con la pubblicazione da parte di Erasmus Reinhold di alcune tavole astronomiche basate sui calcoli di Nicolò, anche se il suo stesso autore non considerava come accettabile il movimento della Terra. Reinhold pensava che i calcoli di Copernico avrebbero permesso di determinare con maggiore precisione le posizioni dei pianeti, tuttavia i suoi risultati non rappresentarono un passo avanti rispetto alle precedenti *Alfonsine tabulae* basate sulle misurazioni di Tolomeo.

Il nuovo sistema inventato da Copernico incontrò molte difficoltà a venir considerato come effettivamente corrispondente a verità, questo perché lo stesso Copernico non poteva far niente per convincere le persone che esse vivessero su di un pianeta che si muovesse. Trent’anni dopo la pubblicazione del *De revolutionibus*, l’astronomo danese Tycho Brahe criticò Copernico, accusandolo di aver violato le leggi della fisica e le Sacre Scritture (in pratica Copernico ancora non era riuscito a trovare una valida alternativa alla fisica aristotelica, compito che sarà poi ereditato da Galileo prima e da Newton poi).

Nel 1596 Johannes Kepler pubblicò il primo trattato in cui venivano difese le scoperte di Copernico (Keplero e Galilei furono i primi che avessero considerato il sistema solare di Copernico come realmente in grado di descrivere l’universo, e non semplicemente

come mere teorie per il calcolo). Keplero ebbe anche la fortuna di lavorare presso Brahe, il quale lo aveva assunto per aiutarlo nei suoi calcoli: egli poté così usufruire delle migliori osservazioni fin'ora prodotte che lo portarono qualche anno dopo alla cruciale scoperta che l'orbita di Marte non era circolare ma ellittica.

Sull'onda di queste scoperte, Galileo grazie all'utilizzo del telescopio notò che attorno a Giove ruotavano le sue lune e che Venere aveva le fasi come la Luna (questa era la dimostrazione che anche Venere ruotava intorno al Sole come aveva detto Copernico). Queste nuove scoperte però andavano a contraddire quanto diceva la Bibbia, che nel salmo 104 diceva che il nostro Signore Dio aveva creato la Terra in modo che potesse essere mossa. Già Keplero all'interno dell'introduzione alla sua *Astronomia Nova* aveva osato criticare questa impostazione, sostenendo che il salmo esprimeva semplicemente la capacità di Dio di rendere la terra una casa stabile per l'umanità, senza che ciò avesse risvolti in campo astronomico. Altra nozione contro il sistema solare viene tratta dal Libro di Giosuè, nel quale Giosuè ordina al Sole, e non alla Terra di stare fermo. Questa volta fu Galileo a intervenire a difesa della scienza, dicendo che la Bibbia era scritta in un linguaggio che permettesse a tutte le persone di capire. Secondo lui "la Bibbia spiega come andare in cielo, non come funzionano i cieli". Molte persone quindi erano incerte riguardo la lettura letterale della Bibbia e le idee contenute nel libro di Copernico. In questo contesto la prefazione "illegalmente" aggiunta da Osiander al *De revolutionibus* svolgeva un ruolo conciliatorio tra le due fazioni, sostenendo che quanto scoperto da Copernico erano soltanto teorie non necessariamente vere. Molto presto però i veri copernicani, Keplero e Galilei, iniziarono a sostenere che il sistema eliocentrico descriveva correttamente il modello dei cieli e che la Terra compiva due moti. Tutto ciò chiaramente suscitò l'ostilità della Chiesa romana, che si attivò affinché queste idee venissero messe al bando: nel 1616 il Santo Uffizio proibì la pubblicazione del *De revolutionibus*, almeno fino a quando non fosse stato corretto. L'applicazione del decreto ebbe effetto quasi solamente in Italia, dove circa due terzi delle copie del testo di Copernico furono censurate; nel resto d'Europa invece continuò a circolare l'edizione originale.

Successivamente, attraverso gli studi di Isaac Newton che riprese e sviluppò le idee di Keplero e Galileo, la gente comune fu persuasa ad accettare come vero il sistema

copernicano. Questo nuovo sviluppo ora creava una situazione critica per quanto riguarda le censure imposte dalla Chiesa: fu per questo che nel 1835 fu pubblicato un Indice che riabilitava le opere di Copernico, Keplero e Galilei.²²

²² J. MacLachlan, O. Gingerich, *Nicolaus Copernicus*, pp. 103-115.

8. LA RIVOLUZIONE COPERNICANA

La data cruciale è il 1543, anno in cui Nicola Copernico propose di migliorare la precisione e la semplicità delle teorie astronomiche trasferendo al Sole molte funzioni astronomiche prima attribuite alla terra: il *De Revolutionibus* presenta una sorta di contraddizione interna, infatti si può riscontrare un'incompatibilità fra il libro e il ruolo che esso assume nello sviluppo dell'astronomia. Per le sue conseguenze, esso è senza dubbio un'opera rivoluzionaria; tuttavia gran parte degli elementi essenziali per i quali la rivoluzione copernicana è nota (calcoli semplici ed accurati della posizione dei pianeti, abolizione degli epicicli e degli eccentrici, l'abolizione delle sfere, la visione del Sole come una stella) non si possono trovare in alcun punto dell'opera di Copernico. Sotto ogni aspetto, ad esclusione del moto della Terra, sembra che il *De Revolutionibus* sia più affine alle opere degli astronomi e cosmologi antichi che agli scritti delle generazioni successive. L'importanza dell'opera consiste quindi più in quello che fece affermare ad altri che in quello che essa stessa dice: si tratta di un testo che provoca una rivoluzione più che un testo rivoluzionario. Copernico ridiede vita alla tradizione ellenistica dell'astronomia basata sulla tecnica matematica, che nell'antichità aveva avuto l'espressione più alta nell'opera di Tolomeo, e proprio per questo la sua opera ebbe come modello l'*Almagesto*. Il *De Revolutionibus* fu scritto con l'obiettivo di risolvere il problema dei pianeti che Tolomeo e i suoi successori non avevano risolto: Copernico esordisce dicendo che un'onesta valutazione dell'astronomia contemporanea mostra che l'impostazione del problema dei pianeti sulla base della Terra centrale non apre la via a nessuna soluzione possibile; deve esserci un errore fondamentale nei concetti basilari dell'astronomia planetaria tradizionale. La visione di Copernico non giungeva completamente nuova, infatti sebbene il moto della Terra non era mai stato un concetto popolare, nel XVI secolo non costituiva un'idea senza precedenti; quello però che non aveva precedenti era il sistema matematico che Copernico ideò basandosi sul moto della Terra (con la sola eccezione di Aristarco).²³

23 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 172-184.

Nonostante la Terra in movimento rappresenti un'anomalia in un classico universo aristotelico, l'universo del *De Revolutionibus* è classico in ogni aspetto che Copernico può far apparire compatibile con il moto della Terra: come dice egli stesso, il moto del Sole è stato semplicemente trasferito alla Terra, con il Sole che ora non è più una stella, bensì il corpo centrale unico attorno a cui l'universo è costruito. Nell'antichità due irregolarità fondamentali, quali il moto di retrocessione e la variazione del tempo necessario per girare attorno all'eclittica, avevano condotto gli astronomi ad usare epicicli e deferenti per trattare il problema dei pianeti; il sistema di Copernico spiega queste evidenti problematiche e lo fa senza ricorrere ad epicicli, o almeno a quelli maggiori (Ipparco e Tolomeo avevano dovuto introdurre dodici circoli, mentre Copernico arrivò alla medesima spiegazione qualitativa dei moti planetari apparenti con soli sette circoli). Questo nuovo sistema però non permette di prevedere la posizione dei pianeti con una precisione paragonabile a quella offerta dal sistema di Tolomeo e per ottenere risultati analoghi anche lui fu costretto ad usare epicicli minori e deferenti, senza però portare a conclusioni più precise. Ciò stona con quanto affermato nella prefazione dell'opera, dove Copernico si scaglia contro l'astronomia tolemaica accusandola di essere poco precisa e molto complessa: eppure lo stesso *De Revolutionibus* presenta le stesse problematiche considerando che il sistema proposto da Copernico non è né più semplice né più preciso di quello screditato di Tolomeo. Quindi se giudicato sul piano esclusivamente pratico, il nuovo sistema planetario fu un insuccesso; tuttavia, sul piano storico, il *De Revolutionibus* convinse alcuni fra i successori di Copernico che la chiave del problema dei pianeti era in un sistema centrato sul Sole. Ma la domanda da porsi è perché costoro diventarono copernicani? In mancanza di una maggiore economia o precisione, quali ragioni c'erano per cambiare di posto la Terra e il Sole? La geometria copernicana chiarisce senza dubbi un aspetto molto importante del comportamento dei pianeti inferiori, ovvero l'ordine delle loro orbite: l'orbita della Terra si trova all'interno di quella di Marte visto che il periodo orbitale della Terra è minore di quello di Marte; quello di Venere poi (225 giorni) è anch'esso minore quindi anche l'orbita di Venere deve essere interna; il periodo orbitale di Mercurio invece (88 giorni) è il più breve ed è quindi il pianeta più vicino al Sole. Tutte le argomentazioni di Copernico citano un aspetto particolare di quel che si osserva

nei cieli, che può essere spiegato sia dal sistema tolemaico sia da quello copernicano, e successivamente egli mette in rilievo quanto più armoniosa, coerente e naturale risulti la sua spiegazione. Non va dimenticato però che queste argomentazioni non hanno valore pratico, in quanto le nuove armonie portavano ad alcun miglioramento: esse facevano appello al senso estetico degli astronomi.²⁴

Il successo ottenuto dal *De Revolutionibus* non implica però il successo della sua tesi centrale, infatti in un primo momento la credenza della maggior parte degli astronomi nell'immobilità della Terra non venne mossa; nonostante questo, la grande diffusione assicurò al libro un piccolo ma crescente numero di lettori in grado di scoprire le armonie del sistema copernicano e disposti a riconoscerle come prove di verità. Molti altri astronomi invece ritennero possibile sfruttare questo nuovo sistema matematico e contribuire al successo della nuova astronomia però negando il moto della Terra oppure ignorando il problema. Erasmus Reinhold fu il primo astronomo a rendere un importante servizio ai copernicani con la pubblicazione nel 1551 di una serie completa di tavole astronomiche compilate con i sistemi matematici sviluppati da Copernico (prendono il nome di *Prutenicae tabulae*). Nel complesso però i libri popolari di cosmologia che descrivevano l'universo ai profani restavano ancora fedeli alle ipotesi aristoteliche: il copernicanesimo, al di fuori dei circoli astronomici e fino all'inizio del XVII secolo, solo in rari casi divenne una questione di grande importanza.

Uno dei motivi per cui persisteva questa ostilità nei confronti della visione copernicana è costituito dalla Bibbia, i cui passi diventarono una delle fonti preferite di argomenti anticopernicani. La Chiesa cattolica soltanto dopo il 1610 si aggregò ufficialmente alla lotta e l'accusa diventò di eresia: nel 1616 il *De Revolutionibus* e tutti gli scritti che sostenevano il moto della Terra furono posti all'Indice. Questi problemi scaturivano dal fatto che la proposta di Copernico suscitava nel cristiano molti dubbi, essa infatti esigeva una trasformazione della prospettiva in cui l'uomo vedeva il suo rapporto con Dio: sono proprio questi aspetti extrascientifici che spiegano l'ostilità che l'universo copernicano incontrava al di fuori dei circoli scientifici. Motivi simili spiegano anche l'asprezza dell'opposizione protestante: Lutero e Calvino infatti volevano un ritorno a una cristianità primitiva in cui la Bibbia costituiva la sola fonte del sapere cristiano.²⁵

24 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 216-232.

25 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 238-251.

8.1. Gli sviluppi in campo astronomico dopo Copernico

Tycho Brahe (1546-1601) fu un attento e acuto osservatore, secondo lui la macchina del cielo non è “un corpo duro e impenetrabile, composto di sfere reali [...], ma il cielo è aperto in tutte le direzioni, tale da non apporre alcun ostacolo alla libera corsa dei pianeti che è regolata [...] in accordo alla sapienza regolatrice di Dio²⁶”. Nel sistema da lui elaborato la Terra è immobile al centro dell’universo ed è anche al centro delle orbite della Luna e del Sole, mentre al centro delle orbite degli altri cinque pianeti sta il Sole. Il sistema ticonico escludeva ogni ragione di conflitto con le Scritture e non presupponeva l’abbandono del principio dell’immobilità della Terra e della sua centralità nell’universo e per questo divenne un punto di convergenza per quanti non accettavano la rivoluzione copernicana. Il suo sistema convinse la maggior parte degli astronomi non copernicani perché conservava i vantaggi matematici del sistema di Copernico senza gli inconvenienti fisici, cosmologici e teologici.²⁷

Molti interrogativi vennero sollevati quando nel 1572 venne osservato un nuovo corpo celeste nella costellazione Cassiopea, che poi scomparve agli inizi del 1574: si trattava di una stella? Se così fosse allora i cieli immutabili avevano subito un cambiamento e il contrasto fondamentale fra la regione celeste e la Terra corruttibile veniva ad essere posto in dubbio.

Keplero (1571-1630) invece fu copernicano per tutta la sua vita, infatti sostiene che Copernico abbia reso più semplice la macchina del mondo, fatto positivo in quanto in natura non vi è nulla di superfluo, ma ne critica anche un aspetto: secondo lui Copernico, dopo il primo coraggioso passo (lo scambio di posto fra il Sole e la Terra) era rimasto troppo fedele a Tolomeo nello sviluppare i dettagli del suo sistema. Keplero si rese conto dei residui incongruenti del *De Revolutionibus* e si assunse l’incarico di eliminarli sfruttando la nuova condizione della Terra vista come pianeta governato dal Sole al pari degli altri pianeti. Keplero sosteneva che tutte le eccentricità dei pianeti nell’universo copernicano dovevano essere calcolate nello stesso modo a partire dal Sole. Le sue scoperte più essenziali vennero effettuate studiando il moto di Marte, per

26 P. Rossi, *La nascita della scienza*, p. 93.

27 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 257-265.

calcolare la cui orbita egli fu costretto a cambiare la combinazione dei circoli con quelli della Terra: egli arrivò alla conclusione che teoria e osservazione potevano andare d'accordo se i pianeti si muovevano in orbite ellittiche con velocità variabili.

La fede che egli nutriva nelle armonie matematiche è espressa in una serie di leggi da lui create: mentre le prime due (1. la Terra e gli altri pianeti si muovono di un moto realmente uniforme; 2. i pianeti si muovono lungo orbite ellittiche e non circolari) regolano soltanto i moti di singoli pianeti nelle loro singole orbite, la terza legge invece (3. la terza legge stabiliva una relazione tra le velocità dei pianeti che si muovono in orbite differenti e permetteva di determinare la velocità una volta conosciuta l'orbita e viceversa) stabiliva una relazione tra le velocità di pianeti che si muovono in orbite differenti.²⁸

Galileo Galilei (1564-1642), con i suoi studi sul moto nel vuoto (oggetti di differenti materie cadono in esso con differenti velocità), arriverà a rifiutare le tesi aristoteliche. Inoltre alcune sue scoperte, come quella derivata dall'osservazione delle macchie solari e la scoperta delle fasi di Venere, contribuirono all'abbandono del sistema tolemaico in favore di quello copernicano. Galileo diresse il suo telescopio verso Giove e fece una scoperta incredibile: egli notò quattro puntini di luce vicinissimi al pianeta e suppose che essi ruotassero continuamente e velocemente attorno a Giove; questi corpi erano le quattro lune principali di Giove e il loro comportamento era lo stesso che la Luna e la Terra aveva nell'astronomia copernicana. Le osservazioni di Giove fornivano un modello visibile dello stesso sistema solare copernicano: nello spazio planetario c'era un corpo celeste circondato dai suoi "pianeti" proprio come i pianeti noti in precedenza circondavano il Sole. Egli stesso scrive che la scoperta delle macchie solari rappresenta "il funerale o piuttosto l'estremo e ultimo giudizio della pseudofilosofia²⁹". Queste sue posizioni lo misero in cattiva luce agli occhi del Sant'Uffizio; egli cercò inutilmente di dimostrare la vicinanza delle dottrine copernicane con le Sacre Scritture, tuttavia lo stretto legame tra teologia e filosofia naturale, che da secoli consentiva alla Chiesa di mantenere la sua funzione di guida delle coscienze e delle cultura, apparve alla maggioranza ormai del tutto dissolto.

28 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 268-278.

29 G. Galilei, *Lettera a Federico Cesi*, 1612, cit. in P. Rossi, *La nascita della scienza*, p. 110.

Con la pubblicazione del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* (1632) Galileo intendeva dimostrare la validità della cosmologia copernicana e l'esemplificazione dell'insostenibilità della fisica aristotelica. Egli confuta tutti i principali argomenti addetti contro il moto della Terra: Galilei esprime il concetto della relatività dei movimenti, in base al quale i moti celesti esistono solo per un osservatore terrestre e non è affatto insensato attribuire alla Terra un moto di rotazione. Egli inoltre si prodiga nel dimostrare l'impossibilità, per un osservatore collocato sulla Terra, di percepire questo moto di rotazione.

Anche le opere di Cartesio conobbero la stessa storia di quelle di Copernico, infatti furono poste all'indice dalla Chiesa cattolica nel 1663. Ma perché? Cartesio realizza una svolta decisiva nei confronti della tradizione antica, mostrando la possibilità di una trattazione algebrica di problemi geometrici. Inoltre egli compie un ulteriore passo in avanti rispetto a Copernico e Galilei: giunge ad affermare che "ogni parte della materia, nel suo particolare, non tende mai a muoversi secondo linee curve, ma secondo linee rette"³⁰.

Le ellissi di Keplero e il telescopio di Galilei non debellarono subito l'opposizione contro il copernicanesimo, infatti, nonostante la grande precisione raggiunta da Keplero, molti astronomi trovavano che le sue orbite non circolari e i suoi nuovi procedimenti per determinare le velocità dei pianeti erano troppo strani e poco congeniali per poter essere accettati senza riserve. Basti considerare che sino alla fine delle ultime decadi del XVII secolo le leggi di Keplero non diventarono la base universalmente accettata per calcoli planetari. Le osservazioni di Galileo incontrarono inizialmente un'opposizione ancora più radicata, anche se proveniente da un altro ambiente: con l'avvento del telescopio il copernicanesimo non fu più qualcosa che riguardava solamente gli astronomi matematici con un alto livello di preparazione, e fu proprio questo che spinse la Chiesa a mettere in moto la macchina dell'opposizione ufficiale cattolica al copernicanesimo. Questo rifiuto ha radici nella riluttanza ad approvare la distruzione di una cosmologia che era stata per secoli la base della vita pratica e spirituale di ogni giorno.

³⁰ P. Rossi, *La nascita della scienza*, p. 155.

8.2. Ulteriori progressi fino a Newton

Keplero e Galileo fornirono una prova molto convincente dello stato di pianeta in movimento proprio della Terra, tuttavia l'idea delle orbite ellittiche e i nuovi dati sperimentali raccolti con il telescopio costituivano una prova di solo carattere astronomico a favore della Terra planetaria; essi infatti non potevano confutare le testimonianze non astronomiche contro il nuovo principio. La risposta copernicana si limitava a togliere validità alle risposte tradizionali a questi interrogativi, senza però fornirne delle altre. Nelle cosmologie di Copernico, Keplero e Galileo il centro del Sole coincideva con il centro della sfera stellare che era finita, con il Sole che aveva semplicemente preso il posto della Terra: questo modello di universo rimase in auge fino al XIX secolo, quando i telescopi potenziati dimostrarono che le diverse stelle si trovano a distanze molto diverse dal Sole. Cominciava così a prendere piede una nuova visione dell'universo, dove il modello a due sfere era stato sostituito da un universo nel quale le stelle erano sparse qua e là attraverso uno spazio infinito. Un'ulteriore elaborazione di questo aspetto fu compiuta da Giordano Bruno, secondo il quale non era necessario che il Sole stesse nel centro, in realtà non era necessario nessun centro perché per lui un sistema solare copernicano poteva essere fissato in qualsiasi punto di un universo infinito; per Giordano il Sole era semplicemente una fra un infinito numero di stelle sparse attraverso l'infinita estensione dello spazio (in realtà questa idea di un universo infinito contenente molte terre in movimento e molti soli era stata immaginata già 2 millenni prima della nascita di Bruno dagli atomisti Leucippo e Democrito).³¹

In ambito della meccanica del sistema solare, persisteva ancora il problema fisico più impellente sollevato dal copernicanesimo: cosa fa muovere i pianeti? Né Aristotele, né Tolomeo, né gli astronomi medievali erano stati capaci di specificare la causa fisica di ogni irregolarità minore del moto di un pianeta. Contrariamente ai moti circolari dell'astronomia classica, i moti ellittici regolati dalla seconda legge di Keplero non potevano essere moti naturali in quanto non avevano alcun centro di simmetria; inoltre, il moto di un pianeta che obbedisce alle leggi di Keplero cambia di velocità, direzione e curvatura in ciascun punto dell'orbita: proprio queste variazioni parvero postulare l'introduzione di una forza nei cieli che Keplero pensò scaturisse dal Sole e dai pianeti.

³¹ T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 293-302.

La prima forza solare fu l'*anima motrix* (che Keplero immaginò come un sistema di raggi che si sprigionavano dal Sole e che venivano portati in giro dalla rotazione del Sole), a cui si aggiunge una seconda forza che egli identificò con il magnetismo (essa era necessaria per cambiare l'orbita circolare in un'ellisse). A partire da queste considerazioni di Keplero, poche altre aggiunte trasformeranno il suo sistema in uno che, sul piano qualitativo, è molto simile a quello di Newton. Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) si rese conto che nessuna spinta come quella dovuta all'*anima motrix* poteva continuare a far muovere un pianeta in un'orbita chiusa: egli pensò che, a meno che non ci fossero a disposizione altre forze in grado di attirare i pianeti direttamente verso il Sole, ciascuno di essi si sarebbe allontanato lungo una linea retta tangente la sua orbita. L'inglese Robert Hooke (1635-1703) cominciò la sua ricerca adottando il concetto del moto inerziale di Descartes e quello dell'identità delle leggi terrestri e celesti; così facendo egli fu in grado di scartare sia l'*anima motrix* sia i residui delle tendenze naturali al moto: per Hooke un pianeta in movimento dovrebbe proseguire uniformemente nel suo moto su di una linea retta attraverso lo spazio, e proprio per questo deve esserci un ulteriore principio di attrazione o una forza che operi tra il Sole e ciascun pianeta, una forza che farebbe continuamente deviare in direzione del Sole i moti inerziali rettilinei dei pianeti.

Un altro problema cruciale sollevato dall'innovazione di Copernico ebbe un ruolo essenziale nell'evoluzione del nuovo universo: perché i corpi pesanti cadono sulla superficie di una Terra in movimento? Copernico all'interno del *De Revolutionibus* sosteneva che “la gravità sia soltanto una tendenza naturale assegnata dal Creatore alle diverse parti dei corpi perché le parti si combinino nella forma di una sfera”³².

Successivamente Hooke e Newton fornirono un contributo fondamentale, infatti entrambi pensavano che la forza che guidava i pianeti verso il Sole e la Luna verso la Terra fosse la medesima attrazione gravitazionale che causava la caduta delle pietre. Nel 1674 nel suo *An Attempt to Prove the Motion of the Earth from Observation* Hooke proponeva un nuovo “sistema del mondo” che si basava su tre ipotesi: “in primo luogo che tutti assolutamente i corpi celesti possiedono un'attrazione o forza gravitazionale verso i loro propri centri, per mezzo della quale attirano non solo le loro stesse parti ed

32 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, p. 323.

impediscono a queste di allontanarsi da essi, ma che essi attirano in effetti anche tutti gli altri corpi celesti che si trovano nella sfera della loro attività. [...] La seconda ipotesi è questa: che tutti assolutamente i corpi dotati di un moto semplice e rettilineo continueranno ad avanzare in linea retta, finché, da qualche altra forza efficace, non vengono fatti deviare e curvare in un moto descrivente un circolo, un'ellisse o qualche altra curva composta. La terza ipotesi è: queste forze di attrazione hanno un effetto tanto più potente, quanto più il corpo su cui agiscono è vicino al loro centro³³. Più in particolare, Newton trovò che l'attrazione che guidava i pianeti verso il Sole doveva diminuire in misura inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separava dal Sole; inoltre, egli trovò che la stessa legge quadratica di proporzionalità inversa avrebbe potuto benissimo spiegare la differenza di velocità con cui cadono verso la Terra la Luna lontana e una pietra vicina. Con questa legge fu inoltre finalmente possibile calcolare per la prima volta con estrema precisione tanto la forma quanto la velocità delle traiettorie celesti e terrestri. La costruzione della macchina corpuscolare del mondo ideata da Newton completa così la rivoluzione concettuale che Copernico aveva iniziato un secolo e mezzo prima. Gli interrogativi sollevati dall'innovazione astronomica di Copernico furono risolti e l'astronomia copernicana diventò per la prima volta verosimile dal punto di vista fisico e da quello cosmologico.³⁴

33 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, p. 325.

34 T. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, pp. 310-333.

9. CONCLUSIONI

La teoria cosmologica contenuta nell'opera di Copernico *De revolutionibus orbium coelestium*, pubblicata nell'anno (1543) che da molti viene considerato come l'inizio della rivoluzione scientifica rinascimentale, risulta quindi più che una semplice revisione della teoria tolemaica fino ad allora in voga, secondo la quale la Terra si trova al centro dell'universo come sostenuto anche dalle Sacre Scritture. Per arrivare alle conclusioni contenute nella sua opera, Copernico rivisitò modelli antichi proposti da filosofi greci come Aristarco da Samo e alcuni membri della scuola pitagorica che già al tempo avevano suggerito il ruolo centrale del Sole al posto della Terra, modificando le loro teorie però con il sapere moderno del ragionamento matematico. La rivoluzione copernicana trascende l'ambito cosmologico, infatti l'interpretazione del mondo fondata sulla matematica avrebbe aperto la strada alle speculazioni di Keplero, Galileo e Newton, i quali avrebbero ripreso e poi completato quanto iniziato da Copernico.

Bibliografia

- ARGELA' Renato, *La fabbrica del corpo umano. La medicina moderna tra storia e storiografia*, Genova, Città del silenzio 2020
- GINGERICH Owen, *Copernicus: very short introduction*, New York, Oxford University Press 2016
- GINGERICH Owen e MACLACHLAN James, *Nicolaus Copernicus: making the Earth a planet*, New York, Oxford University Press 2005
- KUHN S. Thomas, *La rivoluzione copernicana: l'astronomia planetaria nello sviluppo del pensiero occidentale*, Torino Einaudi 2000
- KUHN S. Thomas, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi 2009
- ROSSI Paolo, *La nascita della scienza moderna in Europa*, Roma-Bari, Laterza 2005
- SILVANO Giovanni (curatore), *L'arte medica: la scuola padovana e la medicina in Europa e nel mondo*, Roma-Padova, Donzelli e Padova University Press 2022
- ROMEI Danilo (curatore) e SCHIAPARELLI Giovanni, *I precursori di Copernico nell'antichità*, <https://www.nuovorinascimento.org/n-rinasc/astrit/pdf/schiaparelli/precursori.pdf>