

# Capitolo 1

## La cosmologia antica

### 1.1 La nascita del pensiero razionale

Le testimonianze storiche di cui siamo in possesso dimostrano con certezza come le civiltà antiche dei Sumeri, degli Assiri, dei Babilonesi e degli Egiziani siano state in grado di sviluppare notevoli conoscenze tecnologiche mettendo a frutto le numerose esperienze artigiane da loro maturate nel corso dei secoli (si pensi, ad esempio, all'invenzione della ruota o alla costruzione delle piramidi). D'altro canto si ha anche la prova che questi popoli non seppero coordinare tutte queste nozioni in una formulazione teorica generale capace di fornire una valida interpretazione della realtà sensibile in cui vivevano. Questo limite intellettuale è in parte imputabile ad una concezione **fatalista** dell'esperienza, nella quale il *magico* e il *soprannaturale* avevano il sopravvento sullo sviluppo di un pensiero di stampo razionale.

E' solo con l'avvento della cultura greca che per la prima volta l'Uomo tenta di interpretare la complessa realtà del mondo che lo circonda attraverso l'utilizzo di ipotesi di tipo nuovo, completamente fondate su paradigmi intellettuali di stampo logico-razionale e non più magico-mitologico.

Questa inversione di tendenza rappresenta un passo decisivo nello sviluppo del pensiero occidentale e il vero fattore di novità di cui siamo debitori alla cultura greca antica. I filosofi greci, quindi, possono essere considerati in un certo senso i precursori degli scienziati moderni, perché sono i "sapianti" che più

di altri avvertono il bisogno di indagare razionalmente la realtà sensibile e il suo rapporto con l'Uomo.

E' però importante sottolineare quello che di fatto rappresenterà un limite del pensiero greco: la convinzione, cioè, che il fine ultimo della conoscenza sia quello di stabilire **l'essenza** ed il **perché** delle cose, piuttosto che quello di indagare il **come** queste avvengano. Una tale speculazione, quindi, è *più qualitativa che quantitativa*, e questa caratteristica di fondo non conduce alla *misurazione* della realtà, ma alla nascita di ipotesi *teoretiche* attraverso le quali tutta la molteplicità di forme con cui la natura si manifesta viene inizialmente ricondotta a poche o, addirittura, ad un'unica sostanza originale: **l'archè**.<sup>1</sup>

Analizzando i modelli cosmologici elaborati dal pensiero greco e la loro evoluzione concettuale, vedremo come essi avranno il loro punto d'arrivo nel sistema tolemaico che rappresenterà, a partire dal II sec. d. C., un paradigma indiscusso per tutta la cultura occidentale fino all'epoca di Copernico e Galileo

## 1.2 La sfericità della Terra

Alcune evidenze osservative che vanno via via affinandosi, quali il mutamento del cielo con la latitudine (per cui, se ci si sposta da nord a sud, le stelle visibili non sono sempre le stesse in ogni luogo) porta inesorabilmente a distruggere la concezione primitiva di una Terra piatta.

Infatti, dall'Egitto sono chiaramente visibili delle costellazioni che non possono assolutamente essere viste dalla Grecia e, viceversa, alcune stelle circumpolari (ad esempio dell'Orsa Maggiore) che non tramontano mai in Grecia, sono viste scendere sotto l'orizzonte quando vengono osservate dall'Egitto. Anche il fatto che quando una nave si allontana dalla vista fino a scomparire in mare aperto spariscono sotto l'orizzonte prima lo scafo e solo in un secondo tempo le vele, tende ad avvalorare la stessa ipotesi.

Tali osservazioni, alla portata non solo dei filosofi ma anche di mercanti, carovaniere o di chiunque in quei tempi aveva la possibilità di compiere lunghi viaggi per terra o per mare, inducono necessariamente a presupporre una qualche curvatura della superficie terrestre.

In virtù di queste riflessioni, **Anassimandro** non ha dubbi a sostenere l'ipotesi che la Terra debba essere curva. Egli ritiene, però, che una tale curvatura debba esistere solo nella direzione nord-sud. La Terra risulta così avere una superficie cilindrica e lo stesso Anassimandro afferma che ha la forma di "un

---

<sup>1</sup>Per Talete l'archè era costituito dall'*acqua*, dall'umido. Per Anassimene dall'*aria*. Per Anassimandro era l'*apeiron*, l'elemento indeterminato, infinito, coincidente con l'idea del divino. Per Eraclito era il *fuoco*, per Pitagora il *numero* e per Empedocle i quattro elementi originari, o "radici", erano *l'aria, la terra, il fuoco e l'aria* . . .

cilindro la cui altezza è un terzo della sua larghezza” ed è sospesa nello spazio per effetto dell’equilibrio di “forze contrapposte”.

Ma dobbiamo arrivare a **Parmenide** (510-? a.C.) per trovare il primo filosofo convinto della sfericità della Terra. Le sue motivazioni, di natura prevalentemente teoretica, si basano sull’idea che *l’unica forma adatta a rimanere naturalmente in equilibrio è quella della sfera*.

L’idea di una Terra sferica non viene però generalmente accettata fino all’epoca di **Platone** (427-348 a.C.) la cui convinzione, in proposito, si basa ancora su una dimostrazione di impronta completamente filosofica: *la Terra è sferica perché la sfera è la forma più perfetta per un corpo, possiede la massima simmetria; perciò la Terra, che sta al centro dell’Universo, deve assolutamente essere sferica*.

Nonostante la debolezza scientifica di questa dimostrazione, l’idea della sfericità della Terra inizia ad essere universalmente accettata proprio grazie alla grande considerazione di cui gode la filosofia platonica. Qualche anno dopo è **Aristotele** (384-322 a.C.) a dimostrare in modo finalmente accettabile anche dal punto di vista “scientifico” che la forma della Terra deve essere sferica facendo notare come, *durante le eclissi di Luna, l’ombra che la Terra proietta sul nostro satellite ha sempre un contorno circolare da qualunque punto della superficie terrestre la si osservi*.

Con una Terra sferica comincia ad essere considerata plausibile l’ipotesi che le stelle e gli altri corpi celesti continuino a percorrere delle orbite circolari attorno al nostro pianeta anche sotto l’orizzonte occidentale, dopo il loro tramonto.



Figura 1.1: *Durante una eclisse di Luna, l’ombra della Terra proiettata sul nostro satellite ha sempre una forma circolare*.

### 1.3 La cosmologia di Platone (429-347 a.C.)

Le teorie astronomiche di Platone non differiscono in maniera sostanziale da quelle pitagoriche. Platone riprende il modello dell’Universo a *sfere concentriche* perché permette facilmente di spiegare i moti diurni e annuali del Sole, e quello diurno delle stelle fisse (imponendo alla sfera delle stelle il moto di rotazione diurna, e al Sole un moto uniforme sulla sfera delle stelle fisse lungo l’eclittica).

Tuttavia Platone non appare in grado di formulare previsioni valide sulle posizioni dei pianeti nel corso del tempo, i quali alternano spostamenti verso est rispetto alle stelle fisse, a fermate (stazioni) seguite da inversioni del loro moto (retrogradazioni) con variazioni della loro altezza sull'eclittica (è per questi motivi che per nominare questi astri si usa proprio la parola pianeta, dal greco *planetes*, il cui significato è quello di “errante”, oppure “viaggiatore”).

Il problema delle numerose *irregolarità del moto dei pianeti* richiede una correzione del modello cosmologico e dà l'avvio ad un processo di riflessione teorica e di verifica sperimentale che andrà affinandosi col tempo e contribuirà allo sviluppo della metodologia osservativa e scientifica in generale.

Ma se per i Pitagorici il perfezionamento del modello matematico del cosmo non è possibile perché all'osservazione sperimentale non viene attribuito alcun valore, per Platone invece la conoscenza del Cielo è conoscenza dell'ordine del mondo e l'astronomia diviene la scienza che è in grado di determinarlo anche e soprattutto con l'osservazione. Platone, quindi, è il primo filosofo a porsi il problema della costruzione di un modello dell'Universo in termini rigorosi e in accordo con l'osservazione, ma i principi fondamentali da lui considerati hanno ancora una natura esclusivamente filosofica e speculativa:

- *il cerchio*, che rappresenta l'eterna immutabilità della forma del moto, perché sempre uguale a se stesso
- *la sfera*, che rappresenta l'Universo chiuso in se stesso e la possibilità di contemplarlo tutto allo stesso modo dal suo centro
- *l'uniformità del moto*, necessaria a sancire l'invariabilità del dominio dell'anima divina sul proprio corpo (una diminuzione di tale dominio provocherebbe una variazione della velocità dei moti celesti).

## 1.4 Le irregolarità del moto “apparente” dei pianeti

Con il progredire delle osservazioni astronomiche e con il miglioramento della precisione nella misura delle posizioni dei pianeti, ci si rende ben presto conto che i moti planetari descritti dalle varie teorie cosmologiche fin qui esposte non sembrano in grado di interpretare in modo corretto quanto avviene sulla volta celeste. Le traiettorie apparenti dei corpi celesti, almeno così come appaiono disegnate sullo sfondo delle stelle fisse, non risultano per nulla regolari e ad una osservazione accurata manifestano le seguenti anomalie:

1. le traiettorie non sono degli archi di circonferenza come quelle percorse dal Sole o dalla Luna, ma delle curve che disegnano delle forme “a cappio”

2. nel percorrere questi “cappi” il pianeta “inverte il suo moto”, raggiunge un punto in cui si ferma, e poi riprende il suo cammino nella direzione originaria
3. la velocità con cui i pianeti sono visti spostarsi in cielo “non ha valore costante”: in alcuni tratti vi è una accelerazione, in altri una decelerazione
4. la “luminosità dei pianeti cambia nel tempo” (soprattutto quella di Venere e Marte), lasciando supporre che sia variabile in proporzione la distanza del pianeta dalla Terra.

## 1.5 Le “sfere cristalline” di Eudosso e di Aristotele

I Greci, non possedendo nessuna teoria fisica sul perché i pianeti seguano rigorosamente orbite periodiche, iniziano ad costruire modelli cosmologici nei quali i corpi celesti si devono necessariamente muovere secondo *percorsi circolari*. In questo modo viene colmata la carenza di una teoria fisica e nello stesso tempo viene implicitamente sancito l'accordo con l'assunto platonico della perfetta simmetria della sfera e della circonferenza come elemento fondante dell'intera cosmologia. Del resto, senza il ricorso ad un concetto così semplice e geometrico, l'Universo sarebbe apparso inesplicabilmente privo di leggi.

La concezione dei moti circolari persiste nei secoli fino al 1600 e viene soppiantata dalle orbite ellittiche di Keplero, ma lo stesso Keplero esiterà a lungo prima di abbandonare la semplicità del modello greco.

**Eudosso di Cnido** (408-355 a.C.) è il primo filosofo ad elaborare un sistema di sfere celesti concentriche (e di una imprecisata natura cristallina). Il sistema di Eudosso non è così semplice come comunemente si crede. Ci immaginiamo probabilmente, come illustrato in figura, un semplice sistema di sfere ordinate nel seguente modo (partendo dal centro, occupato dalla Terra): sfera della Luna, sfera di Mercurio, di Venere, del Sole, di Marte, di Giove, di Saturno e sfera delle stelle fisse.

Secondo Eudosso invece, il modello è molto più complesso: soltanto le stelle fisse possiedono un'unica sfera. La Luna e il Sole, ad esempio, sono caratterizzate da ben tre sfere ciascuno. Nel disegno in figura si vede un corpo celeste che si trova inserito in un sistema di tre sfere legate tra loro da vincoli di rotazione. Infatti la sfera interna (rossa), sulla quale è fissato il corpo celeste, ruota su se stessa attorno un asse vincolato alla seconda sfera (blu), la quale a sua volta ha l'asse di rotazione vincolato alla terza sfera (verde), più esterna.

Solo in questo modo si potevano spiegare (e ancora solo in parte) i complessi moti “apparenti” dei pianeti. Con questo modello Eudosso, riesce almeno a giustificare l'esistenza dei moti retrogradi e l'inclinazione dell'orbita dei pianeti

rispetto a quella terrestre. Ma con il progredire delle osservazioni astronomiche si vengono a scoprire maggiori dettagli sulle orbite planetarie e per rendere conto di tutte le irregolarità apparenti diventa inevitabile aumentare il numero di sfere.

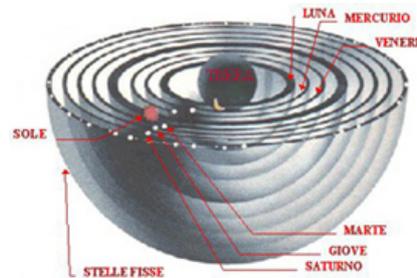


Figura 1.2: *Le sfere cristalline di Eudosso, riprese poi da Aristotele.*

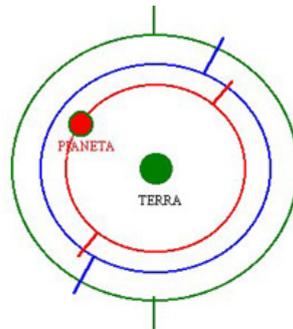


Figura 1.3: *Per rendere conto delle anomalie dei moti planetari, ad ogni pianeta veniva fatta corrispondere più di una sfera.*

**Aristotele** (384-322 a.C.) accetta in pieno questa teoria, ma commette il grave errore di attribuire una realtà fisica alle sfere cristalline (cosa che Eudosso non aveva mai pensato), facendo coincidere un modello puramente geometrico con l'essenza stessa della realtà. Tale errore costringe Aristotele a cercare di combinare i gruppi separati di sfere in un unico complicatissimo sistema meccanico di sfere concentriche legate le une alle altre. Per riuscire a dare spiegazione ai complicati moti dei pianeti, il suo sistema arriva a prevedere un totale di 55 sfere diverse !!

Con Aristotele il modello delle sfere cristalline concentriche da semplice modello matematico diviene parte di una descrizione "fisica" del mondo. Le sfere cristalline non sono più una rappresentazione astratta e teorica dell'Universo, utile solo perchè "funziona" bene nell'interpretare i moti dei pianeti e delle stelle: diventa, invece, una rappresentazione "reale" del mondo che pretende di dire come è veramente strutturato l'Universo, cioè come esso è nella realtà.

La visione cosmologica aristotelica può essere riassunta nei seguenti punti fondamentali:

- al centro di tutto si trova la Terra, immobile e di forma sferica
- esiste una netta divisione tra il mondo sublunare, composto dai quattro elementi già suggeriti da Empedocle, aria, terra, acqua e fuoco, e il mondo celeste dove un quinto elemento, l'etere, invisibile, impalpabile, incorruttibile, puro e trasparente, riempie l'Universo senza lasciare spazi vuoti. Cielo e Terra sono retti da leggi separate e contraddistinte da moti naturali diversi (rettilinei sulla Terra, circolari uniformi in Cielo)
- le sfere cristalline si muovono di moto circolare uniforme (il moto perfetto, caratteristico dell'armonia celeste, come del resto lo è la figura geometrica della circonferenza) e la causa del loro moto, che si propaga da una sfera all'altra per attrito, è da ricercarsi nell'intervento iniziale sulla sfera più esterna, e solo su di essa, dell'Ente Supremo, il Primo Motore Immobile (immobile perché, se si dovesse muovere, il suo moto dovrebbe essere spiegato dalla presenza di un altro ente). Sulle sfere che circondano la Terra vi sono, nell'ordine: la Luna, Mercurio, Venere, il Sole, Marte, Giove, Saturno e infine le stelle fisse, bagliori di quella luce divina che riempie di se l'Empireo
- gli oggetti celesti devono essere di forma sferica perché, riprendendo l'assunto platonico, la sfera è il simbolo della perfezione e quindi si addice alla perfezione del Cielo

Ben presto ci si accorge che anche la cosmologia di Aristotele non è in grado di interpretare in modo sufficientemente preciso le irregolarità del moto dei pianeti e di prevederne con esattezza la posizione in cielo al passare del tempo. Si apre così il problema di apportare nei modelli cosmologici delle profonde revisioni senza però intaccarne i principi teorici fondamentali, in quanto desunti dalla filosofia di Platone e di Aristotele.

## 1.6 La teoria degli “epicicli” di Tolomeo

L'ipotesi delle sfere cristalline viene ben presto criticata perché non riesce assolutamente a spiegare un fatto di evidenza fondamentale: la periodica variazione di luminosità dei pianeti. Marte, ad esempio, quando è più vicino alla Terra appare notevolmente più luminoso di quando si trova lontano da essa. Secondo la teoria aristotelica, Marte e gli altri pianeti stanno sempre alla stessa distanza dalla Terra, il raggio della sfera cristallina. E' poi impossibile spiegare il moto “a cappi” dei pianeti in cielo: se il pianeta è fissato sulla sfera cristallina, il moto che ne consegue è circolare ed uniforme . . .

Proprio da considerazioni di questo tipo, prima Eraclide (390-310 a.C.), poi **Ipparco** e infine **Tolomeo** (II sec. d.C.) giungeranno ad elaborare quella teoria che passerà alla storia con il nome di *teoria degli epicicli* e che rappresenterà per

circa 1500 anni il punto di riferimento indiscusso per tutta la cultura astronomica e filosofica occidentale.

Nella sua opera più importante, *l'Almagesto*, Tolomeo sancisce in modo definitivo la grandezze cosmologiche fondamentali:

1. la distanza Terra-Luna è posta pari a 60 raggi terrestri (per il calcolo viene utilizzato il metodo “della parallasse”, introdotto in precedenza da Ipparco)
2. con il metodo già utilizzato da Aristarco, Tolomeo calcola i rapporti del diametro della Luna e del Sole rispetto a quello della Terra (circa 1/3 e 20 volte, rispettivamente) e quindi la distanza del Sole (circa 20 volte la distanza Terra-Luna)
3. il raggio della Terra è posto pari a 20.500 stadi, cioè 3200 km (in questo caso, Tolomeo dà maggior credito a una misura più piccola di quella correttamente calcolata da Eratostene, e che risultava essere di 6300 km: è utile ricordare che il raggio terrestre è oggi valutato in circa 6370 km)
4. consolida l'idea della Terra centro dell'intero Universo, rifiutandosi di concepire un suo eventuale moto di rotazione: nel far ciò riprende le critiche che giudicano impossibile la rotazione terrestre per via della supposta disintegrazione della Terra che da questo fatto ne sarebbe conseguita. Tolomeo dimostra inoltre di dar credito all'ipotesi secondo la quale, sempre a causa dell'eventuale rotazione terrestre, un corpo lanciato in aria lungo la verticale non sarebbe dovuto ricadere nel punto di partenza: e poichè cioè sembra essere contraddetto dall'esperienza, la Terra non può ruotare su se stessa.

Nel sistema tolemaico, infine, viene finalmente risolto il problema delle *irregolarità* dei moti planetari. Il moto orbitale dei pianeti è interpretato riprendendo e migliorando *la teoria degli epicicli* secondo la quale ogni corpo celeste è costretto a muoversi su una circonferenza minore (*l'epiciclo* propriamente detto) il cui centro si muove a sua volta di moto circolare su una traiettoria di raggio maggiore (il *deferente*). Ed è questa seconda circonferenza ad avere al proprio centro la Terra.

Per interpretare al meglio i dati osservativi, Tolomeo porta al limite estremo i principi platonici relativi alla perfezione dei moti circolari introducendo due geniali “anomalie”: la Terra, infatti, non occupa proprio il centro del deferente, ma è leggermente spostata in posizione eccentrica (e ciò assicura una consistente variazione della distanza Terra-pianeta, responsabile delle differenze di luminosità di questi ultimi). L'uniformità del moto circolare, poi, rimane tale solo se vista da un punto simmetrico rispetto alla Terra, ma posizionato dalla parte opposta rispetto al centro del deferente: il cosiddetto *punto equante* (e ciò spiega le variazioni di velocità dei pianeti sulle loro orbite, in quanto la loro velocità angolare non è più costante rispetto alla Terra, ma solo rispetto al punto equante).

La cosa sorprendente è che il modello geocentrico di Tolomeo, sebbene molto lontano dalla realtà delle cose, funziona in modo soddisfacente anche in termini di predizione della posizione dei pianeti, almeno relativamente al grado di precisione ottenibile all'epoca.

Arriva così a compimento un preciso sistema geometrico-filosofico che sembra interpretare alla perfezione la realtà cosmica. Anche per questo motivo dalla pubblicazione dell'Almagesto di Tolomeo devono passare ben 14 secoli prima di vedere qualche progresso significativo nello sviluppo delle scienze astronomiche.

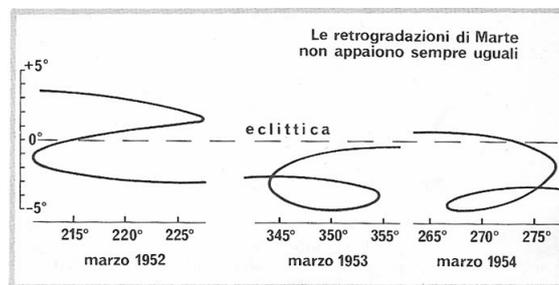


Figura 1.4: *Il moto dei pianeti in cielo sembra descrivere dei “cappi” e non degli archi di circonferenza*

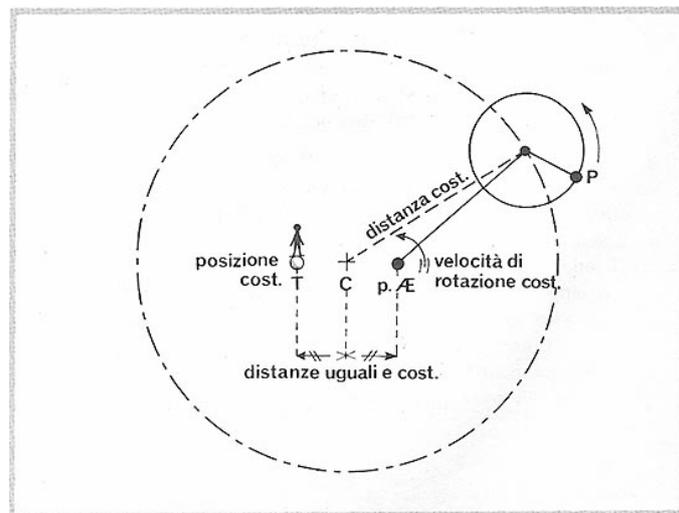


Figura 1.5: *Rappresentazione del modello ad epicicli; in evidenza il deferente, il punto equante e la posizione non perfettamente centrale della Terra*

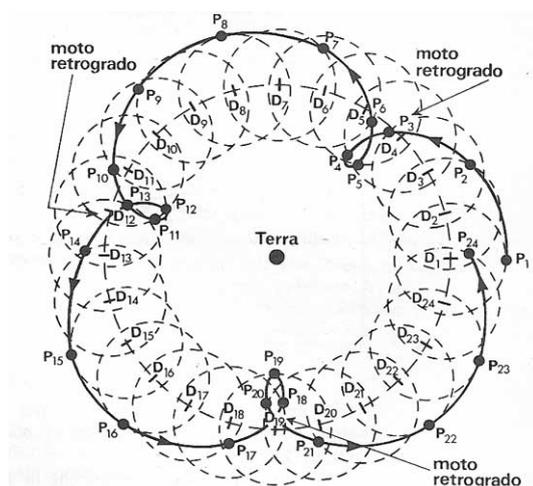


Figura 1.6: *La composizione dei due moti circolari del pianeta, sull'epiciclo e sul deferente, compone un moto complessivo che, visto dalla Terra, rappresenta in modo soddisfacente l'andamento irregolare dei corpi celesti in cielo*

# Indice

<b>1</b>	<b>La cosmologia antica</b>	<b>1</b>
1.1	La nascita del pensiero razionale . . . . .	1
1.2	La sfericità della Terra . . . . .	2
1.3	La cosmologia di Platone (429-347 a.C.) . . . . .	3
1.4	Le irregolarità del moto “apparente” dei pianeti . . . . .	4
1.5	Le “sfere cristalline” di Eudosso e di Aristotele . . . . .	5
1.6	La teoria degli “epicicli” di Tolomeo . . . . .	7