

Storia della Fisica

SSIS
Università della Calabria

Alessandro Papa

Dipartimento di Fisica, Università della Calabria
Cubo 31C – V piano
e-mail: papa@fis.unical.it tel.: 0984-496015

Programma del corso

- Presentazione del corso
- Breve storia del pensiero “scientifico” fino a Galileo
- I padri fondatori: Galileo, Huygens, Newton
- La luce
- L'elettricità
- Il calore e la teoria cinetica
- Alcuni aspetti della Fisica del Novecento

Breve storia del pensiero scientifico fino a Galileo

[Fonte: Roberto Renzetti – www.fisicamente.net]

La matematica greca

Generalizzazione dei fenomeni forniti dall'esperienza;
si iniziano a prendere in considerazione **interi categorie di numeri e di figure**;
si cercano i **caratteri comuni** tra gli elementi di una categoria;
si ricavano conoscenze ulteriori a partire dall'uguaglianza di certi caratteri;
si prendono in esame intere **classi di problemi** e si cercano **metodi atti alla soluzione**, non di ciascuno di essi separatamente, ma dell'intera classe.

I greci scoprono l'enorme fecondità di questo tipo di trattazione (in tutti i campi del conoscere) e ne fanno un **modello di conoscenza superiore da contrapporsi alle attività tecnico-pratiche** dell'uomo.

Chiarimento e distinzione dei termini *episteme* (scienza) e *techne* (tecnica).

Mathema (matematica) significava 'tutto ciò che viene appreso dall'esperienza' e diventò un ulteriore elemento da inserire a fondamento dell'*episteme* (matematica = scienza pura e modello di tutte le conoscenze che aspirano a chiamarsi scientifiche).

L'antitesi *episteme - techne* rese grandi servigi allo sviluppo autonomo di una matematica che non doveva più confrontarsi con problemi pratici.
Ciò fu possibile in una **società di schiavi**.

In definitiva:
MATEMATICA = studio delle proprietà generali dei numeri e delle figure.

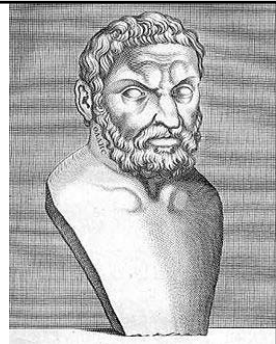
Nasce l'esigenza della **dimostrazione** come procedimento razionale capace di stabilire proprietà generali di numeri e figure al di sopra ed al di fuori dell'esperienza.

Ma, all'inizio della matematica greca, in mancanza di una logica, che solo successivamente sarà sviluppata, il termine dimostrazione era un termine assai confuso.

Solo con Euclide (III secolo a.C.) inizia a consolidarsi il significato di dimostrazione.

Talete (VI secolo a. C.)

- Nasce a Mileto (città della Ionia sulle coste dell'Asia Minore).
- Ha contatti con egizi e caldei.
- Dagli egizi apprende ed importa in Grecia alcune nozioni fondamentali di geometria. Altre ne ricava.
- Teoremi:
 - Il cerchio è dimezzato da un suo diametro qualsiasi
 - Primo criterio di uguaglianza tra triangoli (uguali due lati e l'angolo tra essi compreso)
 - Gli angoli alla base di un triangolo isoscele sono uguali
 - Gli angoli opposti al vertice sono uguali
 - Secondo criterio di uguaglianza dei triangoli (uguali un lato e gli angoli adiacenti)
- Problemi:
 - Determinazione della distanza di una nave dalla costa
 - Determinazione dell'altezza di un obelisco o una piramide dalla misura delle loro ombre (proporzionalità tra ombra di obelisco/piramide con ombra uomo rapportata ad altezza incognita di obelisco/piramide ed altezza nota uomo).
- Il Teorema di Talete non sembra esser suo. Sembra che egli avesse risultati di matematici babilonesi: "la parallela al lato di un triangolo divide gli altri due in parti proporzionali".



Pitagora (571 - 497 a.C.)

Nasce a Samo, isola greca del Mar Egeo. Viaggia in Oriente.

All'età di circa 40 anni abbandona la Grecia e si trasferisce a Crotona.

Fonda una comunità che operava come una specie di setta alla quale venivano ammesse anche le donne. La setta era dedicata alla contemplazione, alla ginnastica e ad un insieme di attività non disgiungibili: musica, aritmetica, geometria, astronomia. Era legata al partito aristocratico ed aveva un gran peso nelle vicende della città.

Il simbolo di riconoscimento di appartenenza alla setta era il 'pentagramma' una stella a cinque punte inscritta in un cerchio.

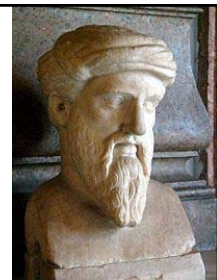
Verso la fine del secolo, una sommossa democratica caccia i pitagorici dalla città.

Pitagora trova rifugio a Metaponto dove insegna per qualche anno fino alla morte.

Per i pitagorici i **numeri sono il principio di tutte le cose**. Per 'numeri' si intendono solo i 'numeri interi' intesi come collezioni di unità tutte uguali tra loro.

Queste unità erano pensate come **punti forniti di realtà**, di dimensioni e circondati da uno spazio vuoto (sono delle "monadi"). Mettendo insieme più punti-unità si raggiungeva la sintesi tra numero e figura (carattere simultaneamente aritmetico e geometrico).

Le leggi di formazione dei numeri costituiscono, in ultima analisi, le leggi di formazione del mondo che ci circonda. Nelle proprietà dei numeri vanno poi ricercate le ragioni del mondo fisico e spirituale.



Questa visione, germe della teoria atomica di Leucippo e Democrito, prevedeva che le linee fossero catene di punti [.....], in numero enorme ma finito, mentre le superfici fossero un insieme di linee [.....]. Conseguenza di ciò è che tutte le grandezze risultano tra loro **commensurabili**.

La scoperta del Teorema di Pitagora mostra qualcosa di 'scandaloso': l'esistenza di **grandezze incommensurabili** (ad esempio il lato e la diagonale di un quadrato stanno tra loro secondo un numero che non è razionale). I fondamenti dell'intera scuola crollano e sarà Ippaso, secondo la leggenda, a far conoscere l'eresia che doveva essere mantenuta segreta.

Inizierà una revisione dei fondamenti della geometria a partire dai paradossi di Zenone per arrivare alla definizione euclidea di punto, "ciò che non ha parti".

È necessario sottolineare che i pitagorici non possedevano ancora il concetto di numero irrazionale. Chiarimenti in tal senso verranno con Teodoro di Cirene (circa 400 a.C.) e quindi con Eudosso (circa 350 a.C.). Dovrebbero essere di quest'ultimo i risultati che Euclide inserisce nel Libro V degli "Elementi".

Varie scuole si ispirarono a Pitagora: **Filolao** (seconda metà del V secolo, prima in Magna Grecia e poi a Tebe), **Archita** (inizio del IV secolo) a Taranto che esercitò grande influenza su Platone.

Pitagora non lasciò scritti. I frammenti a lui attribuiti sono in realtà o di epoca di Filolao o posteriore.

Alcuni storici sostengono che Pitagora fu il vero iniziatore del movimento scientifico greco. Altri lo considerano solo il fondatore di una setta religiosa che solo dopo la sua morte iniziò ad occuparsi di scienza e filosofia.

Scoperte fondamentali di Pitagora (secondo Proclo - V secolo a.C.)

Quanto assegnato a Pitagora sono probabilmente conoscenze sistematizzate a partire da Pitagora. La loro derivazione è in gran parte da Talete, dai caldei e dagli egiziani.

- Nuova dimostrazione della somma degli angoli interni di un triangolo mediante la parallela tracciata da un vertice al lato opposto.
- Terzo criterio di similitudine tra triangoli.
- Ad angoli uguali sono opposti lati in proporzione.
- Dimostrazione del teorema omonimo.
- Studio dei quattro poliedri regolari e scoperta del quinto, il dodecaedro (che viene dato con origine celtica o indiana o etrusca).
- Scoperta della sezione aurea e della costruzione del pentagono e del decagono regolari inscritti in una circonferenza.
- Conoscenza delle medie 'aritmetica', 'geometrica' ed 'armonica'. Molte conoscenze sulla teoria delle proporzioni.
- Problemi di 'applicazione delle aree' che portano alla risoluzione geometrica delle equazioni di 2° grado.
- Scoperta dell'incommensurabilità tra lato e diagonale del quadrato a cui seguirà come conseguenza quella delle quantità irrazionali.

Teorema di Pitagora

Pitagora prese le mosse dal triangolo particolare di lati 3, 4 e 5 noto già agli egiziani:

3 = Osiride, 4 = Iside, 5 = Orus

congiuntamente a tutta una serie di altre proprietà (in India i triangoli conosciuti erano quelli di lati 15, 36, 39 e 5, 12, 13).

Nella terna pitagorica si osservano coincidenze di "interesse": il quadrato dell'ipotenusa è pari al numero delle 'lettere' dell'alfabeto egizio ed al numero di anni di vita del bue Api. Era, per altri versi nota l'uguaglianza: 3 (elevato alla seconda) + 4 (elevato alla seconda) = 5 (elevato alla seconda), considerata come simbolo di perfezione. Si sottolineava che l'area di tale triangolo è 6, numero che segue il 5. Si osservava che il cubo dell'area risulta pari alla somma dei cubi dei lati: 6 (elevato alla terza) = 3 (elevato alla terza) + 4 (elevato alla terza) + 5 (elevato alla terza). Da queste considerazioni 'esoteriche' partì Pitagora per la sua dimostrazione più generale.

Prima di Pitagora: un triangolo è rettangolo ogni volta che i lati stanno tra loro in quella certa proporzione. Da Pitagora: in ogni triangolo rettangolo (sono infiniti) i lati si comportano in modo che la somma dei quadrati costruiti sui cateti è uguale al quadrato costruito sull'ipotenusa.

La musica

I pitagorici svilupparono anche molte ricerche sperimentali in campo musicale.

Con corde tese di uguale lunghezza e con un cuneo che le fissava in un dato punto situato tra le estremità, si conseguirono risultati che gettarono le basi della musica. Furono scoperti i tre accordi fondamentali di ottava, di quinta e di quarta e, di seguito, tutti gli altri.

I rapporti, tra le lunghezze delle parti di corda a destra ed a sinistra del cuneo, trovati nei tre casi erano rispettivamente: 1:2 ; 2:3 ; 3:4, cioè i numeri della *tetraktis*.

Allorché si studiarono altri intervalli musicali si scoprirono altre relazioni che toccavano questioni correlate con le medie, molto care ai pitagorici. Se si fanno vibrare tre corde con lunghezze proporzionali ai numeri 1 ; 4/5 ; 2/3 non solo si ha l'accordo perfetto maggiore (do, mi, sol) ma si riconosce subito che quei tre numeri formano una successione nota in aritmetica e detta da Filolao **terna armonica** poiché il termine centrale è medio armonico tra gli altri due: media armonica $1/b = 2(1/a+1/c)$.

Sorprendentemente la stessa media armonica appare nel cubo, dato che questo solido ha sei facce, 8 angoloidi, e 12 spigoli e "8 è medio armonico tra 6 e 12". Analogamente le lunghezze delle corde dell'accordo perfetto minore risultano essere 4; 5; e 6; formano cioè una progressione aritmetica con il 5 medio aritmetico tra gli altri due numeri: media aritmetica $b = (a+c)/2$.

L'insegnamento della scuola pitagorica

In definitiva, per la scuola pitagorica, che avrà suoi influssi fino agli inizi dell'era cristiana, oggetto ultimo della **scienza fisica** è quello di **riprodurre la natura per mezzo di un sistema di entità matematiche e delle loro relazioni**.

Qualunque cosa l'uomo possa conoscere circa la natura può venire espresso con il suddetto sistema di entità e relazioni matematiche.

Il *cosmos* (in greco: decoro, ornamento) è una struttura ordinata e per questo, come la musica è "armonico" (l'armonia dell'universo è "sentita" dall'occhio della mente). Si noti che il *cosmos* greco diventa il *mundus* (ornamenti femminili) latino.

Naturalmente, quanto detto prevede una **stretta connessione tra natura (fisica) e matematica**.

Tutto è affidato all'**intuizione** ed alla **creazione speculativa: nessuno spazio è concesso alla scienza empirica**.

Scuola eleatica

Parmenide (515 - 440 a.C.):

tutti i mutamenti che osserviamo nel mondo sono pure **illusioni prive di realtà**, dovute all'inganno dei nostri sensi. Ciò che non muta, non si genera, non si corrompe deve essere inteso come un uno ed indivisibile (sorta di anticipazione dei tentativi della scienza fisica di rintracciare **conservazioni** là dove tutto sembra cambiare). Anche le teorie corpuscolari dei greci ricercavano l'immutabile in un mondo che sembrava mutare.

Zenone di Elea (490 - 430 a.C.)

Le elaborazioni di Zenone nascono per sostenere le idee del maestro Parmenide.

1) *Paradosso del segmento*

Un segmento può essere pensato costituito da infiniti punti senza dimensioni, ma infiniti oggetti senza dimensioni forniscono una entità nulla: non vi è segmento. Il segmento è una entità che non esiste.

Altro modo di esprimere il paradosso è il seguente. Supponiamo che un oggetto debba spostarsi da un estremo A ad uno B di un segmento. Prima di aver percorso tutto il tragitto, l'oggetto dovrà percorrerne la metà (AC); prima di questa, la metà della metà (AD); prima di questa la metà della metà della metà (AE); e così via all'infinito. Ci si avvicina sempre a B senza raggiungerlo mai.



2) *La freccia immobile*

Una freccia scagliata da un arco occupa in ogni istante (indivisibile) uno spazio uguale alla propria lunghezza e dunque è ferma in quel luogo; perciò la freccia è ferma in ogni istante, e dunque è sempre immobile.

3) *Achille e la tartaruga*

Il 'più veloce' Achille compete in una gara di corsa con una tartaruga. Siccome sa quanto egli valga più di ella, le concede un vantaggio (qualunque). Quando Achille A sarà arrivato dove si trovava inizialmente la tartaruga T, la tartaruga sarà arrivata in T'; quando Achille sarà arrivato in T', la tartaruga sarà arrivata in T"; Conclusione: Achille non raggiungerà mai la tartaruga.

4) *Lo stadio* ("la metà del tempo è uguale al suo doppio")

Considerando in uno stadio un punto mobile che va ad una certa velocità, se lo si considera rispetto ad un punto fermo andrà, ad esempio, a 10 km/h; se lo si considera invece rispetto ad un altro punto mobile che vada alla sua stessa velocità ma in verso opposto, quello stesso punto mobile si muoverà a 20 km/h (problema del riferimento e relatività del moto).

Conclusione:

se è assurdo negare il moto e la molteplicità, è altrettanto assurdo affermarli.

Considerazioni

Paradosso 1 - Di che punti si parla?

Paradosso 2 - Il moto non si verifica in nessun istante. Esso è una corrispondenza biunivoca fra istanti temporali e punti dello spazio. Se a qualunque istante di tempo corrisponde sempre lo stesso luogo si dice che un oggetto è immobile. Ma se ad ogni istante di tempo corrisponde una diversa posizione nello spazio si dice che l'oggetto è in moto. Dire che la freccia è ferma "ad ogni istante" non significa dire che essa è ferma "sempre". Si può parlare di velocità solo quando si considerino almeno due istanti del tempo ed i corrispondenti luoghi dello spazio. La velocità istantanea è un concetto limite, non finito.

Paradosso 3 - È vero che i tratti da percorrere si fanno sempre più piccoli, ma anche i tempi! Lo spazio tende a zero (numeratore); il tempo tende a zero (denominatore) di modo che si ha un rapporto 0/0 "privo di significato".

Paradosso 4 - Si vede banalmente che questo paradosso non esiste.

I paradossi nascono dalle **difficoltà che pongono gli infinitesimi e gli infiniti** (problemi che cominceranno a risolversi dalla fine del 1600 con Newton e Leibniz), **dal non considerare il tempo, dalla definizione di punto** (vedere la soluzione di Democrito). **Il paradosso dello stadio è l'ammissione della relatività classica** (su cui lavoreranno Bruno, Galileo, Newton).

Tali paradossi possono nascere solo quando **la "ragione" (pregiudizio) si vuole anteporre all' "esperienza"**. Si tratta dei limiti del procedimento deduttivo che fa riferimento alla sola ragione rispetto all'induttivo che tiene conto anche dell'esperienza.

Le teorie corpuscolari

Empedocle (492 - 432 a.C.): teoria dei quattro elementi (terra solida, acqua liquida, aria gassosa, fuoco ardente e consumatore).

Gli elementi non si trovano in forma pura ma sono mescolati tra loro. Sembra che la combinazione fosse tra particelle impercettibili e che la combinazione ed il moto di queste particelle elementari (sotto l'azione della forza amore e della forza odio) fossero responsabili di ogni mutamento osservato.

Queste particelle si mantengono reali ed immutate attraverso tutti i processi. A tali corpuscoli non viene però ancora assegnata alcuna caratteristica particolare.



Anassagora (499 - 428 a.C.): varietà infinita di elementi qualitativamente diversi, divisi in corpuscoli i quali sono a loro volta divisibili all'infinito.

Leucippo (V secolo a.C.) e Democrito (460 - 360 a.C.)

Democrito è allievo di Leucippo che a sua volta era stato allievo di Parmenide e Zenone.

Il mondo risulta costituito da atomi in continuo movimento nel vuoto. **Gli atomi sono indivisibili, estesi, immutabili, impenetrabili.**

Essi differiscono tra loro solo per la forma e le dimensioni mentre sono qualitativamente uguali.

L'atomo non è tale per la sua piccolezza ma per la sua indivisibilità (si può pensare ad atomi "**grandi come un mondo**").

Gli atomi sono eternamente in moto.

Gli atomi, privi di peso, sono dotati di un moto verticale con i più grandi che marciano più velocemente; quando i grandi raggiungono i piccoli si generano vortici che a loro volta generano mondi (eterno moto rettilineo nel vuoto come intuizione dell'inerzia).

Epicuro (342 - 280 a.C.) e Lucrezio (99 - 55 a.C.) elaborarono successivamente le teorie di Leucippo e Democrito. Secondo questi gli atomi, dotati di peso, si muovono su traiettorie leggermente oblique (teoria del *clinamen*) e tutti con la stessa velocità. La deviazione dal *clinamen* di uno di questi atomi è la causa generatrice prima di vortici e poi di mondi.



Il moto è eterno poiché, senza di esso, non vi sarebbe né generazione né corruzione. Vi sono infiniti mondi che nascono e muoiono (la cosa sarà ripresa da Cusano e Bruno).

I movimenti degli atomi sono responsabili di tutti i mutamenti sostanziali o qualitativi che osserviamo nei corpi fisici.

Le (infinite) differenze di forma, di dimensione, di posizione, di distribuzione e di condizione di movimento degli atomi sono responsabili di tutte le differenze qualitative tra le varie sostanze.

La diversa gravità specifica tra le varie sostanze era dovuta al **maggiore o minore vuoto esistente tra gli atomi** che le costituivano.

I cambiamenti di stato avvenivano per il maggiore o minore vuoto che, in particolari condizioni, andava a fraporsi fra gli atomi.

Gli atomi non possono acquistare alcuna qualità sensibile (freddo, caldo, secco, umido, sapore, colore, ...) che è dovuta non ai singoli atomi ma ad aggregati di essi e che, soprattutto, ha carattere soggettivo.

L'aria è composta da particelle minute (la cosa sarà ripresa da Gassendi e Bernoulli).

Il suono crea un moto ondulatorio delle particelle d'aria.

La pressione è dovuta alla presenza di molti corpuscoli d'aria in uno spazio ristretto.

I venti sono originati da differenze di pressione.

La Via Lattea è formata dalla luce di tante stelle.

Le sostanze dolci sono quelle formate da atomi sferici che al loro passaggio solleticano la lingua. Le sostanze amare sono costituite da atomi a molte punte.

Il calore dipende dalla maggiore o minore velocità degli atomi (la cosa sarà ripresa da Galileo e poi da Rumford).

Le forze tra gli atomi si esercitano solo quando vengono a contatto.

Il mondo non necessita di alcun principio ordinatore e di nessun fine: è una chiara affermazione di ateismo ("*La religione nasce dall'ignoranza*").

L'insieme delle cose dette qualificano bene le idee di Leucippo e Democrito e le inseriscono in un filone che sarà quello meccanicistico-materialistico.

Per tutte queste e molte altre cose Democrito fu letteralmente odiato da Platone il quale ebbe a dire che le sue opere dovevano essere bruciate. E ciò avvenne puntualmente nel periodo imperiale (ciò che noi oggi sappiamo di Democrito è dovuto a faticose ricostruzioni dai suoi critici).

Platone (427 - 347 a.C.)

Le cose che noi percepiamo sono solo **copie imperfette di forme ideali** che in un mondo soprasensibile, al di là dello spazio e del tempo, conducono un'esistenza indipendente che può essere avvicinata soltanto dal pensiero puro.

Primato della speculazione teorica sull'indagine empirica e della scienza rispetto alla tecnica. Il lavoro manuale viene disprezzato. (Lo facevano gli schiavi, poi teorizzati da Aristotele).



Le linee e le figure della matematica sono da sostegno materiale, ma in realtà egli si riferisce a linee ed a figure 'perfette' e non disegnabili. I risultati della matematica sono risultati che discendono da quella figura ideale mediante l'applicazione del puro ragionamento.

L'empirismo può aiutare come aiuta la linea 'sgraziata' che rappresenta una retta.

Per la scoperta della verità occorre, ad un certo punto, abbandonare l'empirismo.

Scoperta con la matematica una data 'verità', **non dobbiamo preoccuparci di fare alcuna verifica.** L'uomo deve emanciparsi passando dalla percezione sensibile alla comprensione razionale.

Tale affermazione è ancora oggi del tutto condivisibile solo che, all'epoca, essa ritardò lo sviluppo della scienza poiché si pose di più l'accento sulla 'comprensione razionale' senza dare una qualche enfasi ad una adeguata 'conoscenza sensibile'.

Si sopravvalutò il pensiero e si sottovalutò l'elemento empirico senza una sufficiente conoscenza di quest'ultimo.

In astronomia egli riteneva che gli astronomi dovessero scoprire, nella confusa irregolarità dei moti planetari, il sistema matematico ideale dei moti circolari uniformi.

La numerologia della scala musicale fornisce poi materiali per concepire due grandi moti circolari nell'universo: il primo, che produce la rotazione diurna della sfera delle stelle fisse attorno al proprio asse; il secondo, che produce il moto proprio dei pianeti.

La materia primordiale viene identificata con lo spazio geometrico. Le più piccole particelle degli elementi sono costituite da quattro dei cinque poliedri regolari (il quinto dei quali - il dodecaedro - era stato appena scoperto ed identificato da Platone, con i dodici segni dello Zodiaco).

Atomi di Platone: una particella di terra ha forma di cubo che a sua volta si ottiene dall'unione di 24 triangoli (4 per ogni faccia, ottenuti dividendo le 6 facce quadrate con le due diagonali); analogamente per acqua, terra e fuoco.

Mentre per gli atomisti il mondo nasce casualmente dal caos, per Platone vi è l'opera di un saggio Demiurgo.

Inoltre Platone nega l'esistenza del vuoto. Egli ammette il movimento nel tutto pieno a patto che sia istantaneo e ciclico.

Aristotele (384 - 322 a.C.)

La fisica di Aristotele tenta di spiegarci come è costituito il mondo e perché esso è costituito così e non in altro modo.

Il suo atteggiamento conoscitivo nei riguardi della natura è essenzialmente **contemplativo e descrittivo**: si esclude ogni intervento attivo sulla realtà per portare alla luce le sue intime leggi.



Poiché la quantità è del tutto irrilevante per l'essenza, il tenerne conto non ci porta in alcun modo alla conoscenza dei principi dell'essere e delle cose: **non c'è quindi alcuna ragione di effettuare delle misure** (e di usare quindi procedimenti matematici), si tratta invece di classificare le sostanze ed i movimenti cui esse sono soggette.

L'oggetto della filosofia in generale e della scienza in particolare è formato dalle cose che percepiamo con i sensi. La conoscenza proviene da **percezioni sensibili** anche se l'intelletto ha lo scopo di elaborare tali percezioni.

L'atteggiamento di fronte ai fenomeni naturali è essenzialmente empirico.

Aspetti della fisica e della cosmologia di Aristotele

Il mondo è organizzato secondo due idee principali:

- la teoria dei quattro elementi
- la teoria dei luoghi naturali.

I quattro elementi sono organizzati secondo i gradi di una intrinseca nobiltà: **la terra**, la più vile, sta più in basso; su di essa vi è **l'acqua**, quindi **l'aria** e, da ultimo, **il fuoco**, l'elemento più nobile. A questi elementi occorre aggiungerne un altro che è perfetto, eterno ed incorruttibile, la **quintessenza**, l'etere che si trova al di sopra di tutti gli altri.

L'universo è organizzato in tante **sferi concentriche** che si succedono secondo i vari gradi di nobiltà che sono propri dei quattro elementi e dell'etere: la Terra (sulla quale vi è l'acqua) sta immobile al centro; sopra la terra vi è aria e quindi il fuoco. Sono semplici osservazioni naturali che portano a questa fisica: un pugno di terra affonda nell'acqua, delle bolle d'aria salgono da sotto l'acqua, il fuoco acceso nell'aria sale attraverso quest'ultima.

Tutto ciò è chiuso dentro una prima sfera di cristallo, la sfera della Luna. Sotto il cielo della Luna le cose nascono e muoiono. Dalla prima sfera in poi i pianeti, le sfere che li sostengono, gli astri e l'intero spazio fino all'ottava sfera (quella delle stelle fisse), sono costituiti di etere. **Sopra questo cielo tutto è perfetto, eterno, immutabile ed incorruttibile.**

Il moto è trasmesso dall'ultima sfera a quelle più interne. Quando si arriva alla sfera eterea che contiene incastonata la Luna, il suo moto trascina per attrito l'aria ed il fuoco sottostanti, ciò provoca il turbinio ed il rimescolamento dei quattro elementi fenomeno che è alla base del cambiamento e quindi della generazione e corruzione del mondo 'terreno' o sublunare.

Senza quell'attrito i quattro elementi sarebbero separati: al centro vi sarebbe una sfera di terra, circondata prima da una buccia d'acqua, quindi da una buccia d'aria ed infine da una buccia di fuoco. In particolari condizioni, il fuoco che sale si concentra in un dato luogo e da quel medesimo attrito viene messo in rapida rotazione, originando il fenomeno delle **comete**.

Un oggetto è in moto se occupa successivamente luoghi diversi.

Il moto può essere sostanziale (di generazione e corruzione), qualitativo (modificazione delle qualità), quantitativo (accrescimento e diminuzione), locale (violento o naturale).

Il moto naturale può essere verso l'alto e verso il basso o circolare.

I corpi che si muovono dall'alto in basso o viceversa sono dotati di peso o leggerezza, proprietà che non spettano ai corpi che si muovono di moto circolare.

I gravi cadono a diverse velocità a seconda della loro "massa" e a seconda della densità del mezzo in cui cadono (velocità di caduta proporzionale al peso).

Ogni corpo tende ad andare al suo luogo naturale ed i moti che realizzano questo sono moti naturali (con la teoria dei luoghi naturali viene spiegata anche la morte dei viventi): così la terra si muoverà per andare a ricongiungersi con la terra, l'acqua scorrerà per andare verso l'acqua, l'aria salirà in bollicine dall'acqua, ...

Sono moti violenti quelli provocati artificialmente.

Perché un moto sia possibile è necessario che qualcosa, un motore, lo sostenga: **un sasso è mantenuto in moto dall'aria che, chiudendosi dietro di esso, lo sospinge. Il moto è uniforme se su di esso il motore agisce in modo costante** (il moto è uniforme se su di esso agisce una "forza" costante).

Non può esistere alcun vuoto perché non esisterebbe alcun moto. Inoltre, in caso di esistenza di vuoto, perché un corpo dovrebbe fermarsi qui piuttosto che lì? I corpi o resterebbero in quiete o si muoverebbero all'infinito (**enunciazione in negativo del principio d'inerzia che sarà di Galileo**).

L'infinito non può muoversi e poiché la sfera delle stelle è in moto, si deve concludere che il mondo è finito.

Il limite del mondo è la superficie interna della sfera delle stelle: l'ultima sfera è in moto anche se occupa sempre lo stesso luogo.

Conseguenza della teoria dei luoghi naturali è l'unicità del mondo (tutta la terra con la terra, tutta l'acqua con l'acqua, ...).

La Terra è immobile poiché un corpo scagliato in alto ricade perpendicolarmente nello stesso punto da cui è stato lanciato.

La sfericità della Terra viene dedotta dalle ombre circolari disegnate sulla Luna durante le eclissi.

Il mondo è perfetto perché ha "tre" dimensioni (3 è il numero pitagorico perfetto) e, poiché è perfetto, è anche finito, infatti non gli manca nulla.

Dopo Aristotele il sistema del mondo fu sistemato, perfezionato ed arricchito prima da Ipparco (II secolo a.C.) quindi da Tolomeo (II sec. d.C.) e da altri astronomi.

Furono aggiunte ancora sfere: il "motore primo" fu separato dalla sfera delle stelle fisse; fu poi introdotta la sfera dell' "empireo" (intorno al 1200) dimora dei santi.

Difficoltà:

- si deve supporre costante la distanza di ogni corpo celeste dalla Terra;
- non si spiega la variazione della luminosità apparente dei pianeti;
- non si spiega la variazione del diametro apparente della Luna;
- non si spiega perché le eclissi di Sole a volte sono parziali ed a volte totali.

Per concludere: per Aristotele, i movimenti terrestri dipendono da quelli celesti; dal momento che effetti contrari debbono avere cause contrarie, non è possibile che la rivoluzione dell'ottava sfera (quella delle stelle fisse) sia la sola a produrre e a mantenere i moti terrestri; si rende necessario un secondo principio, e questo consiste nei moti del Sole, della Luna e dei pianeti.

Secondo alcuni storici, l'insieme delle filosofie sviluppate in Grecia, tutte basate sulla concezione dell'immutabilità e dell'immobilità dell'Idea e della Forma, fornivano l'immagine di un **mondo statico e non in divenire**. Non a caso la Grecia fu patria della Statica ma non vi fu alcuno sviluppo della Dinamica.

Lo stoicismo (300 a.C. - 200 d.C.)

La concezione della natura è basata sull'idea materialistica che soltanto i corpi materiali possono esercitare o subire azioni e solo a contatto diretto.
L'intero universo è un cosmo ordinato, governato da un principio di razionalità e di legge.

Lo stoicismo è fertile terreno per l'astrologia. Secondo gli stoici l'uomo può conoscere il suo futuro.

Nell'universo platonico fu tolto quel pezzo che lo qualificava: il contributo della matematica.

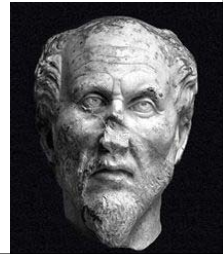
Il neoplatonismo (Plotino 204 - 270 d.C.)

Plotino si considera un seguace di Platone, riuscendo a sostenere che non vi sono differenze sostanziali tra Platone ed Aristotele. Egli tenta quindi di unificare i due sistemi in un sistema unico.

Ne nasce qualcosa di diverso che fornisce il punto di partenza per tutta quella serie di filoni di pensiero che, non avendo più **la minima connessione con la realtà sensibile**, tesero a ritardare lo sviluppo delle scienze della natura.

Sostanziale indifferenza per i fatti che la natura ci offre e **disprezzo per il loro studio empirico**; antitesi tra materia e spirito, con conseguente rifiuto della prima. Ascetismo.

Fascino per l'occulto e tendenza crescente ad affidarsi alla **magia ed alle sue pratiche**.



Claudio Tolomeo (138 - 180 d.C.)

Svilupa il sistema cosmologico di Apollonio ed Ipparco.
Gli influssi sono platonici ma l'impianto è aristotelico.
Scrisse un'opera in 13 volumi, l'*Almagesto (Mathematike Syntaxis)* che vuol dire "il più grande".

Alla base di questo sistema sta il principio della **circolarità ed uniformità dei moti celesti**, uno dei cardini delle concezioni aristoteliche.

Il modello mentale era quello, per dirla con Platone, di *subordinare le leggi fisiche a principi divini e trascendenti, salvando i fatti*, cioè di ricondurre le *apparenze*, costituite dalle vistose irregolarità dei moti planetari, alla *realtà* di un moto che si supponeva *dover essere* circolare ed uniforme, in quanto perfetto, senza inizio e senza fine.

Nella concezione tolemaica **la Terra sta al centro del mondo ed attorno ad essa ruota la sfera celeste con la Luna, il Sole e le stelle fisse**.

Per spiegare il moto di Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno; le elongazioni massime e le retrogradazioni per i primi due; le stazioni e retrogradazioni per gli altri, si suppose che essi si muovessero di *moto uniforme* su circonferenze, dette **epicicli**, i cui centri si muovevano, sempre di *moto uniforme*, su altre circonferenze di diametro maggiore, chiamati **deferenti**.



La rappresentazione geometrica che ne deriva è convincente.

Quando nuove osservazioni introducevano nuovi fatti da spiegare, l'aggiunta di uno o più epicicli sugli epicicli precedenti risolveva i problemi.

Anche la Luna ed il Sole si supponeva che si muovessero su circonferenze attorno alla Terra, ma senza epicicli mancando questi due corpi di stazioni e retrogradazioni; l'unico dato da spiegare era la non uniformità del moto sulla loro traiettoria apparente sulla sfera celeste. Anche questo fatto veniva spiegato con un'opportuna rappresentazione geometrica.



Per spiegare la **precessione degli equinozi** (dovuta, come oggi sappiamo, al movimento a doppio cono dell'asse terrestre) suppose che, al di fuori della sfera stellata (che era l'ottava del suo sistema come in quello di Aristotele) vi fosse una **nona sfera** che ruotava in verso opposto all'ottava. Quando il motore primo fu separato dalla sfera delle stelle fisse, diventò la decima sfera, esterna alla nona.

Argomenti portati da Tolomeo **contro la rotazione della Terra intorno al proprio asse** (neanche si prendeva in considerazione la rotazione della Terra intorno al Sole, in totale disaccordo con la fisica aristotelica):

- 1) **se la Terra ruotasse sul proprio asse verso oriente, una pietra lanciata in alto verticalmente dovrebbe ricadere ad occidente del punto di partenza;**
- 2) **dovremmo sempre vedere nuvole ed uccelli andarsene a grande velocità verso occidente;**
- 3) **la Terra dovrebbe scagliare via da sé tutti gli oggetti non legati saldamente ad essa.**

Il sistema tolemaico, *geocentrico*, costituiva una grandiosa costruzione geometrica, capace di rappresentare in modo completo, *particolareggiato ed anche quantitativo*, tutti gli aspetti del cielo e di prevedere il corso di quei corpi celesti denominati *pianeti*.

Il metodo tolemaico era, comunque, estremamente complicato: erano necessari, in qualche caso, fino a 33 epicicli su epicicli per descrivere le più piccole *irregolarità* osservate nel moto dei *pianeti*.

Si tratta di un modello matematico che non ha nessuna pretesa di essere "vero" (si osservi che nella fisica contemporanea si opera allo stesso modo).

Correnti filosofiche e scientifiche sul finire del medioevo

Nonostante già si conoscessero alcune opere di Aristotele, l'intero corpo dei suoi lavori, che rende ben conto della complessità, globalità e sistematicità del suo pensiero, viene conosciuto nel corso del XII secolo.

È il primo sistema che abbraccia nel suo complesso tutte le branche del pensiero e della conoscenza. **Il fascino che l'aristotelismo iniziò ad esercitare fu enorme.**

Anche tra i cristiani sorse un forte moto di ammirazione: il sistema aristotelico poteva rappresentare il **complemento filosofico**, ciò che la Chiesa aveva sempre cercato, **al Cristianesimo stesso**, un corpo di dottrine che avrebbe finalmente nobilitato culturalmente il Cristianesimo (che fino ad allora oltre alla povera ed "incolta" Bibbia, si era affidato alle pie ma parziali visioni di Platone e dei neoplatonici).

Sfortunatamente in Aristotele, più che in Platone, mancava l'idea di Dio. Questo fu il motivo per cui l'aristotelismo ebbe alterne vicende durante il 1200.

Il contrasto tra aristotelismo e Cristianesimo (insignificanza del posto di Dio, eternità del mondo con conseguente negazione della Creazione, inesistenza del libero arbitrio in un mondo dominato dal movimento delle sfere celesti, la non immortalità dell'anima, il rigido determinismo, ...) fu appianato da S. Tommaso (1225-1274).

Nonostante le aperture di Tommaso verso la scienza, questa non decollava per svariati motivi:

- 1) egli e gli altri pensatori erano a livelli culturali lontanissimi da quelli della gente;
- 2) l'insegnamento medioevale era centrato quasi esclusivamente sullo studio dei classici che ispiravano timore e rispetto per la loro autorità;
- 3) l'illimitata venerazione di cui godeva Aristotele non permetteva passi in avanti sostanziali;
- 4) non si disponeva di una adeguata conoscenza della matematica (si conquisterà solo nel Cinquecento);
- 5) nessuno pensava ad intersecare processi di misura con la conoscenza della natura (non è la quantità che ci permette di conoscere l'essenza delle cose, aveva affermato Aristotele).

In queste condizioni **la scienza non poteva essere altra cosa che una descrizione e classificazione qualitativa** alla quale l'unica dimostrazione necessaria era il ragionamento (che aiuta nella classificazione) e quindi il sillogismo (si noti che per Aristotele anche una dimostrazione geometrica è una classificazione).

XIV secolo

Grande sviluppo della **nautica**, dell'**idraulica**, dell'**orologeria**. Fioriscono, soprattutto in Italia, imprese finanziarie e mercantili che comportarono la nascita delle **banche** e delle **imprese di trasporto**.

La scienza per parte sua marciava in gran parte all'interno di istituzioni dirette da ecclesiastici e si sviluppò essenzialmente intorno a questioni filosofiche strettamente connesse a questioni teologiche.

XV secolo

Diffusione della **stampa** e del torchio. Invenzione della stampa a caratteri mobili (Gutenberg, 1450). La Bibbia, prima opera stampata, si diffonde rapidamente ed aiuterà molto la Riforma. Diventano disponibili le principali opere, tradotte od originali. Si iniziò addirittura la pubblicazione di Opera Omnia accompagnata da commenti e critiche.

È il secolo dei progetti e dei congegni di **Leonardo** (che però non ebbero ulteriori implicazioni in quanto fatti privati e mai pubblicizzati dallo scienziato).

Si realizzarono i primi altiforni, il congegno biella-manovella per la trasformazione del moto rotatorio in alternativo e viceversa. Si cominciò a pensare al '**brevetto**' (si realizza la congiunzione vincente tra lavoro intellettuale, realizzazione pratica e guadagno). I primi brevetti furono realizzati a Firenze ed a Venezia. Si costruirono le prime società per azioni (Italia) ed ebbe un grande sviluppo la ragioneria.

XVI secolo

Realizzazioni tecnologiche: termometro, igrometro, miscele frigorifere, orologi tascabili, matita, macchine per tessuti a maglia, seminatrice automatica, processo moderno per la fabbricazione degli specchi, prima distribuzione capillare dell'acqua in varie città mediante acquedotti (con i conseguenti problemi connessi all'idraulica ed alla pressione, anche dell'aria).

Si riesce a mettere mano alla Riforma del Calendario (1582) e nasce il **primo istituto di ricerca** (Napoli, 1560).

Per la prima volta si riesce ad intravedere una stretta dialettica tra prodotti tecnici ed elaborazione scientifica.

Con la Scuola di Bologna, la matematica si affranca dalla richiesta di soluzioni pratiche affermandosi come matematica pura.

Irruzione della matematica

Da un certo momento storico (tra il Quattrocento ed il Cinquecento), i portati della tecnica nei campi della meccanica e dell'architettura civile e militare fecero riconoscere nella **matematica uno strumento indispensabile**.

Particolarmente in Italia, si ponevano i problemi di misurazioni sempre più accurate di lunghezze, angoli, aree. Occorreva calcolare i volumi, fare degli studi prospettici, di simmetria. Si passò così dalle cose realizzate per mera intuizione alle cose progettate razionalmente con l'uso di proporzioni, simmetrie ed armonie.

Nel Quattrocento, in Italia, che si iniziò la pubblicazione di svariate opere che facevano largo uso della matematica: opere di Brunelleschi, di Leon Battista Alberti, di Piero della Francesca (che ci fornì la "divina proporzione", la sezione aurea), di Giorgio Martini, di Luca Pacioli. Si tratta (a parte Pacioli) di architetti ed artisti di varia natura che per la prima volta ci offrono opere che nascono ampiamente studiate e progettate con l'ausilio della matematica.

Si **iniziano a pubblicare trattati di matematica** scritti in modo divulgativo, molto chiaro, accessibile a molti. **La matematica inizia anche ad entrare come insegnamento impartito nelle Università**, anche se non allo stesso rango di logica e dialettica (si pensi che come "matematico" Galileo guadagnava dalle cinque alle dieci volte meno dei suoi colleghi filosofi che insegnavano nella stessa Università).

Gli studenti cominciano a diventare curiosi ed esigenti. Prima ci si accontentava dell'esposizione degli "Elementi" di Euclide, ora si volevano conoscere tutte le applicazioni pratiche della matematica, si volevano apprendere cose che poi, appena terminati gli studi, sarebbero state di immediata utilità.

Sorse la professione di **matematico pratico** (il primo manuale di matematica pratica è l'Aritmetica di Treviso del 1478 in cui compare la prima chiara spiegazione della moltiplicazione e della divisione!).

Venivano pubblicate, in traduzione latina, opere di classici greci fino ad allora sconosciute (prima edizione latina a stampa di Euclide vide la luce a Venezia nel 1482). Nella prima metà del Cinquecento vennero pubblicate da F. Maurolico, monaco siciliano, traduzioni latine di Archimede, Apollonio e Diofanto e da F. Commandino (intorno al 1560) traduzioni di Euclide, Apollonio, Pappo, Erone, Archimede ed Aristarco.

Crebbero i **seguaci di Archimede**: Niccolò Tartaglia, Guidobaldo dal Monte, Giambattista Benedetti, Giambattista Della Porta, Gerolamo Cardano. Porteranno l'algebra, la geometria e l'aritmetica a risultati del tutto insospettabili solo qualche decennio prima ed anche nel periodo più fulgido dei matematici greci.

L'algebra assume il primato sulla geometria, a seguito proprio dei suoi più recenti successi (Tartaglia ci terrà a sottolineare che le sue elaborazioni non sono tratte né da Platone né da Plotino). Bombelli, insieme all'intera scuola dei matematici bolognesi, riesce ad affrancare la matematica dal suo uso pratico ed a farla marciare per sue linee di sviluppo totalmente indifferenti ad ogni applicazione pratica.

Niccolò Copernico (1473 - 1543)

Nasce da famiglia benestante a Torun, nella Prussia.

1483: muore il padre ed è adottato dallo zio materno, canonico e dal 1489 vescovo e governatore di Ermland.

1491: all'Università di Cracovia, una delle più importanti d'Europa, studia alla Facoltà delle Arti dove approfondisce la formazione aristotelico - tolemaica.

1496: Diritto Canonico a Bologna.

1500: a Roma per un anno.

1501: ritorno in patria e nomina a canonico; "licenza" di proseguire gli studi in Italia. Medicina a Padova, laurea a Ferrara nel 1503 e ritorno a Padova.

1506: ritorno a Ermland, come medico personale e collaboratore dello zio.

1512: *Commentariolus*, specie di programma delle sue idee; manoscritto distribuito a pochi amici, da cui gli deriva grande fama. Morte dello zio.

1514: durante il papato di Leone X, invito al Concilio Laterano per iniziare a discutere di Riforma del Calendario (realizzata nel 1582 anche grazie ai calcoli del "De Revolutionibus"); rifiuta di andare sostenendo di non disporre di osservazioni astronomiche sufficienti.

Probabile prima stesura del *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, completata probabilmente intorno al 1530.

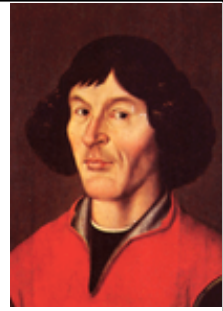
1521: Lutero dà avvio alla sua Riforma.

Le idee di Copernico circolano diffusamente e raccolgono il favore di Papa Clemente VII.

1536: il cardinale Nicola von Schoenberg lo invita ad esporle in modo più completo e dettagliato. Critiche di Lutero e Calvino. Copernico rifiuta la stampa.

1542: inizia la stampa, seguita da Retico (astronomo protestante svizzero) che lascia; poi se ne occupa A. Osiander (teologo protestante erudito) che manipola l'opera con la prefazione.

1543: morte di Copernico e uscita del libro.



Il *De Revolutionibus*

Tesi centrale: **la Terra è in moto circolare intorno al Sole immobile.**

Gli argomenti a sostegno sono aristotelico-scolastici:

"Poiché il cielo è la dimora di tutti ..., non si vede perché non si debba attribuire il moto più al contenuto che al contenente".

Essendo il Sole l'occhio di Dio è più logico che sia sistemato al centro dell'universo.

Se la Terra a causa del suo moto dovesse andare distrutta, a maggior ragione si dovrebbe distruggere la sfera delle stelle.

La Terra non va distrutta a seguito del suo moto perché esso è naturale e non violento.

La caduta non lungo la verticale che dovrebbero avere gli oggetti è spiegata con l'affermazione che l'aria segue il moto della Terra "perché l'aria, impregnata di terra e di acqua, vicina alla terra, segue le sue stesse leggi".

"La condizione di immobilità è considerata [da Aristotele] più nobile e divina della condizione di cambiamento ed instabilità, la quale quindi è più appropriata alla Terra che all'Universo".

Ci vorrebbe un motore enorme per muovere la sfera delle stelle.

La Terra deve ruotare di moto naturale perché è sferica.

Difficoltà degli argomenti di Copernico:

- 1) ha ragione Aristotele quando afferma che la Terra dovrebbe disintegrarsi a causa del suo moto e non la sfera delle stelle; la Terra è soggetta a generazione e corruzione e possiede pesantezza, la sfera delle stelle è eterea, eterna e per essa non esiste pesantezza.
- 2) un motore avrebbe mosso più facilmente le parti eteree dell'universo che non la Terra.
- 3) anche il Sole è sferico e perché dovrebbe essere immobile?
- 4) il sistema è complesso almeno quanto quello aristotelico-tolemaico.



Tycho Brahe (1546 - 1601)

Nasce a Knudstrop, in Danimarca, nel 1546, in una famiglia nobile e ricca, disinteressata alla scienza ed alla cultura in genere.

A 13 anni, Università di Copenaghen per studiare lettere e, dopo l'eclisse di sole del 1560, astronomia.

Studi a Lipsia, Wittenberg, Rostoch e Basilea.



1563: osservazione celeste importante, la congiunzione Giove - Saturno.

Si rende conto della non esattezza delle tavole astronomiche e, a differenza di altri studiosi, sente la necessità di costruire tavole con osservazioni completamente nuove e con tecniche più accurate.

Mentre per Copernico un errore di 10 minuti era accettabile, Tycho inizia a ragionare in termini di frazioni di minuto e per far ciò necessita di strumenti molto più avanzati.

1572: osserva una nuova stella nella costellazione di Cassiopea, ammirazione e sostegno economico del re Federico II che gli regala una piccola isola, Hween, sulla quale finanzia la costruzione di un edificio, Uraniborg, progettato da Thyco, per l'osservazione del cielo.

Non usa strumenti nuovi, ma di dimensioni maggiori e fissati al posto dove erano situati, riducendo gli errori nelle misure. Usa clessidre a mercurio.

1597: morte di Federico II; le invidie di molti nobili lo costringono ad abbandonare l'osservatorio.

Si reca in Boemia presso Rodolfo II che gli trova una sistemazione a Praga come matematico imperiale. Porta con sé i suoi manoscritti e parte dei collaboratori, ai quali si aggiunge Kepler.

Muore a 55 anni.

Tycho ha effettuato una **immensa quantità di osservazioni**, con la migliore strumentazione disponibile; per primo riconosce l'influenza della rifrazione atmosferica.

Le sue osservazioni saranno alla base delle tavole astronomiche di Kepler nel 1627.

Ha catalogato quasi 800 stelle.

Cosmologia di Tycho: partendo dal pregiudizio di universo finito e relativamente limitato, rifiuta il sistema copernicano perché **non osserva la parallasse stellare**.

Nuovo **sistema astronomico ibrido**:

Terra immobile al centro dell'universo mentre la Luna ed il Sole gli girano intorno.

I pianeti, invece, ruotano tutti intorno al Sole.

Il suo sistema aiuta l'affermazione di quello copernicano: l'orbita del Sole interseca quelle di Mercurio, Venere e Marte e ciò comporta la distruzione delle sfere cristalline aristoteliche dove tali pianeti sarebbero stati incastonati.

Trasforma il significato del termine latino 'orbis' da quello di sfera a quello di orbita.

Fatto dirompente: se non ci sono le sfere, cos'è che sorregge i pianeti?

Problema dell'individuazione delle forze che agiscono nella dinamica planetaria.



Johann Kepler (1571 - 1630)

Nasce a Weil der Stadt in Württemberg, da famiglia protestante e di modeste condizioni economiche.

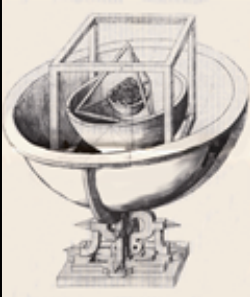
1579: studia a Tübinga dove diviene seguace di Copernico.

1594: rifiuta la tentazione di seguire la carriera ecclesiastica e sceglie lo studio della scienza accettando la soprintendenza della matematica in Stiria; insegna a Graz e "arrotonda" con oroscopi e predizioni.

1595: *Mysterium Cosmographicum*, in cui scopre che vi sono una mole di ragioni tecniche contro il sistema tolemaico e in favore di quello copernicano. Il *Mysterium*, mandato sia a Tycho che a Galileo, è intriso di misticismo.

1597: breve scambio epistolare con Galileo (mentre era a Padova);

si confidano di essere copernicani, Kepler apertamente, Galileo titubante, per non avere ancora "sensate esperienze" a sostegno; gli scritti di Kepler sono noiosi, contorti, difficili e prolissi; vi si faceva una enorme fatica a ricavare qualcosa di utile.



Sistema kepleriano: un mondo di orbite che si incastrano alternativamente con i cinque solidi regolari. La sfera di Saturno è circoscritta ad un cubo; nel cubo è inscritta la sfera di Giove che, a sua volta, è circoscritta ad un tetraedro; questo tetraedro è circoscritto alla sfera di Marte che, a sua volta, è inscritta in un dodecaedro; al dodecaedro, per circoscrizioni ed iscrizioni successive, segue la sfera della Terra, l'icosaedro, la sfera di Venere, l'ottaedro, la sfera di Mercurio, quindi il Sole al centro dell'intero sistema.

1598: a seguito della persecuzione contro i protestanti da parte dell'Arciduca Ferdinando d'Austria, Kepler fugge a Praga, dove lavora come assistente di Tycho.

1601: morte di Tycho e nomina (1602) a suo successore da parte di Rodolfo II.

1609: *Astronomia Nova*, in cui, dallo studio delle posizioni di Marte, ricava le **prime due leggi** (orbite ellittiche e costanza della velocità areolare) solo in questo ambito ristretto.

1610: *Dissertatio cum Nuntio Sidereo*, in cui accoglie con entusiasmo i lavori di Galileo, ma non lo convincono i satelliti di Giove ("*Perché dovrebbero ruotare intorno a Giove se su questo pianeta non vi è nessuno a contemplare tale spettacolo?*"). Nella *Narratio*, dopo varie osservazioni al telescopio, dà ragione completa a Galileo.

1611: *Diottrica*.

1615: *Stereometria doliorum*, trattato sulla cubatura delle botti che dà un certo impulso a ricerche di analisi infinitesimale.

1618-1620: *Compendio di astronomia copernicana*, in cui estende le sue due prime leggi a tutti i pianeti (messo all'Indice nel 1632, in occasione del Processo a Galileo e tolto solo nel 1821).

1619: trattato sulle comete e, soprattutto, le *Harmonices Mundi* in cui è enunciata la **terza legge**.

1627: *Tavole Rudolfine*, che sostituiranno definitivamente le precedenti e che per circa 100 anni saranno la bibbia di astronomi e naviganti.

1630: muore a Regensburg (Baviera).

Kepler ha contribuito ad eliminare dal sistema copernicano molte difficoltà e stonature che rappresentavano ancora un retaggio delle filosofie aristotelica e della cosmologia tolemaica.

Come Tycho ha messo in dubbio l'esistenza delle sfere che sostengono i pianeti e iniziato a parlare di "orbite".

È stato il primo a capire che era necessario individuare una **causa** che rendesse conto di questo moto dei pianeti su determinate orbite, oltre ad aver capito (ed iniziato con ciò ad eliminare le pitagorico-platoniche circonferenze) l'esistenza di orbite ellittiche.

Digressione: Quando è nata la scienza moderna?

Molti storici della scienza concordano nel collocare la nascita della scienza nel XVII Secolo, con l'opera di Galileo e Newton.

Una voce dissonante è quella di Lucio Russo, "La rivoluzione dimenticata" (Feltrinelli, 1996).

Dalla prefazione di Marcello Cini:

"Russo dimostra che la nascita della scienza moderna va retrodatata di duemila anni, alla fine del IV secolo a.C., e che i due soli 'scienziati' dell'antichità noti al vasto pubblico, Euclide e Archimede, non furono isolati e incerti precursori di una forma di pensiero che solo nel XVII secolo sarebbe rigogliosamente fiorita. Furono al contrario due esponenti di spicco di una vasta schiera di raffinati e avanzatissimi scienziati, protagonisti di una rivoluzione scientifica giunta a livelli di elaborazione teorica e di pratica sperimentale tali da far apparire a loro volta Galileo e Newton come apprendisti un po' confusi, anche se geniali, alle prime armi."

[Dalla relazione di Alberto Pirola]

Tesi fondamentale: l'età ellenistica non è un'epoca di decadenza, ma è il periodo in cui nacque e si sviluppò una scienza che non ha nulla da invidiare alla scienza moderna.

Osservazioni introduttive:

Oggi viviamo in una civiltà in cui la scienza ha indubbiamente un ruolo centrale, la sua nascita perciò è a tutti gli effetti un nodo fondamentale della storia. L'età ellenistica era sempre stata confrontata con l'età classica e con l'età romana, ovvero dal punto di vista di civiltà prescientifiche e assolutamente estranee ad essa, per questo **veniva considerata un'epoca di decadenza.**

Inoltre abbiamo **scarse conoscenze sui personaggi di spicco del III sec e dei fatti storici tra il 301 a.C.** (fine delle storie di Diodoro Siculo) e il 221 a.C. (inizio delle storie di Polibio), quasi tutti gli scritti del tempo sono andati perduti e non abbiamo motivo di sperare che quelli superstiti siano quelli di più alto livello.

Infine in età imperiale e soprattutto **nel Medioevo si è dimenticato tutto**, solo negli ultimi secoli anche grazie ai ritrovamenti di papiri si cominciano a recuperare alcune conoscenze.

Ellenismo

L'inizio dell'età ellenistica si identifica convenzionalmente con la morte di Alessandro Magno avvenuta nel **323 a.C.** Nel III secolo nacque e si sviluppò la scienza, perlopiù ad Alessandria d'Egitto, la cui supremazia culturale fu indiscussa grazie soprattutto alla politica dei primi Tolomei.

Ad Alessandria studiarono **Euclide, Archimede, Aristarco, Erofilo, Eratostene** etc. A partire dal 212 a.C. (data della distruzione di Siracusa) tutti i **centri ellenistici vennero conquistati e spesso distrutti dai Romani, la scienza ebbe quindi un rapido declino.**

Dal 145 a.C. Tolomeo VII inizia ad Alessandria una **persecuzione della classe dirigente greca**, da quel momento l'attività scientifica cessò. Tale politica fu poi perseguita dai suoi successori e favorita dai Romani. Convenzionalmente l'età ellenistica viene fatta terminare con l'annessione dell'Egitto all'impero romano (30 a.C.) ma anche dopo quella data la cultura ellenistica non sparì: questi popoli infatti non assorbirono dai Romani né la lingua, né la cultura, né la tecnologia.

Nei primi due secoli dell'era cristiana, grazie soprattutto alla "**pax romana**", vi è una parziale ripresa della scienza ad Alessandria (Tolomeo, Erone) fino a Diofanto, ultimo scienziato ellenistico di un certo livello che visse tra il II e il IV secolo d.C.

La **fine della scienza ellenistica** si può collocare nel 415 quando Ipazia fu linciata ad Alessandria da un gruppo di cristiani fanatici per motivi religiosi.



Scienza:

La **scienza esatta** è un insieme di teorie scientifiche che hanno le seguenti caratteristiche:

- 1- le affermazioni scientifiche non riguardano oggetti concreti ma **enti teorici** specifici
- 2- hanno una struttura rigorosamente **deduttiva** (partendo da pochi enunciati fondamentali si risolvono un numero illimitato di problemi attraverso dimostrazioni e calcoli)
- 3- le applicazioni al mondo reale sono basate su **regole di corrispondenza** tra gli enti teorici e gli oggetti concreti, esse sono invalidate dal **metodo sperimentale**.

A volte le regole di corrispondenza arrivano a un punto in cui non associano gli enti teorici a nulla di già esistente ma che può essere creato: nasce dunque la **tecnologia scientifica** che non prescinde dalla scienza esatta perché si trova solamente all'interno delle teorie scientifiche.

Le **scienze empiriche** invece si servono del metodo sperimentale a scopo puramente conoscitivo, non soddisfano dunque il secondo requisito. Le teorie riguardano un ambito estremamente specifico e non sono esportabili.

Origini della scienza ellenistica

In età arcaica e classica non fu mai sviluppata alcuna teoria scientifica, ad esempio le teorie atomiche di Leucippo e Democrito erano soltanto speculazioni filosofiche e non avevano affatto le caratteristiche di una teoria scientifica: non erano teorie assiomatico-deduttive, si occupavano di oggetti concreti e non di enti teorici e non utilizzavano il metodo sperimentale.

La scienza esatta cominciò invece a svilupparsi proprio in età ellenistica, il caso della fisica è esemplare per mostrare il salto di qualità metodologico avvenuto.

Si consideri ad esempio il seguente passo di Aristotele:

"Se, poi, [la forza] A muoverà B nel tempo T secondo la lunghezza L, la metà di A, cioè E, non muoverà B nel tempo T né in una parte del tempo T, secondo una parte della lunghezza L che sia rispetto all'intero L nella stessa proporzione in cui è la forza A rispetto alla forza E: [...] se fosse altrimenti, un uomo solo muoverebbe la nave, qualora venissero numericamente divise la forza di quelli che la tirano a secco e la lunghezza secondo cui tutti la muovono." Aristotele, *Physica*, VII, 5

Si nota immediatamente come Aristotele innanzitutto non operi con enti teorici ma consideri le forze, le lunghezze e i tempi come oggetti a tutti gli effetti concreti. Inoltre dimostra tale enunciato partendo da un dato completamente empirico, ma senza fare riferimento ad alcuna regola o ad alcuna dimostrazione rigorosa.

Archimede invece nella sua opera *"Sull'equilibrio delle figure piane"* si occupa di meccanica costruendo una teoria scientifica a tutti gli effetti e riesce addirittura a confutare questo passo di Aristotele dimostrandone rigorosamente la falsità (la leggenda narra inoltre che fosse riuscito a costruire un marchingegno che permettesse a lui stesso di muovere da solo una nave).

Archimede in un dipinto del Fetti (1620)



In *"Sui galleggianti"* Archimede costruì la teoria scientifica dell'idrostatica che fondò sul seguente postulato:

"Porzioni di liquido tra loro contigue e allo stesso livello non sono in equilibrio se sono compresse in misura diversa [...] e ciascuna porzione è compressa dal peso del liquido che è sopra di sé in verticale, purché il liquido non sia rinchiuso in qualcosa o compresso da qualcos'altro." Archimede, *Sui Galleggianti*, I, 6

La teoria scientifica dell'idrostatica che, fondata semplicemente su questo postulato, riesce a dimostrare rigorosamente una serie di importanti risultati favorendo decisamente anche lo sviluppo dell'ingegneria navale è un brillante esempio dell'entità della rivoluzione scientifica ellenistica e dell'enorme salto di qualità avvenuto rispetto all'epoca precedente.

Ma quali sono le cause della nascita della scienza in epoca ellenistica?

È innanzitutto fondamentale considerare il nuovo tipo di relazioni che si instaurarono tra la civiltà greca e le antiche civiltà egiziane e mesopotamiche. **Gli antichi imperi erano superiori ai Greci per quanto riguarda la tecnologia**, a causa esclusivamente della loro tradizione millenaria, in quanto nel caso di civiltà prescientifiche la tecnologia consiste soltanto in un progressivo accumulo di conoscenze, mentre i **Greci erano superiori in un altro campo, altrettanto importante: avevano la filosofia**.

La scienza nacque dunque probabilmente dalla necessità che ebbero i Greci di gestire questa tecnologia superiore con la propria superiore razionalità. Poiché il metodo scientifico richiede l'uso contemporaneo di due differenti livelli di discorso (uno all'interno della teoria e uno che riguarda gli oggetti concreti) è probabile che la scienza venne favorita dalla compresenza di due diverse culture. I Greci seppero adattare le conoscenze empiriche e tecnologiche degli antichi imperi ai propri superiori schemi concettuali: questo in ultima analisi fu il salto di qualità metodologico che permise la nascita della scienza.

La Matematica Ellenistica

In età classica la cosiddetta matematica ellenica aveva ottenuto alcuni risultati degni di nota ma era giunta soprattutto ad aporie che nessuno era riuscito a spiegare (si considerino ad esempio i paradossi di Zenone o l'incommensurabilità della diagonale del quadrato rispetto al suo lato osservata dai Pitagorici).

A partire dagli *Elementi* di Euclide si superano le aporie proprio grazie alla costruzione di una vera e propria teoria scientifica. Egli definisce gli enti fondamentali ed enuncia i seguenti 5 postulati indimostrabili:

1. [E' possibile] tracciare un segmento da ogni punto a ogni punto.
2. [E' possibile] prolungare con continuità un segmento in una retta.
3. [E' possibile] tracciare una circonferenza con qualsiasi centro e raggio.
4. Tutti gli angoli retti sono eguali tra loro.
5. Se una retta intersecandone altre due forma nello stesso semipiano angoli interni la cui somma è minore di due retti, allora le due rette si incontrano in quel semipiano" Euclide, *Elementi*, I

A partire da Euclide la geometria piana, e più in generale qualsiasi teoria scientifica, verranno sempre costruite secondo il medesimo paradigma: a partire dai postulati indimostrabili si può affermare una verità solo dimostrandola, le verità dimostrate a partire dai postulati sono dette *teoremi*. La matematica diventa quindi indipendente dalla filosofia e dalle applicazioni pratiche: con Euclide nasce la matematica come scienza.

...

Alcuni altri aspetti della rivoluzione scientifica

Ottica

L'*ottica geometrica* fu una delle prime applicazioni della matematica ellenistica.

L'opera fondamentale per lo studio di questa disciplina era *ta optikà* di Euclide. Le leggi della propagazione diretta erano già state enunciate da Platone ma Euclide costruì una vera e propria teoria scientifica: operò con enti teorici mutuati dalla geometria attraverso diverse regole di corrispondenza. Euclide arrivò anche a stabilire leggi quantitative: studiò le ombre e le grandezze apparenti degli oggetti ed elaborò le **leggi della prospettiva**.

La prospettiva venne poi **dimenticata nel medioevo** e non fu mai rielaborata indipendentemente, **ricomparve solo con la riscoperta dei lavori di età ellenistica**. L'ottica fu molto importante in molti campi, ad esempio l'astronomia.

In epoche successive la teoria euclidea venne decisamente sottovalutata poiché essa considerava i raggi di luce che partivano dagli occhi, si tratta però di un grosso equivoco: Euclide considerava i raggi proprio come i segmenti, ovvero come enti teorici, ma in seguito, perse totalmente queste nozioni, essi vennero invece considerati come enti concreti e proprio per questo la teoria non venne più capita.

Astronomia

Anche essa era in strettissima relazione con la matematica. Ci sono rimaste pochissime opere e tutte marginali, abbiamo perciò soltanto poche informazioni: sappiamo ad esempio che **Iparco (II secolo a.C.) aveva scoperto la precessione degli equinozi** e aveva misurato la distanza media terra-luna e **Aristarco (III secolo a.C.) aveva formulato una teoria eliocentrica** ipotizzando un moto di rivoluzione intorno al sole e un moto di rotazione diurno attorno ad un'asse inclinata rispetto all'orbita.

Mentre Aristotele credeva in uno spazio e in un moto assoluti, in epoca ellenistica l'attribuzione di moti alla terra aveva finito per generare una concezione relativistica del moto e questo lo deduciamo dai seguenti elementi: Euclide in *ta optikà* osservava che le apparenze dipendono dal movimento relativo tra osservatore e oggetto osservato; Archimede studiava i moti della terra non in assoluto ma rispetto alle stelle fisse; l'opinione che Tolomeo confutava ipotizzava un moto che potesse essere attribuito equivalentemente alla terra o al cielo o ad ambedue; anche **in molte altre opere ellenistiche veniva illustrata la relatività del moto.**

Decadenza e fine della scienza ellenistica

Nel II secolo a.C. vennero conquistate ulteriori conoscenze, ma non vennero più formulate nuove teorie scientifiche, anzi il metodo scientifico venne progressivamente rifiutato. Tale rifiuto, che è esplicito in Plutarco, venne teorizzato dagli scettici, ...

... all'epoca di Sesto Empirico, proprio perché si erano **perse le nozioni di teoria scientifica** e di ente teorico, il *lektòn* [concetto] veniva **concepito come ente concreto**, per questo il metodo scientifico ellenistico e le relative teorie non potevano più essere capite.

Alcuni sostengono che la causa della crisi della scienza fu **l'eccessiva autorità di Aristotele**, ma essa **si manifestò solo in epoche successive, fu quindi un effetto della crisi** e non una sua causa.

I Romani uccisero Archimede, conquistarono e spesso raserò al suolo molti centri di cultura ellenistici; nel 145 a.C. lo stesso Tolomeo VIII eliminò la comunità greca ad Alessandria. I Romani, civiltà a tutti gli effetti prescientifica, non si interessarono mai delle opere scientifiche ellenistiche: Varrone le inquadrava tutte all'interno della filosofia, Seneca e Plinio erano affascinati dalle conclusioni a cui esse erano arrivate ma capivano ben poco delle argomentazioni, spiegavano dunque le conclusioni in maniera arbitraria.

Ad esempio Plinio riprese l'osservazione di Pappo che aveva dimostrato rigorosamente che le celle degli alveari delle api sono esagonali poiché l'esagono è il poligono regolare il cui rapporto area/perimetro è maggiore, sostituendo a queste complesse argomentazioni l'osservazione che le api, avendo sei zampe, costruirebbero un lato per ciascuna zampa... In seguito, per molto tempo, i capolavori della scienza antica vennero considerati le opere di Seneca e di Plinio mentre tutte le teorie e i risultati a cui la scienza ellenistica era arrivata, non essendo più comprese, vennero totalmente dimenticati.