SIS 2001
Dalla forza di Aristotele al campo elettromagnetico

———

Vittorio de Alfaro
Dip. di Fisica Teorica, Università di Torino

Gennaio 2002

Chapter 1

La forza per Aristotele.

1.1 Introduzione.

Talvolta si propone di delineare la "storia" di un concetto, la sua evoluzione storica[1]. Tipicamente si prende come filo conduttore un concetto moderno, estendendone il significato in modo da seguire storicamente una parte del pensiero dedicato al mondo fisico.

Questo metodo di costruire la storia di un concetto viene talvolta applicato a tutta una sfera di pensiero filosofico e fisico occidentale, in cui il concetto ha cambiato radicalmente il significato e la funzione.

Ma ció ha senso soltanto all'interno di un quadro di riferimento omogeneo, altrimenti in questo modo di "fare" la storia si corrono alcuni rischi. Si può far credere che il significato dei concetti sia immutabile nel corso della storia, e che solo variino i dettagli: si possono far passare personaggi e periodi del passato come "precursori" e giudicarli in base alla loro maggiore o minore rispondenza alle idee moderne.

Sarebbe necessario un filologo per stabilire quale parola veniva usata da quale autore per intendere "forza" e quali ambiti culturali erano legati alla parola. Infatti il significato delle parole è strettamente dipendente dal contesto culturale. Se parliamo di forza oggi, dobbiamo sapere se ne parliamo da fisici, da atleti, se intendiamo parlare della forza pubblica o di quella del destino o di quella viva. Anche nel quadro della fisica i concetti sono ambigui e vanno chiariti, si può parlare per esempio della forza viva (introdotta da Leibniz per indicare l'energia cinetica)[2]. Solo la ricostruzione filologica precisa può chiarire l'ambito nel quale si colloca la parola e quindi fornire una chiave per i suoi significati.

Prendiamo ad esempio il concetto di forza nella fisica moderna (si intende da Galileo e Newton in poi). Già in un caso come questo il quadro di riferimento cambia decisamente. Se poi ci riferiamo al periodo precedente la fisica moderna (per intenderci, prima di Galileo e di Newton) parliamo di concezioni diverse del mondo e inseguire un concetto attraverso ere culturali molto diverse ha poco senso.

Far passare qualcuno per precursore è rendere un cattivo servizio: significa valutarlo/a solo perché poi è venuto qualcun altro/a che è andato/a più avanti. È meglio valutare indipendentemente da quanto è avvenuto dopo; in fondo, la persona in questione non conosceva il futuro e non poteva scegliere di chi essere precursore.

Si deve allora rifiutare ogni compito del tipo di quello proposto, di seguire cioé la storia di un concetto attraverso culture diverse? Sarebbe meglio; ma è stato fatto e si farà ancora. Può perfino capitare un tema cosí congegnato.

Quindi per una volta faremo anche noi questo esercizio, con tutte le cautele che la situazione impone.

Dovremo seguire il concetto di "forza" da Aristotele ai tempi moderni. Intenderemo come forza "la causa del movimento" nelle diverse culture. Per movimento vorremmo intenderemo la traslazione nello spazio di un oggetto che resta immutato; ma già qui ci troveremo in dificoltà. Nella Grecia si aveva del movimento una concezione più vasta: ogni tipo di "mutamento dell'essere". Dovremo tenerne conto.

1.2 Aristotele.

Non possiamo lanciarci in un esame analitico delle idee dei varii filosofi antichi a proposito dell'essere e del divenire. Considereremo soltanto Aristotele (al Sufi degli Arabi, il Filosofo per antonomasia).

Di Aristotele possediamo i trattati scientifici, opere scritte per fare lezione; non possediamo le opere dirette ad un pubblico più ampio, di cui conosciamo solo alcuni frammenti. Dopo la conquista di Atene da parte di Silla (-146) una copia delle sue opere scientifiche, trovata nella cantina di un discendente di un discepolo, fu portata a Roma e pubblicata.

In questo momento ci interessa Aristotele al suo tempo e le sue concezioni sulla causa del movimento (definizione di "forza"). Aristotele dà un'impronta di immanenza alla sua filosofia. Si occupa del mondo osservabile in quanto tale, che va spiegato per se stesso e trova la giustificazione della sua essenza e della sua costituzione in se stesso e non in riferimento ad altre

[1] La ricostruzione storica è tutto il contrario di un frattale. Il livello di ingrandimento con cui trattiamo un processo storico influenza enormemente le conclusioni che ne traiamo. Col nostro livello di ingrandimento, sarò molto sommario. Parleremo di principii. Spero che quello che dico oggi invogli ad occuparsi piú seriamente dei fatti.

[2] Nell'ambito dela fisica moderna con la parola "forza" fino al '900 si sono intesi concetti diversi: la forza viva (energia cinetica), la quantità di moto, la forza propria etc.

realtà, incorporee. Per Platone in definitiva il mondo delle cose trae forza e significato dal mondo, separato, delle idee. Per Aristotele il mondo ha un'esistenza indipendente da concetti o da enti trascendenti. La sua filosofia riguarda il reale. È interessato alle scienze classificatorie (scienze naturali) non soltanto alla geometria e alla matematica.

La filosofia greca antica aveva discusso la problematica relativa al "cambiamento dell'essere", negato da molti come illusorio. Se gli ionici avevano considerato l'essere unico ed immutabile realizzato nella varietà delle cose naturali, la scuola eleatica considerava come reale solo la sostanza immobile e condannava come apparenza il mutamento, la varietà e la molteplicità delle cose.

La dottrina platonica delle idee fonda la giustificazione della capacità intellettuale umana nella conoscenza del mondo che l'anima possiede perché vi è unità tra l'anima e la realtà che è l'oggetto del sapere. Ma l'essenza della realtà sono le idee, criteri di valutazione della scienza, cause del grado di valore presente nelle cose naturali che, trascendenti rispetto alle cose stesse, costituiscono modi dell'essere assoluto e spiegano le cose del mondo.

Ma Aristotele è un perfetto professore. L'istituzione di insegnamento superiore che egli fonda e gestisce è simile ad una università all'antica: vi si si poteva studiare ogni disciplina dello scibile. E Aristotele è un professore che ha rifondato e conosce tutte le discipline.

È impossibile ripercorrere qui tutta la sua concezione del mondo. La sua filosofia è la teoria generale dell'esistente, della conoscenza, di come ragionare sull'esistente (la logica), la descrizione del funzionamento delle cose esistenti, della varietà e delle mutazioni. Non faremmo sufficiente giustizia alla complessità del suo pensiero e alla sua capacità di classificare e spiegare.

Vale la caratterizzazione generale dell'immanenza dei principii che reggono il mondo dei fatti; Aristotele si oppone al platonismo secondo cui il vero essere è il mondo trascendentale delle idee o forme, di cui il mondo delle cose è un riflesso. L'oggetto della filosofia e della scienza è per Aristotele il mondo delle cose sensibili; la conoscenza parte dall'esperienza sensibile e l'intelletto elabora i dati. L'atteggiamento di fondo è dunque empirico. La verità è immanente, le cause e le ragioni dei moti sono immanenti alla natura stessa.

Con questi principii, armati della teoria generale del metodo per trarre concatenazioni logiche e osservando i fatti naturali, il ragionamento deve riuscire a formare la conoscenza del mondo. In particolare ci interessano le sue concezioni sulla causa del movimento, la definizione di "forza".

Le premesse sono buone, i risultati profondi e di grandissima generalità. Nella struttura generale Aristotele rivela le grandissime capacità di sistematizzazione e generalizzazione. Costruisce la teoria del tutto ed ha una risposta a tutto; tutto viene organizzato da una mente potentissima: la teoria dell'essere, la logica, la fisica, l'astronomia, le scienze naturali. In queste ultime, e specialmente nella biologia marina, Aristotele rivela le sue capacità di osservatore e sperimentatore. Nella geometria i postulati sono le proprietà generali mentre i teoremi si classificano a seconda delle proprietà che realizzano (i concetti usati nellla loro dimostrazione). Questo sarà il modello delle classificazioni nella biologia: il ruolo dei postulati è preso dai grandi principii (respirazione, deambulazione, riproduzione etc) e i diversi animali sono classificati a seconda della realizzazione di questi principii generali. Al contrario la matematica ha una funzione secondaria nel pensiero aristotelico.

Ma il ragionamento puro, in generale di carattere qualitativo e classificatorio, mai quantitativo, non porta a risultati validi: pur partendo da buone premesse di immanenza si giunge a "spiegazioni" puramente verbali (e non capita solo ad Aristotele e non capitava solo allora). Giudicati col metro di oggi i suoi risultati non hanno valore conoscitivo: il ragionamento non basta. Servono fatti selezionati con attenzione e proposito ed osservati in modo da astrarre in difficili condizioni i principii guida della conoscenza di quell'insieme di fenomeni. Lo sappiamo da tutta la lenta evoluzione della scienza moderna. Ma Aristotele deve concludere, vuole formulare una teoria generale del tutto, gli mancano la modestia di non trarre conseguenze troppo generali da poche conoscenze e la pazienza di mettersi umilmente a sperimentare per qualche centinaio di anni prima di scoprire qualcosa delle leggi della natura, con un atteggiamento comune a molti, soprattutto ai costruttori di sistemi filosofici ma anche a scienziati che generalizzano troppo in fretta, operazione sempre pericolosa. Stiamo scherzando, naturalmente, guardando con gli occhi degli scienziati moderni ai risultati di AristoteleṀa certo non vi è alcun risultato del pensiero aristotelico che abbia alcun valore per la fisica moderna o per le scienze naturali.

Tuttavia Aristotele ha costituito il punto di riferimento per la scienza nmedievale e fino al '600. Nel mondo antico e medievale la discussione sulle "forze" passava attraverso il quadro steso da Aristotele. Accenniamo dunque sommariamente agli aspetti del suo pensiero che trattano argomenti vicini a ció che oggi chiamiamo fisica.

L'esposizione che segue tratta Aristotele ingiustamente: non sono esposte le analisi e i ragionamenti che lo conducono alle conclusioni. Non sono esposte le capacità di osservazione che Aristotele mostra per esempio nella biologia. Non si possono apprezzare le sue immense capacità di organizzazione, sistemazione e classificazione. Vogliamo soltanto esporre le poche argomentazioni che ci servono per il nostro fine (improprio ma assegnato): il concetto di forza nella storia della scienza.

1.3 La vita.

Aristotele era nato a Stagira, presso la penisola calcidica, nel 384 - 83 a, C.; entrò nella scuola di Platone a 17 anni e vi rimase per altri 20 circa, fino alla morte del vecchio filosofo. Considerò sempre Platone come il suo maestro; ma, come disse in un passo ben noto della Etica a Nicomaco, "l'amicizia e la verità sono entrambe care, ma è cosa santa onorare di piú la verità".

Morto Platone era cessato il profondo legame con l'Accademia. Aristotele si recò ad Asso, dove, insieme ad altri due scolari di Platone (Erasto e Corisco) ebbe la protezione del tiranno Ermia di cui sposò una figlia, Pitia. Tre anni dopo si trasferì a Mitilene. Nel 342 a.C. Filippo, re di Macedonia, lo volle a Pella per assumere l'educazione del figlio Alessandro. Cosí Aristotele potè formarlo, conunicandogli certo la convinzione del valore della cultura greca, in grado di dominare il mondo se posta sotto un capo unico.

13 anni piú tardi Aristotele ritornò ad Atene fondando il Liceo che comprendeva l'edificio, il giardino e la passeggiata (il peripathos). Vi tenne corsi regolari; l'amicizia del potentissimo Alessandro metteva a disposizione mezzi di studio eccezionali che facilitarono le sue ricerche in tutte le direzioni conosciute.

Alla morte di Alessandro, nel 323, l'insurrezione del partito nazionalista ateniese contro il dominio macedone lo obbligò a fuggire a Calcide, nella isola di Eubea. Lì, a circa 63 anni, morì nel 322 - 321 per una malattia allo stomaco.

I suoi scritti si dividono in due classi: quelli essoterici (diretti verso il pubblico) e quelli acroamatici, destinati alle lezioni. Questi ultimi vennero ritrovati nella cantina dei discendenti di Corisco; portate a Roma da Silla, vennero pubblicate da Andronico da Rodi intorno alla metà del secolo I a.C., soppiantando le opere essoteriche di cui oggi ci resta solo qualche frammento.

Tra gli scritti acroamatici troviamo le seguenti opere. Logica: Categorie, Interpretazione, Analitici primi (due libri), Analitici secondi (due), Topici (otto), Elenchi sofistici. Metafisica (14 libri scritti in tempi diversi): Lezioni di Fisica (otto libri), Sul Cielo (quattro), Sulla generazione e la Corruzione (due), Meteore (quattro), Storia degli Animali, Sulle parti degli Animali, Movimento degli Animali, Sull'Anima (tre), Parva Naturalia, Problemi (alcuni certo suoi). Etica etc.: Etica ad Eudemo (lo scolaro di Aristotele che la editò), Etica a Nicomaco (suo figlio), Grande Etica, Politica (8 libri), Costituzione degli Ateniesi (unica rimasta delle 158); Economica, Retorica (3 libri), Poetica (ci è giunta solo in parte). Sono andate perdute le opere storiche sui Pitagorici e altri.

Sono considerati non di Aristotele gli scritti Economica (secondo libro), Sulle linee indivisibili, Meccanismi, Fisiognomica, Retorica ad Alessandro, Melisso Senofane e Gorgia.

1.4 Logica e filosofia.

Il procedimento generale (che garantisce anche il valore di verità delle scienze) è la logica che, considerata come base generale della conoscenza, costituisce in realtà una scienza nuova. Essa è basata sull'idea che le determinazioni fondamentali del pensiero (categorie) corrispondono esattamente alle determinazioni dell'essere. Esse sono 10 (i 10 predicati): la sostanza, la quantità , la qualità, la relazione, il dove, il quando, lo stato in luogo, il possesso, l'azione attiva e passiva. In buona parte la logica è basata sulle proprietà della frase nella lingua greca. Aristotele esamina quindi la proposizione e le concatenazioni di proposizioni (sillogismi' induzioni, processo della conoscenza) su cui non possiamo addentrarci.

La filosofia, presupposto di tutte le scienze, ha per oggetto l'essere in quanto tale e quindi in primo luogo l'essere in generale (teologia), poi le scienze delle realtà immutabili (quinta essenza, relativa ai mondi celesti) e quindi le scienze sublunari. Seguono le scienze pratiche e quelle produttive.

1.5 Le scienze.

Le scienze sono classificate da Aristotele in teoretiche, che hanno come fine la conoscenza del necessario (le proprietà generali dell'essere), scienze pratiche (che mirano alla conoscenza del possibile come guida della condotta, p. es. etica, politica), e scienze produttive (che mirano alla conoscenza utile per produrre).

Le scienze teoretiche sono la metafisica, la fisica e la matematica. La metafisica tratta delle cose che hanno un'esistenza separata e sono invariabili (sostanze che esistono libere da qualsiasi connessione con la materia fisica), la fisica tratta delle sostanze separate ma mutabili (cioe' i corpi naturali, dotati di movimento e capaci di quiete), la matematica tratta di sostanze invariabili che non hanno un'esistenza separata (numeri e figure geometriche sono accidenti di sostanze).

1.6 La sostanza.

Aristotele rifiuta le dottrine sulla immutabilità dell'essere (illusorietà del cambiamento). L'essere esiste per sé e non in relazione ad altro e può mutare. Non vi è contraddizione tra essere e mutamento se si dà all'"essere" un significato più ampio che contiene il mutamento.

Aristotele rifiuta anche le spiegazioni basate sulla pura quantità (estensione, geometria etc); la struttura del mondo si basa su qualità diverse dell'essere.

La teoria della sostanza è mutuata dalla struttura della frase greca: la sostanza è il soggetto dell'esistenza, il costituente fondamentale di ogni cosa concreta, è il modo essenziale di ció che esiste. Le altre particolarità dell'essere sono attributi di quantità, accidenti, modi specifici dell'essere (non nel senso che non esistono ma nel senso che non sono necessari. Essi stanno alla sostanza come gli aggettivi stanno al nome cui si riferiscono.

1.7 Cause: materiale, formale, efficiente e finale.

In ogni sostanza si possono riconoscere la causa materiale e la causa formale, elementi inscindibili, distinti solo nell'analisi, non esistenti separatamente. Essa possono variare, cosí il pezzo di marmo è materia e forma (perche' è sostanza esistente). La sua forma comprende forme accidentali (la temperatura la posizione) e forme essenziali (gli elementi di cui è formato). A sua volta il blocco di marmo è materia nei confronti della statua che se ne ricava. Insieme a queste due esistono altre due cause: la causa efficiente (chi intende produrre la forma finale) e la causa finale (il risultato). In totale abbiamo quindi 4 cause.

1.8 Potenza e atto.

Nella sostanza è in azione una coppia di contrari: la potenza e l'atto. Ogni essere, ogni particolare sostanza, è sia potenza che atto: ogni corpo naturale contiene i due membri della coppia. È proprio l'introduzione di questi due concetti che permette di superare il dilemma antico tra essere e divenire. Una ghianda produce una quercia: era nell'essenza della sostanza ghianda di contenere una quercia come potenza. A sua volta il seme è atto rispetto al frutto da cui proviene. L'introduzione di questa coppia di principii permette di superare le difficoltà connesse al mutamento dell'essere. Il mutamento è passaggio dalla potenza all'atto. Naturalmente nessuna sostanza terrena è puro atto o pura potenza. Essa è atto rispetto alla sua evoluzione passata e potenza rispetto alla sua evoluzione futura.

Va ricordata la visione del mondo in base all'esperienza di un uomo del periodo. Le trasformazioni essenziali osservate in natura sono quelle dei grandi eventi naturali di corpi naturali: la crescita, la trasformazione e la corruzione dei vegetali e degli animali, il variare dei fenomeni atmosferici, il moto di caduta dei gravi, il fluire dell'acqua verso il basso, il galleggiare nell'acqua dei corpi piú leggeri. I moti fisici sono dominati dall'attrito. I carri sono lenti perché trainati da forza animale e perché l'attrito domina ogni fenomeno. Appena si cessa di spingere gli oggetti si fermano. Continuano soltanto i moti "naturali", la generazione, la trasformazione, la corruzione (dell'essere), il moto di caduta o di ascensione. Questo è il quadro del mondo fisico aristotelico (e degli antichi). In queste condizioni la nostra fisica non può nascere. [3]

[3] C'è un lungo dibattito sulle ragioni per cui la scienza non si è sviluppata in periodi storici e aree geografiche diverse dal periodo moderno e dalla cultura europea. Forse la forza motrice fornita a basso prezzo dagli schiavi nelle società antiche ha impedito la formazione di un ceto di artigiani e costruttori indipendenti e precisi come base dello sviluppo tecnologico; forse manca lo spirito di precisione e intraprendenza (anche nella ricerca) che si sviluppa soprattutto in ambiente puritano; forse è perche' in Cina manca lo sviluppo dei borghesi imprenditori e commercianti che commissionino lo sviluppo scientifico; etc etc etc. È difficile dre. Non sappiamo capire e spiegare un fenomeno che capita, figuriamoci spiegare qualcosa che non capita! Sapreste spiegare perché in Italia non si fanno le corride?

1.9 La fisica.

Passiamo rapidamente alla Fisica. La fisica di Aristotele è la teoria dei mutamenti e delle loro cause, una cosa molto diversa dalla fisica di oggi. Essa viene esposta in una serie di libri che coprono i diversi aspetti dei mutamenti: si tratta dei trattati di Fisica (cause e movimenti in generale), Cielo (movimenti celesti, natura degli elementi corporei e loro trasformazioni), Generazione e Corruzione (nascita e fine in generale), Meteorologia (mutamenti al di sopra della sfera terrestre ma sublunari) e dell'insieme delle opere biologiche.

Ogni mutamento è un passaggio da una potenza ad un atto. Come abbiamo spiegato, il risultato finale di un passaggio è ancora una sostanza dotata sia di potenza che di atto, poiché ció è nell'essenza della sostanza. La potenza che si è trasformata in atto non c'è piu ma c'è altra potenza che si trasformerà. Cosí la pianta realizzata continua a mutare, alla fine muore e la sua sostanza continua a trasformarsi. In definitiva la fisica aristotelica costituisce la teoria generale della sostanza sub-lunare, cioé della natura, la cui caratteristica è proprio il mutamento.

I moti considerati nella nostra fisica sono anch'essi mutamenti, ma costituiscono un capitolo molto piccolo della teoria generale dei mutamenti in natura. La meccanica dei proietti lanciati (i gravi) studia il cambiamento di luogo, un particolarissimo tipo di mutamento tra tutti i mutamenti sublunari e tutto sommato non molto importante tra tutte le categorie di mutamenti.

Infatti esiste una conseguenza importante di questo modo qualitativo di concepire il movimento fisico come un caso particolare di mutamento. La crescita di una pianta da un seme e il moto di un sasso sono ambedue transizioni da potenze ad atti; ma il secondo è un movimento di tipo piú elementare. Ne segue che l'attenzione di Aristotele si appunta sui movimenti come la crescita, la generazione e la corruzione, piú complessi e dunque piui' importanti che il moto fisico di traslazione di un oggetto. Si instaura cosí una certa gerarchia dei moti in cui il moto di traslazione dei corpi materiali è inevitabilmente piú rudimentale e dunque meno interessante delle trasformazioni piú complesse cui vanno soggetti gli organismi viventi e i sistemi complessi. Tra l'altro ricordiamo che Aristotele in fatto di scienza sublunare ha interessi da biologo ben piú che da fisico e scarso interesse per le matematiche. Non bisogna infine dimenticare che la nostra fisica, la caduta dei gravi soprattutto, è sacrificata ad un ruolo di scarso interesse da questa visione del mondo e dalla metodologia qualitativa che Aristotele usa sistematicamente.

1.10 La quiete; le cause del mutamento.

La natura sub-lunare è il regno del cambiamento. La fisica è la scienza generale dei cambiamenti nella natura; lo studio delle sue cause deve dunque avere carattere generale.

Sembra che si possa distinguere tra i corpi che si muovono da soli (gli animali) e gli altri (gli oggetti inanimati). Ma a ben vedere anche i movimenti degli animali sono dovuti al loro nutrimento e ai conseguenti desideri e sensazioni generati nel loro animo dai cibi e dagli altri elementi di vita che gli animali incontrano nella natura (l'aria o l'acqua per esempio). Gli oggetti inanimati sono mossi dalla rimozione dell'ostacolo al loro moto naturale e il moto termina allo stato di quiete quando essi raggiunngono il loro luogo naturale. Cosí Aristotele enuncia un principio generale della fisica: tutto ció che si muove in natura (cioe' nel mondo sublunare) viene mosso da qualcos'altro.

Ogni processo naturale ha un termine al quale si arresta, un punto di arrivo, una meta di luogo nel caso di movimento locale, un fine nel caso di mutamento piú complesso, a cui il mutamento termina e si ha la quiete. Da questa quiete potrà partire un nuovo mutamento, ma si tratta di altra cosa. Ogni processo ha un termine, un punto di arrivo. La quiete è dunque lo stato di un corpo non soggetto a cause di mutamento. Quali sono le cause?

(A noi questo interessa molto: se per "forze" intendiamo le cause avremo una risposta parziale al compito che ci siamo assegnati).

Aristotele classifica le cause generali del mutamento. Certamente una causa è ció da cui una cosa si genera, il punto di partenza del mutamento stesso (causa materiale). Se non esistesse il soggetto non vi sarebbe mutamento. Ma una causa è anche la forma, il punto di arrivo, il modello a cui tende il mutamento (causa formale). Vi è poi l'agente immediato che produce il cambiamento (causa efficiente). Infine, una causa è il fine o scopo del cambiamento (causa finale).

Esempi. Se un albero cresce, la sua materia è la causa materiale, la forma finale del suo sviluppo è la causa formale, il nutrimento tratto dal terreno è la causa efficiente e l'albero sviluppato la causa finale. Se un artigiano fabbrica una sfera di bronzo, il bronzo iniziale è la causa materiale, la sfericità è la causa formale, l'artigiano la causa efficiente e la sfera di bronzo la causa finale.

In generale un evento ha mescolanze diverse di queste 4 cause, la cui presenza è necessaria per realizzare l'evento.

Aristotele continua a classificare relazioni tra cause, a classificare cause prossime e cause remote, cause accidentali e cause generali. Da questi pochi cenni vedete chiaramente che le cause aristoteliche non hanno a che fare con il nostro concetto di forza. Si situano in un ambito culturale diverso.

1.11 Il movimento; il luogo; il tempo.

Il movimento è un tipo speciale di mutamento. Non ogni mutamento è un movimento: la generazione (mutamento da un termine negativo al suo contraddittorio) e la corruzione (viceversa) sono mutamenti ma non movimenti.

Il movimento aristotelico consiste in una trasformazione continua, da un termine positivo a un termine positivo, che attua parzialmente una potenzialità. Durante il movimento si ha un passaggio continuo attraverso potenzialità che divengono atti; quindi altre potenzialità cominciano ad agire. Caratteristica del movimento è la sua incompletezza: finché il movimento dura le trasformazioni in atti delle potenzialità (relative al movimento) della sostanza in moto non sono completate; quando le potenzialità sono attuate il movimento termina. Ne segue che il movimento deve avere cause; se queste sono assenti si ha quiete.

Gli elementi impliciti nel movimento sono ció che produce il movimento, ció che è mosso, la durata del moto e ció verso cui è mosso. Esistono tre generi di moto: rispetto alla qualità, alla quantità e al luogo. Quest'ultimo, il moto locale, è particolarmente importante. Solo il moto locale è continuo. Solo il moto locale circolare può essere continuo ed infinito.

La concezione di "luogo" è relazionale. Il luogo è definito dai corpi, non è un ente indipendente da essi. Non esiste lo spazio indipentemente dai corpi reali e quindi non esiste il vuoto ma solo i luoghi occupati dai corpi. Il luogo di un corpo A "è il limite del corpo contenente il corpo A".

L'argomentazione prosegue rilevando la non concepibilità del "vuoto" come porzione di "spazio" non occupata da corpi (Aristotele non definisce lo spazio). Il razionalismo immanente subordina l"esistenza del luogo a quella di un corpo che lo definisce e conduce a negare l'esistenza di spazio non occupato da corpi (il vuoto).

Aristotele analizza anche il tempo. Esso è "il numero del movimento secondo il prima e il poi". Una definizione interessante: gli eventi sono ordinati in una successione, il tempo costituisce questo ordinamento e può essere espresso mediante un numero. Il tempo non riguarda solo il movimento ma ogni mutamento: generazione o corruzione, crescita, cambiamento qualitativo o moto locale.

1.12 "Sul Cielo": studio del moto locale.

Il trattato Sul Cielo" è dedicato alla struttura del cosmo: al sistema astronomico e al movimento locale.

L'universo è un luogo strutturato, non uno spazio indifferenziato. Basandosi sulla teoria di Eudosso e di Callippo Aristotele descrisse un sistema di sfere concentriche (47 o 55, a seconda che si tratti di Eudosso o di Callippo) per i corpi celesti. I moti circolari sono gli unici ad avere la proprietà di essere continui ed infiniti. Inoltre la materia dei cieli non è, per Aristotele, la stessa del mondo sub- lunare: invece dei 4 elementi che costituiscono il mondo sub- lunare i cieli (dalla luna in su) sono costituiti da una quinta essenza incorruttibile. Essi sono privi di corruzione e generazione e dotati di puri movimenti circolari.

Al di sotto della sfera della Luna abbiamo le 4 sfere degli elementi mutabili: fuoco, aria, acqua e terra, nell'ordine in cui i loro luoghi assoluti stanno ordinati dall'esterno verso il centro dell'universo a seconda della loro pesantezza. I moti locali sono continui ma non infiniti.

La spiegazione dei moti "naturali" dei corpi sublunari sta appunto nell'esistenza dei luoghi "naturali". Un sasso tende verso il centro dell'universo perche' è il suo luogo naturale; il fuoco tende ad innalzarsi nell'aria perche' il suo luogo naturale è la sfera superiore a quella dell'aria, e cosi' via.

L'argomento in favore dell'ordinamento naturale come proprietà assoluta dei corpi si basa sul fatto che quantità diverse delle sostanze primitive si comportano nello stesso modo; un sasso piccolo non galleggia sullàcqua anche se il suo peso è minore di quello dell'acqua circostante, e cosí via. Ci sono dunque generi differenti di materia ciascuna delle quali ha un luogo assoluto nel cosmo in cui si trova in quiete.

Si vede che Aristotele abbandona uno dei due punti cardinali della spiegazione dei moti naturali data da Platone: (1) la terra è attratta verso la terra, il fuoco verso il fuoco, etc, per il principio che il simile tende verso il simile; (2) ogni elemento ha un suo luogo naturale nello spazio. Nella visione di Aristotele il postulato (1) è un principio non immanente e quindi non accettabile.

Da questa impostazione generale (moti circolari, materia diversa, primo motore) deriva una netta separazione tra fenomeni sublunari e fenomeni celesti (che nella formulazione platonica era evitata perche' l'attrazione tra simili era generale). Le conseguenze dureranno a lungo, fino almeno a Keplero e verranno rimosse del tutto solo con la gravità newtoniana.

1.13 Dinamica; il vuoto.

I moti locali sono classificati in moti naturali (moti per raggiungere il luogo naturale: un sasso che cade) e moti violenti (un sasso lanciato verso l'alto).

Si pone il problema del motore. Vediamo il caso del moto "naturale" di caduta di un grave. La causa materiale e formale della caduta sta nella natura del grave, nella causa, qualsiasi essa sia stata, che dette al grave la sua forma sostanziale e tutti gli attributi relativi. La causa efficiente è la rimozione dell'impedimento alla caduta, per esempio del sostegno, e il luogo naturale è la causa finale. I commentatori posteriori definirono la causa formale come il motore lontano, la causa materiale come il motore prossimo e la rimozione dell'ostacolo come il motore accidentale. Questo pare chiaro.

Meno chiara è la spiegazione dei moti violenti e l'identificazione delle loro cause. Nella visione generale i moti violenti sono limitati spazialmente e temporalmente. Al moto violento subentra il moto naturale: un sasso lanciato verso l'alto ritorna con moto naturale alla terra, la freccia esaurisce il moto violento e cade. I moti violenti sono accidentali, non sono dovuti alla natura e Aristotele vi dedica poco spazio.

Sarebbe sbagliato pensare a leggi quantitative della dinamica aristotelica (come avvenne per Newton). Ma alcune sue affemazioni vennero riprese nel tardo Medio Evo e vale la pena di riportarle. Nella Fisica [libro VII, cap. 5, ed. Laterza, Bari 1968, p. 206] si legge:

> Sia A il motore, B il mosso, C la lunghezza percorsa, D il tempo in cui si attua il movimento. In un tempo uguale la forza uguale A muoverà la metà di B per il doppio di C, e muoverà C nella metà di D: tale infatti sarà la proporzione. E, inoltre, se la stessa forza muoverà lo stesso oggetto in questo tempo qui secondo tanta lunghezza, e lo muoverà secondo la metà della lunghezza nella metà del tempo, anche la metà della forza muoverà parimenti la metà dell'oggetto in uguale tempo secondo una lunghezza uguale.

Con "motore" costante gli spazi sono proporzionali ai tempi (velocità costante). Se l'oggetto è la metà la velocità sarà doppia; quando la trazione o la spinta (il "motore") cessano, la velocità si annulla. Uno sforzo dimezzato genera uno spostamento dimezzato nello stesso tempo (velocità dimezzata).

Introduciamo impropriamente la massa m per "B", la forza F per il "motore", s per lo spazio percorso, t per il tempo e v per la velocità. In termini moderni, ma sforzando il pensiero di Aristotele potremmo riassumere la frase precedente con le formule seguente:

$$v = s/t; \quad F = kv/m.$$

In un passo precedente Aristotele si occupa del moto naturale verso il basso e discute la resistenza del mezzo [Fisica, libro IV, cap. 8, ed. Laterza, Bari 1968, p. 100]:

> ... lo stesso peso e lo stesso corpo si muovono piú rapidamente per due cause: o perche' è differente ció attraverso cui l'oggetto passa (... acqua o terra o aria...) oppure perche' l'oggetto spostato, qualora gli altri fattori siano gli stessi, differisce per l'eccesso del peso o della leggerezza.
>
> Ne è la causa il mezzo in quanto fa da attrito [...]. E l'attrito è maggiore quando il mezzo sia meno divisibile, ossia quando esso ha una densità maggiore.
>
> Sia dunque il corpo A spostato attraverso la grandezza B [il percorso nel mezzo B] in un tempo Γ e attraverso la grandezza Δ [il percorso nel mezzo Δ] piú sottile in un tempo E: se la lunghezza di B e quella di Δ sono uguali il tempo sarà proporzionato alla resistenza del corpo che fa da attrito. [...]
>
> Vi sarà dunque, tra velocità e velocità la medesima proporzione che intercorre tra l'aria e l'acqua: sicche' se la sottigliezza è doppia il corpo percorrerà la grandezza B in un tempo

doppio che la grandezza Δ e, quindi, il tempo Γ sarà il doppio del tempo E. E sempre, quanto piú incorporeo e meno resistente e piú divisibile sarà il mezzo attraverso cui l'oggetto è spostato, tanto piú velocemente esso sarà spostato.

In termini moderni si potrebbe interpretare il passo cosi': siano v_1, v_2 le velocità di un grave in caduta in due mezzi di densità d_1 e d_2. Si ha

$$v_1/v_2 = d_2/d_1.$$

E il vuoto? un'applicazione della regola darebbe velocità infinita. Aristotele se ne rende conto:

> Ma se lo spostamento attraverso il mezzo piú sottile si compie lungo un dato tempo e attraverso un dato percorso, lo spostamento attraverso il vuoto supererebbe qualsiasi proporzione.

Ma questo è un paradosso perché l'infinito in atto non esiste nel mondo fisico. L'argomentazione rafforza la conclusione dell'impossibilità del vuoto.

1.14 I moti violenti.

Ma quali sono le cause dei moti violenti? La situazione è poco chiara per quanto riguarda il motore dopo la separazione dal proiciente (arco o mano o calcio o catapulta etc.). Se nel caso dei moti naturali il motore è la natura del corpo fisico, nel caso dei moti violenti il motore deve essere esterno e agire per spinta o per trazione. Non può infatti agire a distanza. Che cosa spinge un sasso o una freccia nel volo?

Consideriamo il moto di una freccia. La causa materiale è chiara, cosí anche quella formale, si tratta della costituzione della freccia e dell'arco. La causa finale è il bersaglio. Ma la causa efficiente, che piú si avvicina al nostro concetto di causa e di forza, quale è e dove risiede? Tutto ció che si muove viene mosso da altro, dice un principio generale. Prima di scoccarla, la causa efficiente risiede certo nella tensione dell'arco. Ma dopo? Nella fisica aristotelica non c'è posto per azioni a distanza. Un corpo agisce su di un altro per spinta o trazione, e questo avviene solo se i due corpi sono contigui. Ma allora la causa efficiente che fa muovere la freccia dopo il distacco deve risiedere nell'aria.

Che cosa spinge un sasso dopo che la mano l'ha lanciato, o una freccia scoccata dall'arco? Aristotele dice [Fisica libro IV, cap. 8, p.99]:

> Inoltre i proiettili si muovono ancora benche' non li tocchi piú colui che li ha lanciati, e si muovono o per reazione, come dicono alcuni [Platone] oppure perche' l'aria, spinta, spinge a sua volta con un moto piú veloce di quello spostamento del corpo spinto in virtú del quale il corpo stesso viene spostato verso il suo proprio luogo.

Si tratta del "moto peristaltico". Il problema del moto violento in assenza di motore evidente sarà lungamente dibattuto nel tardo Medio Evo, quando l'impostazione generale aristotelica costituirà il quadro di riferimento delle facoltà universitarie ecclesiastiche. Ma bisognerà attendere un nuovo ambiente sociale (costruttori, artigiani e scienziati) e una nuova scienza che abbandonerà l'aristotelismo perché si possa fondare un nuovo quadro culturale per il concetto di forza.

Questi pochi cenni aiutano a comprendere il mondo della dinamica di Aristotele. Il mondo osservativo è dominato dagli attriti: le velocità degli oggetti si estinguono piú o meno rapidamente quando cessa l'azione; il moto di un corpo in caduta avviene in un mezzo a velocità costante.

Una nota di riflessione. La scienza aristotelica e la sua fisica sono sorpassate e possono essere oggetto di ironia, specialmente in una classe di scuole secondarie. Ció è ragionevole e può essere condiviso a patto di ricordare di quante altre "teorie" dovremmo ridere e da quante dottrine "razionali" odierne dovremmo cautelarci se le dinamiche dei fenomeni non sono basate su ragionevoli conoscenze scientifiche. Provate a fare un elenco e provate a trovare gli atteggiamenti anti scientifici anche nella società contemporanea. Con cosa sostituire la conoscenza scientifica? perche'?

Chapter 2

Aristotele nel Medio Evo.

2.1 Aristotele dopo il Mille.

Il problema della continuazione del moto violento dette luogo a molte contestazioni. L'alessandrino Giovanni Filopono (c. 490 - 570) è un esempio di dissenso sui temi della fisica e dell'astrofisica. In particolare egli nega che un corpo cada piú o meno velocemente a seconda del suo peso e respinge la spiegazione che il mezzo ambiente fornisca la spinta quando cessa la spinta del motore principale nel moto violento, sostenendo che viene impartita al proiettile una certa forza motrice immateriale. Questa questione verrà ripresa dai commentatori medievali. Ma fino al 1000 poco restò di Aristotele: alcune opere di logica tradotte in latino da Boezio (di cui si avevano anche i commenti alla logica). Peró le sue opere erano ben note in Medio Oriente (Siria) e con la conquista araba vennero tradotte e diffuse nell'area della cultura araba.

Intorno al 1000 la situazione cominciò a cambiare. Un certo numero di trattati fu rifatto in traduzioni latine spesso compiute da studiosi vaganti che in monasteri spagnoli avevano acquistato conoscenza della lingua araba.

Nel dodicesimo e nel tredicesimo secolo l'onda di traduzioni si accrebbe. L'Occidente riscoprì queste opere con le traduzioni dall'arabo e dal greco (specialmente dopo la conquista di Costantinopoli da parte dei Crociati nel 1204). I centri furono la Spagna, in particolare la scuola di traduttori di Toledo, e la Sicilia. Dall'arabo si tradussero l'Aritmetica, le Tavole Astronomiche e l'Algebra di al-Khwarizmi [tra il 1126 e il 1145], l'Ottica di Ibn al-Haitham [XII secolo], l'astronomia di al-Bitruji [1217], la Fisica di Aristotele [XII secolo], gli Elementi di Euclide [1126 forse], le Coniche di Apollonio e il trattato sul Cerchio di Archimede [XII secolo], l'Almagesto [1150 circa] e l'Ottica di Tolomeo [1175]. Dal greco la Metereologia [forse nel 1156], la Fisica [nel XII secolo e nel 1260] e la Metafisica [XII secolo e 1270 circa] di Aristotele, l'Ottica di Euclide, molti lavori di Archimede [1269], la Pneumatica [XII secolo] e la Catottrica [dopo il 1260] di Erone, l'Almagesto di Tolomeo [intorno al 1150]. Dall'arabo ancora vennero tradotti il Commento ad Aristotele di Averroé e l'opera di Avicenna che conteneva la parte geologica e chimica delle opere di Aristotele. In quel periodo furono anche tradotte le altre opere classiche destinate a costituire la base dell'insegnamento, tra cui Apollonio da Perga, Galeno e Ippocrate.

Questa cultura si innestò su un mondo occidentale in sviluppo sia nei commerci che nelle istituzioni culturali. È degli anni intorno al 1200 la fondazione delle Università, delle quali bisogna ricordare che, profondamente diverse da quelle moderne, erano rette da religiosi e comprendevano le facoltà di Teologia, di Giurisprudenza e di Lettere e Arti.

Questo corpo di conoscenze classiche, ed in particolare il pensiero di Aristotele, si presentava come un quadro coerente, razionale di ogni aspetto generale dell'universo basato sulla conoscenza delle cause naturali, molto piú completo ed attraente rispetto alla cultura paleo medioevale preesistente. In particolare le opere di Aristotele non costituivano solo una teoria scientifica ma una concezione del mondo che comprendeva tutto l'"essere" nellle sue diverse forme.

Il pensiero aristotelico era in generale poco compatibile con le dottrine cristiane. Era una filosofia priva di rivelazione da cui era assente ogni trascendenza ed ogni contenuto religioso. Alcune teorie in particolare, come l'eternità del mondo, contrastavano direttamente con la dottrina cristiana. Il Commento di Averroé (1126 - 1198) avvicinava s'ìAristotele alla trascendenza ma, nella visione maomettana, ne interpretava il razionalismo per negare il libero arbitrio (umano e divino) e negare l'esistenza delle anime individuali. Si ripeteva il problema della Patristica dell'incontro tra il razionalismo greco e la rivelazione cristiana. Agostino (354 - 430) sosteneva che la pura ragione non permette la comprensione dell'esistente e che sia l'esperienza che la rivelazione sono necessari; chiarì che non può esservi alcuna contraddizione di fondo tra le due fonti e che discrepanze apparenti sono dovute alla necessità delle Scritture di essere capite: in esse i riferimenti ai particolari del mondo fisico sono accidentali. Ma naturalmente, continuava Agostino, se i filosofi insegnassero qualcosa di contrario alle Scritture, cioé alla interpretazione che di esse dà la Chiesa di Roma, essi sarebbero per ció stesso nel falso e la dottrina sarebbe in grado di dimostrarlo sulla base appunto della Rivelazione.

Sorgeva il problema del rapporto tra le due fonti, problema che la Chiesa ha trascinato per secoli con vicende alterne e drammatiche. Aristotele appariva razionalmente attraente ma incompatibile col pensiero cristiano e pericoloso per la vera religione. Le sue tesi furono condannate in piú luoghi e in diversi tempi. Nel 1210 a Parigi il Consiglio Ecclesiastico Provinciale proibi' l'insegnamento dei principii della filosofia della natura e nel 1215 anche la lettura pubblica delle opere metafisiche e naturali. (Va detto che il bando riguardava Parigi e non altre giurisdizioni eccelsiastiche e non condannava lo studio individuale delle opere di Aristotele.)

Ma il suo pensiero non poteva essere facilmente trascurato. L'attrazione verso il suo pensiero era fortissima per via della sistemazione organica di tutto lo scibile, dalla teoria generale dell'essere alle regole della conoscenza. Lo stesso papa Gregorio IX incaricò una commissione di rivederne le opere di filosofia naturale. Nel 1255 alcune sue opere costituivano materia di esame alla stessa facoltà delle Arti di Parigi mentre ad Oxford lo studio delle opere di Aristotele non incontrava opposizione ma anzi fu incoraggiato dal francescano Roberto Grossatesta (1168 - 1253), prima lettore in quella università e poi vescovo.

2.2 Il rientro dell'aristotelismo.

Il raccordo del pensiero aristotelico con la dottrina della Chiesa fu dovuto essenzialmente ad Alberto Magno e soprattutto a Tommaso d'Acquino. Questo ultimo compí la grande operazione di incorporare le dottrine aristoteliche nel quadro generale della teologia cristiana. Da allora in poi la filosofia aristotelica si diffuse nelle università, specialmente in ambienti domenicani dalla teologia di impronta razionale (la tradizione francescana si collegava piuttosto a certi aspetti mistici dell'agostinismo).

La brillante sintesi di Tommaso permise di recuperare la visione del mondo e la capacità classificatoria e logica del grande pensatore e stabilì in generale un'unità tra la fede e la scienza. Ma aveva due facce. Essa garantiva uno statuto al razionalismo ed alla scienza e addirittura sosteneva che non poteva esistere incompatibilità tra scienza e fede. Ma questa affermazione implicava che dovessero andare d'accordo, e natrualmente in caso di discrepanza doveva prevalere l'interpretazione della Chiesa.

Inoltre con questa operazione culturale la Chiesa si sobbarcava, non necessariamente ma in pratica pesantemente, di tutta la cosmologia e la fisica aristoteliche: cosmologia geocentrica, dottrina dei 4 elementi, teoria dei moti locali e dei luoghi naturali, negazione del vuoto, dinamica e cosí via. Ogni attacco alla fisica aristotelica fu quasi necessariamente interpretato come una minaccia per il magistero stesso della Chiesa.

È interessante notare che ancora nel 1277, dopo la morte di Tomaso, il vescovo di Parigi Etienne Tempier condannò 219 tesi filosofiche e scientifiche, tra cui l'interpretazione averroista del pensiero aristotelico, determinista, che negava la resposabilità indivuale e l'identità individuale stessa.

Il decreto del 1277 esercitò forte influenza alla Università di Parigi. Tra l'altro secondo alcuni storici attuali questa condanna mantenne la possibilità di contestare Aristotele senza che la dottrina cristiana fosse messa in dubbio. Ne approfittarono nel Medio Evo soprattutto alcuni filosofi di parte francescana come Ockham, Ruggero Bacone e lo stesso Grossatesta che si ispirarono ai fenomeni luminosi e all'Agostinismo per sviluppare un approccio ai fenomeni fisici distaccato dal razionalismo aristotelico. Ma la Chiesa come tale non aveva espresso alcuna opinione. Il decreto stesso venne poi revocato, nel 1325.

Gli inglesi Grossatesta [circa 1175 - 1253] e Ruggero Bacone [circa 1214 - 1292], lo slesiano Vitellio [nato intorno al 1230] e Teodorico di Freiberg discussero parecchio di ottica. Ma questa è un'altra storia. Noi dobbiamo tornare al concetto di forza.

2.3 Il dibattito sul moto nel XIV secolo.

Nell'ambito della fisica aristotelica il moto locale era un punto debole e la sua causa fu discussa dagli scolastici medievali.

Gli aristotelisti puri da buoni razionalisti dovevano identificare la forza in una azione di contatto e nella natura sostanziale dei corpi, non in improponibili azioni a distanza; queste erano invece contenute in, o suggerite da, uno schema filosofico alternativo che si riconosceva in Platone. La discussione oscillava in generale tra varii punti di riferimento. Continuò ad essere viva la concezione platonica del moto naturale come tendenza dei corpi a "riunirsi al simile". Si trattava di una sorta di "azione a distanza" (respinta da Aristotele) che sopravviveva e fu all'origine di ispirazioni anche per Copernico e per Keplero, come vedremo. Un'altra forma di azione a distanza fu sostenuta da San Bonaventura: la repulsione della materia da parte delle sfere celesti.

In generale bisogna osservare che il platonismo fu un modello di pensiero anti aristotelico che valutava il mondo delle idee, la matematica, la geometria, e poneva i concetti in posizione privilegiata ed indipendente dal mondo della materia; quindi concetti come lo spazio e il tempo possedevano un'ontologia indipendente e precedente, gerarchicamente, alla materia stessa. Cosí il platonismo serpeggiava in tutta la storia della cultura porgendo argomenti agli oppositori del pensiero aristotelico, dai neoplatonisti del periodo alessandrino a molti francescani (mentre gli ambienti domenicani erano favorevoli ad Aristotele).

Nello sviluppo della meccanica moderna questo filone di pensiero anti aristotelico ebbe un ruolo importante nella formazione culturale sia di Galileo che di Newton. Ma già prima, con lo svolgersi del XIV secolo, le scuole di scienza, sviluppate in modo originale, cominciarono a muoversi in modo indipendente.

La scuola di Merton (Bradwardine c. 1290 - 1349, Heytesbury c. 1350, Swineshead c. 1340 - 1350 e Dumbleton c. 1330 - 1350 furono i membri piú prominenti) discusse il problema del moto nello spazio e nel tempo separando l'aspetto cinematico (trattato a lungo) da quello dinamico. Pure in assenza di metodi differenziali che dessero una definizione logica di velocità istantanea (e di sistemi astronomici, considerati forse essenzialmente diversi) questi personaggi svilupparono molte idee; tra queste anche la cosiddetta relazione del Merton College: se s è la distanza percorsa in un tempo t in cui la velocità aumenta da v_0 a v_1, si ha

$$s = \left(v_o + \frac{v_1 - v_0}{2} \right) t \, .$$

Di questo teorema esistono molte prove nei varii lavori della Scuola.

Jean Buridan (c.1300 - c. 1360), rettore della Sorbona, rifiutava la spiegazione della spinta dell'aria nei moti violenti adducendo varie osservazioni fisiche; respingeva anche la spiegazione della caduta libera verso il luogo naturale perche' il motore deve accompagnare il moto. Sviluppò invece una teoria (dell'impeto): il motore originale (la mano, l'arco, la forma sostanziale) imprime al corpo un certo "impeto" che lo fa muovere finche' non si esaurisce per l'azione di altre forze. Nei proietti l'aria smorza l'impeto; nei corpi in caduta libera la loro gravità naturale accresce l'impeto; la sua misura è data dalla quantità di materia moltiplicata per la velocità. Sarebbe inutile però cercare in Buridan (e in tutti gli altri) un precursore della inerzia galileiana e newtoniana. In lui agiva il principio aristotelico della proporzionalità tra la causa (l'impeto) e l'effetto (la velocità).

Nicola Oresme (c. 1320 - 1382) intorno al 1350 insegnava alla Università di Parigi. Fu un suo grande merito lo sviluppo di un metodo grafico per rappresentare la variazione delle qualità. Supponiamo che la velocità di un corpo in un dato intervallo di tempo sia visualizzata mediante una distanza chiamata longitudine. Un istante di tempo t è rappresentato da un punto P su questa distanza. Da P si estende una linea perpendicolare alla longitudine, con una lunghezza uguale alla velocità del corpo al tempo t (di nuovo in unità arbitrarie). Questa linea è la latitudine. L'insieme delle latitudini copre un'area definita del piano e definisce una figura che Oresme chiama "configurazione" del moto.

Un moto uniforme corrisponde ad una configurazione rettangolare, un moto con accelerazione costante corrisponde ad un trapezio (un triangolo se la velocità iniziale è nulla). In questo modo ogni distribuzione di velocità rivela immediatamente un certo numero di fatti sul movimento in questione.

Mediante questo metodo si riuscì ad ottenere una determinazione geometrica della distanza percorsa dal corpo in movimento. Oresme suppose (senza prova) che la distanza fosse proporzionale all'area anche per un moto vario.

Oresme usò questo metodo anche per notare errori e sbagli in molti argomenti semi matematici di Aristotele. Provò tra l'altro che, diversamente da Aristotele, il moto per un tempo infinito può attraversare una distanza finita; per questo usò il caso speciale di un corpo che ha velocità v il primo giorno, $v/2$ il secondo, $v/4$ il terzo e cosi' via. La distanza complessiva è data da

$$s = v(1 + 1\ over 2 + \frac{1}{4} + ...)$$

e si prova geometricamente che la somma complessiva è finita ed eguale a $2v$. Il metodo aveva carattere generale e valeva anche per aspetti non meccanici tra cui la psicologia e la stessa teologia.

Per il filosofo Guglielmo di Ockham (c.1290 - c. 1349) invece la forza non era necessaria: egli riteneva che il moto presupponesse soltanto un corpo materiale che si trova in posti diversi in differenti istanti. Un corpo si muove e questo è tutto. Questa opinione estrema fu talvolta interpretata recentemente come la prima intuizione della legge di inerzia; ma il testo non sostiene questa conclusione. Quasi tutti i filosofi naturali trecenteschi sostennero invece la necessità della forza per causare il moto; il loro problema era il tipo di moto che deriva da una forza data.

Ma sarebbe troppo lungo seguire tutto il dibattito medievale e rinascimentale sulle cause, sul moto violento e su quello naturale. Tralasciando gli sviluppi intermedi passeremo a discutere di Copernico, Keplero e Galileo e a formulare la dinamica newtoniana.

Chapter 3

Copernico.

3.1 Gli inizi di Copernico.

Nicolò Copernico nacque il 19 febbraio 1473 a Torun (o Thorn) nella Prussia polacca. Il padre, anche lui Nicolò, ricco borghese, vi si era stabilito da Cracovia e aveva sposato Barbara Watzelrode che discendeva, pare, dalla Slesia. A 10 anni, perduti i genitori, Nicolò Copernico fu adottato col fratello Andrea dallo zio materno, Luca Watzelrode, canonico del capitolo di Frauenburg, che nel 1489 divenne vescovo di Warmia (Ermland). Lo zio, persona assai colta che aveva anche studiato in una universita' italiana, se ne prese grandi cure. Nel 1491 Copernico fu da lui iscritto all'università di Cracovia dove rimase tre o quattro anni. Sembra che vi abbia seguito il curriculum della Facoltà delle arti orientato alla dialettica e alla filosofia. Si interessò profondamente anche all'astronomia benché non fosse un astronomo "tecnico": era piuttosto un "umanista": artista, erudito, intellettuale e anche uomo di azione.

Partì per Bologna alla fine del 1496, iscrivendosi il 6 gennaio 1497 alla nazione germanica di cui facevano parte d'ufficio gli slesiani e i prussiani. A quel tempo non esistevano problemi, la nozione stessa di nazione era vaga; inoltre la nazione germanica lí era privilegiata. A Bologna Copernico conseguì il titolo di *magister artium* in un anno e proseguì certamente lo studio della astronomia, benché il celebre astronomo Domenico Maria da Novara (1454 - 1504) lo considerasse non *tam discipulus* ma piuttosto *quam adiutor et testis observationum.* Oltre al diritto seguì altri studii tra cui medicina e filosofia e imparò il greco. Subì fortissima l'influenza della mentalità del rinascimento e fu ispirato dal neoplatonismo e pitagorismo che aveva il centro a Firenze. Nel 1500, anno del Giubileo, si recò a Roma dove, ci dice Retico, tenne una serie di conferenze sulle matematiche (pare si sia trattato di astronomia).

Nel frattempo lo zio era riuscito a farlo eleggere canonico della cattedrale di Frauenburg (probabilmente nel 1497). Nel 1501 Copernico tornò, per poco, in Polonia. Ricevuto il 27 luglio 1501 il permesso di studiare medicina, si recò di nuovo in Italia, a Padova. A Ferrara (il 31 maggio 1503) conseguì il dottorato in Diritto Canonico mentre a Padova continuò a studiare medicina senza peraltro addottorarsi. Nella seconda metà del 1503, pressato, dovette raggiungere la sua diocesi per non piú abbandonarla (secondo altri ritornò in patria solo nel 1506).

A Frauenburg divenne amministratore dei beni del capitolo; fu poi nominato delegato permanente ad Allenstein, o Olstyn. Visse a Heilberg con lo zio fino alla sua morte, nel 1512, poi si stabilì a Frauenburg.

3.2 Il Commentariolus.

Preso da molti continui problemi, Copernico non ebbe molto tempo libero per meditare e calcolare; dovette, tra l'altro, occuparsi delle difese delle città comprese nella diocesi, in particolare di Allenstein, attaccata dalle truppe di Alberto di Hohenzollern nel 1520. Scrisse anche lo schema sulla Moneta che presentò a Graudenz nel 1522. Fu cosí che il suo trattato *De Revolutionibus Orbium Coelestium* crebbe molto lentamente.

Sembra che lo schema fosse nato presto, prima che Copernico lasciasse l'Italia; ma grosso modo il De Revolutionibus fu terminato, nelle linee fondamentali, non prima del 1530 e non dopo il 1532 (l'apogeo di Venere di quell'anno e le vicende posteriori non vi apparvero), anche se vi furono certamente aggiornamenti posteriori.

Prima del De Revolutionibus Copernico aveva composto una breve esposizione, il *Commentariolus*[1] in cui si trovano molti motivi che saranno sviluppati nel De Revolutionibus. Di questo breve trattato furono spedite a pochi amici fidati solo alcune copie. Copernico non voleva infatti render pubblico né l'uno né l'altro.

Ma qualche notizia si sparse. Nel 1539 giunse a Frauenburg un giovane professore protestante di Wittenberg, Giorgio Joachim Retico, che aveva sentito parlare delle nuove teorie di Copernico.[2] Ne fu conquistato. Poche settimane dopo scrisse al matematico e astronomo Johann Schöner una lunga lettera in cui oltre a fornire molte notizie su Copernico gli annunciava che avrebbe pubblicato rapidamente una esposizione delle sue tesi. La Narratio Prima apparve subito, anonima,

[1] De hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus, composto alcuni anni dopo essere tornato dall'Italia.

[2] Giorgio Joachim Lauschen, detto Retico perché proveniva dalla Rezia romana, era nato il 16 febbraio 1516 a Feldkirch. Studiò a Zurigo; fu poi, protestante, a Wittenberg dal 1532. Tra il 1539 e il 1540 fu nella Prussia cattolica, dove fu trattato molto bene. Di nuovo a Wittenberg nel 1540, tenne corsi sull'astronomia di al-Farghani, di Tolomeo e di Sacrobosco. A Wittenberg nel '42 fu nominato decano della Facoltà delle arti ma nello stesso anno accettò una cattedra a Lipsia dove restò fino al 1551. Nel 1557 era a Cracovia. Morì nel 1574.

a Danzica ed ebbe un grande successo. Due anni dopo uscì a Basilea un'altra edizione.

3.3 Il De Revolutionibus.

La reazione era stata molto favorevole e Copernico, dietro consiglio degli amici, si risolse infine a pubblicare il trattato. Cosí Retico tornò ad Allenstein nell'estate del 1541 e vi preparò la versione finale. Ma poi, nel 1542, dovette partire per Lipsia e passò l'incarico finale ad Andreas Osiander, ben noto teologo luterano. Costui, cui era nota la rabbia dei teologi protestanti per queste cose, il 20 aprile 1541 aveva proposto a Copernico di premettere una prefazione in cui proclamava il carattere ipotetico della nuova teoria:

> Al lettore sulle ipotesi di quest'opera.
> Dubito che taluni – essendosi già diffusa la notizia delle novità delle ipotesi di quest'opera [...] – si indigneranno moltissimo e giudicheranno che non si debbano sconvolgere le discipline liberali ben costituite già da lungo tempo. Se peró vorranno esaminare per bene la questione, troveranno che l'autore di quest'opera non ha intrapreso alcuna cosa che meriti biasimo. È infatti compito dell'astronomo raccogliere, per mezzo di un'osservazione intelligente e abile, la storia dei moti celesti. Quindi, non essendo in grado di stabilire le cause vere, egli deve escogitare e inventare cause e ipotesi che gli permettano di calcolare esattamente quei moti [...] in base ai principii della geometria. L'autore di quest'opera ha assolto entrambi questi compiti in maniera eccellente. Poiché non è necessario che tali ipotesi siano vere, anzi neppure verosimili, ma basta che offrano dei calcoli conformi all'osservazione. [...]

La risposta di Copernico non ci è nota ma Keplero sosteneva che Copernico proclamò anche in quel caso la necessità di pubblicare apertamente le proprie opinioni.

Il trattato fu pubblicato a Norimberga per i tipi di Giovanni Petreio. Copernico ricevette il primo esemplare stampato il 24 maggio 1543, nel giorno in cui morì. Tre giorni dopo Tiedemann Giese, vescovo di Kulm, scrisse a Retico una lettera indirizzata ai magistrati di Norimberga in cui chiese di far ristampare le prime pagine del De Revolutionibus con una nota esplicativa. Retico da Lipsia vedeva le cose in modo diverso da Giese a Kulm: fece pervenire a Norimberga la protesta di Giese ma senza intervenire direttamente. Richiese peró ad Osiander, ed ottenne, il riconoscimento della paternità di quella prefazione. I magistrati a loro volta trasmisero la lettera di Giese al libraio Giovanni Petreio che rispose insolentemente. La questione si chiuse cosí.

Nella bellissima lettera di dedica che compose per il papa Paolo III Copernico confessava la paura di venire condannato da certe persone per aver proposto idee apparentemente assurde sulla costituzione dell'universo ed espose le sue esitazioni a pubblicare l'opera; ma concluse difendendo con vigore e fierezza la propria posizione: gli ignoranti devono infine tacere; mathematica mathematicis scribuntur. L'incapacità dei vecchi sistemi di rappresentare i movimenti apparenti restando fedeli al principio dei moti circolari uniformi dei corpi celesti lo indusse a credere che i "matematici" avessero assunto qualche postulato sbagliato. Scorsi tutti i libri possibili e confortato dal movimento della Terra, Copernico riuscì a spiegare i veri moti in maniera semplice [disse] ottenendo un universo perfettamente organizzato:

> Rapportando i moti dei pianeti al moto orbitale della Terra e prendendo questo per base della rivoluzione di ciascun astro ne derivano non solo i moti apparenti di questi ma anche l'ordine e la dimensione di tutti gli astri ed orbi, e nel cielo stesso si trova una connessione tale che non si può cambiar nulla in nessuna delle sue parti senza che ne derivi una confusione di tutte le altre e dell'intero universo.

Sembra che Copernico fosse stato colpito dal fatto che il periodo di rivoluzione del deferente dei pianeti interni era uguale ad un anno tropico e quello degli epicicli dei pianeti esterni era uguale al loro periodo sinodico. Per fare questo peró era necessario che il deferente venisse espresso in termini di anno solare del pianeta e non come rapporto tra deferente e pianeta; e analogamente per gli epicicli dei pianeti esterni; un compito che si addiceva certo a Copernico.

Copernico escluse che esistessero equanti matematici privi di contenuto fisico. L'immagine schematica dell'universo deve essere semplice e seducente.

Ma il numero di cerchi di ogni singolo pianeta era in realtà molto simile. La Terra per esempio ne ha 8 e anche gli altri pianeti ne possiedono molti. Il moto orbitale della Terra sostituisce il moto del pianeta sul suo epiciclo, ma il resto si equivale. Paradossalmente le teorie di Mercurio e di Venere sono altrettanto complesse che in Tolomeo, mentre quelle della Luna e dei pianeti superiori sono leggermente piú semplici: per la Luna bastano 2 epicicli concentrici, per i pianeti esterni ne basta uno.

Per ottenere un risultato nuovo bisogna dunque considerare non un pianeta per volta ma tutto l'insieme: poiché l'orbe in moto della Terra si sostituisce agli epicicli di tutti i pianeti, il guadagno esiste, anche se in fondo si riduce a 5 soli epicicli perché Copernico, che rifiutava di accettare gli equanti, dovette introdurre un epiciclo supplementare per ogni pianeta.

Ma la superiorità vera sta nell'uniformità e nella sistematicità che permettono di spiegare le irregolarità dei moti apparenti dei pianeti come un effetto di prospettiva. E inoltre si ha concordanza tra le distanze dei pianeti dal Sole e i loro tempi di rivoluzione; qui è evidente la superiorità dell'astronomia copernicana. Tolomeo presenta sì le determinazioni di distanza, ma esse sono del tutto casuali: si potrebbero scambiare le posizioni dei pianeti senza che niente variasse, mentre le distanze di Copernico sono perfettamente distribuite. In Copernico si comprendono molto bene le posizioni dei pianeti che sono collegati al Sole, non alla Terra. Sfortunatamente questo universo, che era grande ma ragionevole per la fisica antica, diventa immenso per Copernico. Sono punti di vista inconciliabili.

In realtà gli aristotelici e Copernico avevano interessi e aspettative essenzialmente diversi. Per i primi la gravità porta al centro dell'orbita terrestre; la Terra è grave ed inerte mentre i cieli sono immuni da ogni pesantezza. Secondo costoro per muovere la Terra sarebbe necessario un motore esterno di immensa potenza. La Terra è grave e tende al centro del mondo. Invece i cieli per loro natura si muovono senza motori materiali, essendo mossi da pure entità spirituali. Aggiungiamo che il mondo degli aristotelici è finito e non particolarmente grande. Invece per Copernico valeva l'opposto: la gravità non è la tendenza dei gravi al loro luogo naturale nell'universo ma la tendenza di ogni corpo celeste (e della Terra) a formare un tutto. Naturalmente ció si paga con una visione sì uniforme del mondo, ma immensamente piú ampia e quindi non accettabile dagli aristotelici. Tra l'altro, se la Terra si muove, e quindi anche il cielo piú esterno varia durante l'anno, come mai non si vedono le variazioni delle stelle?

La ragione fondamentale è che per Copernico la gravità non costituiva una tendenza al centro della Terra ma era la tendenza di ogni corpo celeste (e in particolare anche della Terra) ad unirsi. All'obiezione fisica che la rotazione della Terra dovrebbe generare una enorme forza centrifuga che la disintegrerebbe Copernico, che dei cieli aveva una visione ben diversa, replicava che si dovrebbe usare una obiezione molto maggiore se si muovessero i cieli.

Si trattava dunque di punti di vista essenzialmente non conciliabili: per la fisica antica il moto naturale di un corpo era determinato dalla natura specifica che è la forma sostanziale definita, mentre in Copernico questa funzione è svolta dalla forma geometrica. Per lui dunque i corpi celesti ruotano perché sono sferici. La forma sferica, geometricamente perfetta e per via di questa perfezione ricercata da tutti i corpi naturali, non solo è piú adatta al movimento ma è una causa sufficiente perché genera il piú perfetto e piú naturale dei movimenti, quello circolare. Questo è dunque il vero sistema del mondo.

Chapter 4

Keplero.

4.1 Il Mysterium Cosmographicum.

Giovanni Keplero (il suo nome era Johann Kepler) nacque il 27 dicembre 1571 (vecchio stile) a Weil, nel Württemberg, da un padre militare di ventura e da una madre figlia (scapestrata) del borgomastro. Benche' avesse un fisico gracile e problemi alle mani (e la sua vista fosse ridotta) riuscì a fare gli studi, dapprima a Leonberg dal 1577, poi ad Adelberg e negli ultimi due anni a Maulbron. Si iscrisse all'università di Tübingen nel 1588. Ivi segui' tra gli altri gli insegnamenti di filosofia di Vitus Müller dal quale pote' ricevere suggerimenti in senso platonico e pitagorico. Apprese anche il greco. Sotto l'influenza del suo maestro Michael Maestlin aveva concepito una passione molto vivace per l'astronomia ma intendeva diventare pastore. Nel 1594 però venne fatto il suo nome a succedere a Georg Stadius e Keplero accettò, ritenendo che si trattasse di una sistemazione provvisoria. Si trasferì cosí a Graz l'11 aprile di quell'anno.

Lí l'insegnamento della matematica,, quasi inesistente, gli permise di eseguire agevolmente le altre incombenze, calendarii e pronostici (il primo pronostico prevedeva un inverno freddissimo, rivolte contadine e la guerra contro i Turchi e si verificò puntualmente), lasciandogli tempo libero. Fu cosí che nel 1595 scrisse il *Mysterium Cosmographicum* (Prodromus dissertationum cosmographicarum continens Mysterium cosmographicum [...]), pubblicato l'anno dopo a Tübingen con l'aiuto di Maestlin che eseguì anche una serie di calcoli (pubblicati in appendice con ottimi diagrammi e disegni) e ottenne dal pro rettore Mattias Hafenreffer anche l'approvazione dell'università. (La seconda edizione, riveduta, apparve nel 1621.)

Maestlin voleva anche che al libro, che presupponeva che il lettore possedesse conoscenze matematiche ed astronomiche, venisse aggiunta una parte generale e che venisse soppressa la parte che riguardava la non contraddittorietà tra l'astronomia copernicana e la Sacra Scrittura. Keplero acconsentì a riscrivere i brani oscuri e a sopprimere alcuni altri brani ma non potè portare altre modifiche; cosí Maestlin stesso fece altre modifiche e aggiunse all'appendice una ristampa della Narratio Prima di Retico. Keplero gli offrì in regalo una coppa d'argento dorata e sei talleri.

Nel Mysterium cosmographicum, benché opera giovanile, Keplero appare a tutto tondo. Per lui il sistema di Copernico serve a spiegare ciò che per Tolomeo resta semplice osservazione: perché il moto della Terra cambia i rapporti tra il luogo della sua orbita e quello degli altri pianeti; perché i pianeti inferiori non si allontanano mai dal Sole mentre nei tre pianeti superiori l'apogeo è sempre in congiunzione col Sole e il perigeo sempre in opposizione; perché il deferente (nei pianeti inferiori) o l'epiciclo (nei pianeti superiori) compie la rivoluzione nello stesso tempo impiegato dal Sole; e cosí via. Infatti per Keplero il sistema di Copernico non è equivalente ma è l'unico vero.

Keplero giunse a fornire anche una prova molto precisa della sfericità dei pianeti. I pianeti sono sei e

> la Terra è la misura di tutti gli altri orbi: circoscrivi ad essa un dodecaedro; la sfera che lo circonda è quella di Marte. A Marte circoscrivi un tetraedro: la sfera che lo contiene è Giove. A Giove circoscrivi un cubo: la sfera che lo comprende è Saturno. Nell'orbe della Terra inscrivi un icosaedro: la sfera inscritta in esso è quella di Venere. A Venere inscrivi un ottaedro: in esso sarà inscritta la sfera di Mercurio. Qui trovi la ragione del numero dei pianeti.

L'accordo naturalmente è approssimativo: ponedo uguale a 1000 il raggio della sfera di un pianeta, per ogni successivo pianeta interno si avrà la tabella che segue:

Saturno 1000, Giove secondo calcolo 577, Giove secondo Copernico 635; Giove 1000, Marte secondo calcolo 333, Marte secondo Copernico 333; Marte 1000, Terra secondo calcolo 795, Terra secondo Copernico 757; Terra 1000, Venere secondo calcolo 795, Venere secondo Copernico 794; Venere 1000, Mercurio sec. calcolo 577, Mercurio sec. Copernico 723 (o 707 se si prende il raggio del cerchio inscritto nel quadrato di base comune alle due piramidi che lo compongono).

La corrispondenza non è perfetta ma è molto significativa. Per Giove e per Mercurio la divergenza era troppo grande ma ciò non deve stupire, considerando l'enorme distanza che ci separa dal primo e la difficoltà di fornire i moti del secondo in modo soddisfacente. Inoltre i dati di Copernico erano sbagliati perché, per non differire troppo da Tolomeo, egli aveva riferito i moti non al Sole vero ma al centro dell'orbe terrestre, che però non può avere una parte importante nella struttura dell'universo. E poi in questa nostra approssimazione non c'è spessore per le orbite planetarie. Infine, anche le loro traiettorie (orbi per Copernico) sono eccentriche rispetto al Sole.

Il Mysterium Cosmographicum contiene moltissime cose, per la maggior parte dettate dall'ardore iniziale che sanciva a priori i (cosiddetti) principii geometrici della scienza dell'universo. Ben diverso sarà il caso della *Astronomia Nova*. Ma procediamo nell'ordine.

Keplero sposò l'ereditiera Barbara von Mühleck il 27 aprile 1597 a Graz. Il successivo 13 dicembre inviò a Tycho (o Tikhon) Brahe una lettera. Brahe rispose l'11 aprile 1598 da Wandbeck (presso Amburgo; aveva dovuto abbandonare l'isola di Hven). In essa egli diceva tra l'altro:

> La tua intelligenza fine e il tuo spirito acuto vi brillano di chiara luce; è un'idea ingegnosa e originale quella di mettere in rapporto le distanze e i tempi di rivoluzione dei pianeti, come tu fai, con le proprietà simmetriche dei corpi regolari. [...] Perciò ti esprimo la mia approvazione per l'ardore che hai mostrato nel portare a compimento queste ricerche. Ma non saprei dire se ti si possa dare ragione in tutto. Se si utilizzassero i veri valori delle eccentricità dei pianeti, che io mi sono procurato in molti anni, si potrebbe procedere ad una verifica piú precisa. Ma poiché io sono molto occupato nella elaborazione e nella edizione dei miei lavori astronomici,che non ho potuto portare a compimento in Danimarca, non ho in questo momento il tempo di eseguire tale confronto. [...] Questo e altre cose ancora, che non ho il tempo di sviluppare, mi fanno dubitare della tua scoperta, peraltro assai ingegnosa.

E piú avanti:

> Applica dunque a ciò le forze del tuo spirito e se vi trovi una concordanza perfetta che non viene meno in alcuna parte e che non lascia nulla a desiderare, sarai per me un grande Apollo[nio].

A Maestlin nel maggio Brahe chiarì:

> Se il perfezionamento della astronomia deve farsi piuttosto a priori, per mezzo di questi corpi regolari, che a posteriori, sulla base della conoscenza dei fatti rivelati dalle osservazioni, come tu suggerisci, dovremo certo attendere troppo a lungo, se non eternamente, e invano, che qualcuno lo realizzi.

4.2 Astronomia Nova: Marte.

Il viaggio di Keplero a Wandsbeck sarebbe stato lungo, caro e faticoso. Ma alla fine del '99 Brahe fu nominato "Matematico imperiale" di Rodolfo II nel castello di Benatek presso Praga. Da lí scrisse una lettera generosissima a Keplero. Essa peró giunse in ritardo: Keplero si era già messo in viaggio. A Benatek fu ricevuto a braccia aperte da Brahe; vi restò 4 mesi (invece che un paio di settimane) e infine accettò l'offerta che Brahe gli aveva proposto. Cosí al suo arrivo nel 1601, su sua proposta, fu nominato assistente e quando, il 24 ottobre dello stesso anno (N.S.), Brahe morì improvvisamente (aveva tardato troppo ad orinare durante una cena con l'Imperatore) gli succedette come "Matematico imperiale". Il protestante Keplero era partito appena in tempo dalla Stiria dove l'arciduca Ferdinando aveva inaugurato una politica di repressione contro i Protestanti giungendo ad allontanarli proprio in quell'anno.

Giunto a Benatek dopo il doppio disastro di Brahe (Hven) e suo (Graz), Keplero dovette occuparsi di Marte come Tycho gli aveva chiesto. Brahe lo considerava come un perfetto esecutore, mentre Keplero era un profondo conoscitore e non un esecutore, sia pure perfetto. Morto Brahe, Keplero pubblicò a Praga nel 1602 il trattato *De fundamentis astrologiae certioribus*, a Francoforte nel 1604 il *ad Vitellionem paralipomena quibus Astronomiae pars optica traditur*; nel 1606 pubblicò, ancora a Praga, il trattato *de Stella nova in pede Serpentarii* cui nello stesso anno aggiunse due altre parti, una pubblicata a Praga e l'altra a Francoforte. Compose tra le tante le astrologie di Rodolfo e di Wallenstein.

In questi lavori Keplero mostrò le sue ben note attitudini; ma doveva fare ben di piú. Nel 1609 pubblicò un ponderoso trattato che conteneva la storia del suo pensiero, dei fallimenti, delle tribolazioni e dei successi finali di tutti quegli anni posteriori al 1596. Il libro in questione è *Astronomia nova aitiologetos [in greco] seu physica coelestis tradita commentariis de motibus stellae Martis*. Il titolo annunciava una rivoluzione.

Come disse Keplero nella introduzione:

> La mia intenzione in quest'opera consiste soprattutto nel promuovere la dottrina astronomica (particolarmente per quanto riguarda il moto di Marte) in tutte le sue tre forme [Tolomeo, Copernico, Brahe], in modo che tutti i valori calcolati sulla base delle tavole corrispondano ai dati forniti dall'osservazione, ciò che finora non si è potuto fare con sufficiente esattezza. Cosí la stella Marte nel mese di agosto del 1608 distava poco meno di 4 gradi dal luogo assegnatole dalle Tabulae Prutenicae [di Reinhold]. E nei mesi di agosto e settembre 1593 questo errore, che nei miei nuovi calcoli è pressoché eliminato, comportava poco meno di 5 gradi. Mentre perseguo questo fine e lo raggiungo felicemente passo anche alla metafisica di Aristotele, o piú precisamente alla fisica celeste e indago le cause naturali dei movimenti. Questa considerazione ci offre chiari argomenti per dimostrare che solo la concezione del mondo di Copernico è vera (con qualche piccolo muta-

mento) e le altre due sono false.

Vediamo i particolari. Il 20 dicembre 1601 Keplero informò Maestlin (troppo presto) che già possedeva una teoria di Marte e di tutti e 5 i pianeti mentre Brahe era vivo. Parlando di Brahe disse:

> Quel che Tycho fece fu prima del '97. Poi gli affari presero una brutta piega, Tycho fu ossessionato da tremende preoccupazioni e cominciò a diventare puerile. L'abbandono sconsiderato della sua patria lo tormentò. Qui poi la corte lo ha perduto definitivamente. Non era uomo da poter vivere con qualcuno senza suscitare gravi contrasti, soprattutto con persone di tale eminenza, consiglieri di re e di principi, ben consapevoli del loro rango.

Anni dopo, nella lettera a Maestlin del 5 marzo 1605, gli confidò:

> Le alte dignità e i grandi onori non esistono per me. Io vivo qui sulla scena del mondo come un privato cittadino. Se posso strappare alla corte una parte del mio stipendio, sono lieto di non essere obbligato a vivere completamente a mie spese. Per il resto, mi regolo come se io non fossi al servizio dell'Imperatore ma dell'intero genere umano e della posterità. Convinto di questo, disprezzo con un orgoglio segreto tutti gli onori e tutte le dignità [...]. il mio solo onore è per me il fatto che dalla Provvidenza mi siano state affidate le osservazioni di Tycho.

Il 1601 era troppo presto per cantare vittoria. Keplero dovette restare molto a lungo sull'orbita di Marte. Il primo passo dovette consistere nella prova che il punto cui devono rapportarsi i moti degli orbi eccentrici dei pianeti è il centro del Sole e non un punto matematico detto Sole medio. Le cause fisiche devono provenire solo da un corpo fisico.

La teoria di Marte secondo Brahe e Regiomontano, verificata mediante il calcolo del pianeta durante 10 opposizioni successive al Sole, era giunta a stabilire le longitudini con una precisione che non superava i 2' e poteva essere attribuita ad errori di osservazione. Per queste ragioni Keplero, nella revisione della teoria di Brahe, si rivolse ad altro. Per prima cosa determinò l'inclinazione dell'orbita di Marte rispetto alla eclittica, trovando che vale un grado e 50 primi, che la sua inclinazione è costante e che attraversa il Sole vero. Quindi egli reintrodusse l'equante (tolemaico) nella teoria fondandosi sulla osservazione di ben 4 opposizioni . Tra le 10 a disposizione scelse quelle del 1587, '91, '93 e '95. Va notato che per Copernico e Brahe l'equante coincideva col centro dell'orbita, mentre per Tolomeo esso bisecava l'eccentricità, come fece Keplero.

Nel capitolo XVI del libro II, dopo aver dedicato 15 pagine *in folio* a chiarire in dettaglio il suo metodo osservativo, egli spiegò che se il lettore giudicherà noioso e difficile questo capitolo, tanto piú sarà da compiangere l'autore che dovette fare lo stesso lavoro 70 volte.

La longitudine dell'afelio è 28 gradi 48' 55"; quanto alle distanze del Sole e dell'equante esse sono 0,11332 e 0,07232, posto il raggio =1. Usiamo allora la sua *hypothesis vicaria* che reintroduceva l'equante tolemaico; essa ebbe un notevole valore psicologico (ci volle molto tempo perché Keplero se ne sbarazzasse). Bisogna dire peró che Keplero non voleva spiegare fisicamente il moto epiciclico (benché anche lui lo usasse) e tendeva a negarne la realtà formale: un'anima motrice deve possedere intelligenza e per questo è necessario che un cerchio si riferisca ad un punto fisico, non a un punto matematico.

Ma la ipotesi vicaria, se fornisce le longitudini eliocentriche di tutte le opposizioni osservate con un errore inferiore a 2' 12", fornisce risultati molto diversi da quelli della sua teoria per le latitudini; nel caso di Marte questo divario può raggiungere il valore di 5 gradi. Era dunque condannata dai fatti, pur restando un utile strumento di lavoro. Infatti la bisezione delle eccentricità non funzionava: se la concordanza era accettabile per gli absidi e per i luoghi spostati di 90 gradi, per le distanze di 45 e 135 gradi lo scarto tra i calcoli e l'osservazione raggiungeva 8'. Keplero concluse:

> Poiché la divina benignità ha concesso in Tycho Brahe un osservatore diligentissimo, tale che le sue osservazioni ci rivelano l'esistenza nei calcoli di Tolomeo di un errore di 8', è giusto che noi accettiamo con gratitudine questo beneficio di Dio e ne traiamo profitto. Ossia, dobbiamo fare in modo di scoprire finalmente la vera struttura dei moti celesti.

Quegli 8' aprirono la strada al rinnovamento di tutta l'astronomia distruggendo i precedenti assiomi fondamentali della scienza del cielo che nessuno aveva messo in dubbio per duemila anni.

4.3 Astronomia nova: l'orbita della Terra.

Nel suo libro Keplero ci riportò la progressione dei suoi lavori nel modo stesso in cui essi avvenivano. Ci disse cosí che, sistemato (almeno temporaneamente) Marte, affrontò il moto della Terra. A tale fine considerò 4 situazioni in cui Marte sta nella stessa posizione rispetto al Sole (intervalli di 687 giorni): 5 marzo 1590, 21 gennaio 1592, 8 dicembre 1593 e 15 ottobre 1595. Poiché un cerchio è definito da 3 suoi punti, identificando S col Sole medio (da cui il moto della Terra appare uniforme) Keplero determinò la distanza dal centro dell'orbita. I 3 raggi vettori non sono uguali (come sembravano essere per Copernico e per Brahe). L'equante ed il Sole si trovano circa alla stessa distanza dal centro dell'orbita (da parti opposte).

Questo risultato gli apparve fondamentale: la Terra (il Sole per Brahe) ubbidisce alle stesse leggi di Marte. Keplero aggiunse altre 2 dimostrazioni. Una utilizzava il metodo di falsa posizione partendo da 4 posizioni di Marte, l'altra calcolava in 5 date diverse, separate dal periodo orbitale di Marte rispetto al Sole, la posizione della Terra usando la bisezione della sua eccentricità. Il metodo può essere rovesciato, partendo sempre dalle osservazioni di Brahe per calcolare le posizioni di Marte rispetto al Sole corrispondenti alla stessa posizione della Terra.

4.4 Astronomia nova: i pianeti.

A questo punto Keplero abbandonò gli innumerevoli calcoli dedicandosi per piú di un anno (tra l'ottobre 1602 e Natale 1603) ad altri lavori: la parte ottica dell'astronomia (del 1604) e il lavoro *De stella nova* (del 1606).

Ripreso poi il lavoro, Keplero si occupò delle orbite dei pianeti. Scoprì che non si tratta di una forza *animale*, dovuta ad un'anima, cioè ad una intelligenza; la causa di ogni attenuazione e intensificazione va posta nel punto (il Sole) che sta al centro del mondo, da cui si computano le distanze. I pianeti si comportano, egli disse, in modo conforme alle leggi della bilancia o della leva. Se il pianeta si muove con maggiore difficoltà (quindi piú lentamente) quanto piú è lontano dal centro, ció equivale a dire che il peso diviene tanto piú grave quanto piú si allontana dal fulcro, in virtú del braccio che lo sostiene a quella distanza. Non esistono, dice anche, orbi fisici che trasportino i pianeti: il moto trasversale viene dal Sole vero. È falsa la dottrina aristotelica che attribuisce ai corpi moti naturali "assoluti" verso il basso e verso l'alto; la gravità è il risultato di una attrazione da fuori: il sasso non tende verso la Terra ma è attratto da questa e a sua volta l'attrae verso di sé. Cosí la Terra attrae la Luna e a sua volta ne è attratta. I gravi non tendono al centro della Terra in quanto centro del mondo, ma in quanto centro di un globo affine. Se la Terra non fosse sferica i gravi provenienti da ogni parte non sarebbero diretti verso il suo punto centrale ma giungerebbero in punti diversi.

Nell'introduzione alla Astronomia Nova (scritta per ultima) Keplero disse infine:

> Si considerino i corpi del Sole e della Terra e si giudichi a quale dei due convenga di piú essere la fonte dell'altro: sarà il Sole, che muove tutti gli altri pianeti, a muovere la Terra o sarà la Terra a muovere il Sole, che è il motore degli altri pianeti, e tanto piú grande di essa? Che dire del periodo di rivoluzione di 365 giorni? Per la sua grandezza si situa tra il periodo di Marte, che è di 687 giorni, e quello di Venere,che è di 225.

Questi risultati sono di importanza capitale. La modifica introdotta da Keplero – il trasferimento dell'origine dalle orbite planetarie nel Sole vero – conferma la verità della dottrina copernicana, fondata sulla concezione dinamica dell'universo.

Ma anche i pianeti hanno virtù motrici proprie. Il Sole li sposta di lato ma chiaramente non può né avvicinarli né allontanarli. A fare questo (allontanarsi ed avvicinarsi e declinare la latitudine) è il pianeta stesso. Keplero annuncio':

- Il corpo del pianeta è per natura incline alla quiete [...].
- Esso viene trasferito di luogo in luogo, secondo la longitudine dello Zodiaco, dalla virtú che emana dal Sole.
- Rimanendo invariata la distanza Sole - pianeta, tale trasferimento si realizzerebbe lungo una traiettoria circolare.
- Se lo stesso pianeta potesse compiere due intere rivoluzioni intorno al Sole a due diverse distanze, i tempi periodici starebbero in proporzione doppia delle distanze, ossia dell'ampiezza dei cerchi.
- La virtú nuda e sola che risiede nel corpo stesso del pianeta non è sufficiente a trasportare il suo corpo di luogo in luogo poiché [il pianeta] non ha piedi, ali o pinne che gli permettano di fare presa sull'aria eterea.
- Tuttavia l'avvicinarsi del pianeta al Sole e l'allontanarsi da esso derivano dalla virtú propria del pianeta.

Questi assiomi non conducevano ancora alla soluzione cercata. Nella introduzione alla Astronomia Nova Keplero ammise che i motori gli dettero grandi fatiche.

> L'errore non consisteva nell'averli introdotti ma nel fatto che li avevo legati, [...], alle macine dei cerchi, tratto in errore dall'opinione comune [...].

La conclusione fu che i pianeti non formano cerchi (sarebbe impossibile per l'anima di un pianeta conoscere la tavola di concordanza tra gli angoli sotto i quali apparirebbe il diametro del Sole e le distanze da percorrere sul raggio vettore che collega il pianeta al Sole). Keplero si distaccò dunque definitivamente da epicicli, deferenti ed equanti passando a considerare traiettorie ovali.

4.5 Astronomia nova: l'ellisse.

Passarono ancora due o tre anni, sempre molto travagliati, prima che Keplero potesse concludere che la traiettoria è una ellisse di cui il Sole occupa un fuoco. Nella lettera a Fabricius dell'11 ottobre 1605 si espresse cosí:

> [...] Quando vidi che le distanze [Sole – Marte] fondate sull'ipotesi di un cerchio eccentrico perfetto erano troppo grandi [...] nella stessa misura in cui la mia ellisse (che differisce di pochissimo da un ovale) era troppo piccola, avrei potuto giustamente commentare cosí: il cerchio e l'ellisse appartengono allo stesso genere di figure e peccano ugualmente, ma in

> senso inverso: quindi la verità sta nel mezzo; tra due figure ellittiche non può trovarsi altro che un'ellisse. La traiettoria di Marte sarà dunque una ellisse, la cui lunula tagliata via ha una larghezza cheè metà di quella della lunula dell'ellisse precedente. La larghezza di tale lunula era di 858/100.000; la lunula dell'ellisse di Marte doveva quindi essere larga 429; di questa frazione dovevano essere accorciate nelle longitudini medie le distanze calcolate per una traiettoria perfettamente circolare. Questa è la verità. Ma guarda come nel frattempo io mi sia lasciato trascinare da vane allucinazioni a nuove fatiche. [...]
>
> Povero me! È solo all'epoca delle feste pasquali che mi resi conto (se fossi stato piú attento avrei potuto ricordarmi che l'avevo già dimostrato nei miei Commentarii) che una traiettoria di tal fatta non è ellittica [...] ma che negli ottanti si avvicina di piú al cerchio, e quindi diviene gonfia. [...]
>
> Ma ecco il risultato, mio Fabricius: la traiettoria del pianeta è una ellisse perfetta (che Dürer chiama spesso ovale) o non se ne scosta che di una quantità impercettibile.

Un anno e mezzo piú tardi, in una lettera a Keplero in cui riprendeva le teorie di Brahe e di Copernico, Fabricius formulò una critica generale delle nuove concezioni introdotte da Keplero nella astronomia, in particolare l'abbandono della circolarità delle orbite celesti. Movimenti non uniformi erano perfettamente ammissibili nella astronomia tolemaica; ma contro ciò aveva protestato Copernico. Fabricius (non copernicano) accettava in questo la critica copernicana a Tolomeo: i moti celesti devono essere uniformi rispetto ai propri centri.

Keplero riconobbe legittima l'esigenza di uniformità avanzata da Fabricius, ma contestò che la circolarità fosse il solo mezzo per garantirla. Cosí cominciò col ricordargli che il principio della uniformità circolare non è affatto osservato dai movimenti reali dei pianeti. I moti (i cerchi uniformi) non si accordano con i fenomeni. Se Fabricius aveva sostenuto che tutti i moti si effettuano su un cerchio perfetto, ciò, rispose Keplero, è falso per i moti composti. Secondo Copernico, continuò Keplero, essi si effettuano su una traiettoria rigonfia ai lati; secondo Tolomeo e Brahe, anche su spirali. La differenza rispetto a Fabricius è dunque la seguente: per Keplero si trattava del moto complessivo del corpo, un movimento reale e completo, non scindibile nelle sue componenti.

Keplero ne parlò diffusamente:

> Né la mia fatica ebbe termine finché [...] con dimostrazioni laboriosissime e utilizzando i dati di numerosissime osservazioni giunsi a stabilire che la traiettoria del pianeta in cielo non è circolare, ma è una traiettoria ovale, perfettamente ellittica.
>
> La geometria a sua volta mi insegnò che una tale traiettoria viene descritta se al motore proprio dei pianeti assegniamo il compito di fare oscillare il corpo lungo la linea retta che termina nel Sole; mediante tale librazione anche le equazioni dell'eccentrico risultano giuste e conformi all'osservazione.
>
> Infine l'edificio ormai compiuto fu coronato dal tetto, e si dimostrò geometricamente che una tale librazione deve essere prodotta da una facoltà magnetica, corporea. Pertanto questi motori propri dei pianeti si rivelano, con la massima probabilità, come affezioni degli stessi corpi planetarii paragonabili a quella, che è nel magnete, che tende verso il polo e attrae il ferro: sí che tutto il sistema dei moti celesti è governato da facoltà meramente corporee, ossia magnetiche, eccettuato solo la rotazione in loco del corpo del Sole; per questa rotazione sembra che ci sia bisogno della forza proveniente da un'anima.

Queste "dimostrazioni laboriosissime" riguardano soprattutto i calcoli innumerevoli cui Keplero si dovette sobbarcare per determinare con precisione la traiettoria di Marte e trovarne l'equazione, compito particolarmente difficile per via del fallimento della ipotesi vicaria. L'orbita di Marte è dunque una ellisse. La vecchia idea della circolarità perfetta delle orbite era stata in realtà un errore.

Keplero introdusse anche, in questa occasione, due tesi. Una stabilisce che ogni pianeta percorre una ellisse di cui il Sole occupa uno dei fuochi. La seconda tesi dice che i tempi di rivoluzione sono proporzionali alle corrispondenti aree. La terza legge non faceva parte della Astronomia nova: comparirà nell'opera successiva.

Nel 1610 Keplero si procurò un cannocchiale; con esso potè riscoprire le macchie solari, da lui già previste. Pubblicò cosí nel maggio 1610 la *Dissertatio cum nuncio sidereo*, in cui tra l'altro approvava e sosteneva la tesi di Galileo (del mese di marzo).

4.6 Epitome e Harmonice.

Nel 1610 Keplero pubblicò a Praga il libretto *De stella nova in pede Serpentarii*; l'anno dopo usci' ad Augsburg (Augusta) *Dioptrice.* In quell'anno, il 23 maggio, Mattia prese il trono, relegando il fratello in un castello (dove morì l'anno seguente). La moglie di Keplero morì durante quella estate. I tempi cambiarono e Keplero trovò molte difficoltà a riscuotere gli assegni. Cosí nel 1612, pur restando formalmente Matematico imperiale, divenne matematico degli Stati dell'alta Austria, stabilendosi a Linz dove si risposò l'anno dopo con Susanna Reutlingen, orfana e povera.

Nel 1613, al seguito di Mattia, Keplero andò alla Dieta di Ratisbona, ma il desiderio di adeguare la riforma evangelica al cambiamento di 10 giorni che il Papa aveva deciso non potè allora venire esaudito per via di noti pregiudizi.

A Linz Keplero pubblicò nel 1615 la *Nova stechiometria Doliorum* e nel 1619 il trattato De Cometis sulla apparizione di ben tre comete fu pubblicato ad Augsburg (Augusta). Nel 1620 sua madre fu imprigionata per 13 mesi e Keplero dovette anche tornare a Weil per riuscire a liberarla (morì l'anno dopo). Dal 24 giugno al 29 agosto del 1622 Linz subì un pericoloso assedio.

L'Epitome Astronomiae copernicanae è la piú sistematica e compiuta opera di Keplero. La prima parte venne pubblicato a Linz nel 1618, la seconda parte sempre a Linz nel 1620, la terza parte a Francoforte nel 1621. In questi volumi le sue scoperte sono presentate nel quadro della sua concezione generale del cosmo. Vi riappaiono con rilievo accresciuto gli argomenti archetipali che erano già apparsi nel Mysterium cosmographicum. Si capisce bene la sua fedeltà al pitagorismo o neoplatonismo cristiano che aveva ispirato la sua giovinezza. Come un fuoco celato sotto le ceneri a lungo questa fedeltà risorge sia nell'Epitome che in Harmonices Mundi. Dall'inizio del libro IV dell'Epitome in cui espone la fisica celeste, Keplero annunciò:

> La filosofia di Copernico assegna le parti principali del mondo a sue regioni separate. Poiché nella sfera, immagine di Dio creatore e archetipo del mondo [...] ci sono tre regioni, simboli delle tre persone della ss. Trinità: il centro, simbolo del Padre, la superficie, simbolo del Figlio, e l'intervallo, dello Spirito Santo, furono create altrettante parti principali del mondo, ognuna in una regione particolare della sfera: il Sole nel centro, la sfera delle fisse nella superficie e infine il sistema dei pianeti nella regione intermedia tra il Sole e le stelle fisse.

Piú avanti:

> La perfezione del mondo consiste nella luce, nel calore, nel moto e nell'armonia dei moti, che sono entità analoghe alle facoltà dell'anima: la luce alla facoltà sensitiva, il calore alla facoltà vitale e naturale, il moto a quella animale e l'armonia alla razionale. E in verità la bellezza del mondo risiede nella luce; la vita e la vegetazione hanno la loro sede nel calore, nel moto si trova una sorta di *quasi* azione, e nelle armonie la contemplazione, in cui Aristotele pone la beatitudine. Ora, poiché ad ogni affezione concorrono necessariamente tre cose, ossia la causa *a qua* (da cui), il soggetto *in quo* (in cui) e la forma *sub qua* (sotto la quale): il Sole, dunque, rispetto a tutte le dette affezioni del mondo, ha la funzione di causa efficiente, mentre la regione delle stelle fisse ricopre quella di forma, di contenente e di termine; l'intervallo (*intermedium*), infine, svolge la funzione di soggetto. [...] Per tutte queste ragioni il Sole si presenta come il corpo piú importante di tutto il mondo.

Mostrata, con queste e con altre parole, l'eminenza della dignità del Sole, Keplero proseguì spiegando che la sua posizione centrale risulta automaticamente anche se non si invoca il simbolo trinitario. Come avevano ben visto gli antichi Pitagorici, seguiti da Copernico, il posto centrale, il piú onorevole, spetta proprio al Sole: come fonte di vita, di calore e di luce deve stare al centro dell'universo. Lo stesso vale per la sua funzione di sorgente e movimento che implica una posizione centrale: infatti una sua rotazione intorno al proprio asse (che, dice Keplero, non deriva solo dalla Astronomia nova ma adesso anche dalla osservazione telescopica delle macchie solari) impone ai pianeti di girare intorno. Dopo aver escluso la presenza di un'anima senza orbe a traslare un corpo e di intelligenza che muova ogni globo planetario, Keplero concluse

> ... la figura ellittica della traiettoria dei pianeti e le leggi dei moti in virtú dei quali si genera una tale figura rivelano piuttosto la natura della bilancia o una necessità materiale che non un concetto e una determinazione da parte di una mente.

Infatti, per muovere corpi materiali bisogna disporre di forze fisiche che agiscano su di essi: i corpi celesti non fanno eccezione.

Piú avanti:

> ... è abbastanza chiaro che non si dovrà introdurre alcuna intelligenza che muova in cerchio i globi obbedendo ai dettami e agli ordini della ragione; né si dovrà attribuire il moto di rivoluzione a un'anima che, come avviene nella rotazione intorno a un'asse, con una spinta uniforme imprima il moto nei globi; ma che è solo e unicamente al corpo solare, situato al centro dell'intero universo, che si può attribuire tale moto primario dei pianeti intorno al corpo del Sole. [...] 1) Quanto piú un pianeta dista, rispetto agli altri, dal Sole, tanto piú lento è il suo moto, in modo tale che il rapporto dei tempi periodici è in proporzione sesquialtera delle distanze dal Sole [T^2/R^3, è la relazione tra tempi e distanze trovata nel 1618]. Da ciò deduciamo quindi che il Sole è la fonte del moto. 2) La medesima conseguenza si può dedurre dal moto dei singoli pianeti, nel senso che quanto piú, in qualsiasi periodo, un pianeta si avvicina al Sole, tanto piú velocemente si muove, in proporzione esattamente doppia [$1/R^2$]. Né vi ripugna la dignità e la potenza del corpo del Sole, che è bellissimo e di sfericità perfetta, ed è grandissimo e fonte di luce e di calore, da cui scaturisce tutta la vita vegetativa; tanto che il calore e la luce possono essere considerati *quasi* strumenti di cui il Sole si serve per comunicare il moto ai pianeti [per muovere i pianeti, dice Keplero, è necessaria una *species* particolare; ma luce e calore rafforzano i motori propri dei pianeti che assicurano la loro rotazione intorno al proprio asse]. 4) Ne risulta con ogni probabilità la rotazione in loco del Sole intorno al suo asse

immobile, nello stesso verso che si riscontra nel moto di tutti i pianeti; e con un periodo inferiore a quello del pianeta piú vicino e piú veloce di tutti, Mercurio.

Epitome è un testo molto lungo e assai complesso di cui abbiamo fornito solo pochissime pagine. Lo stesso possiamo dire dell'altro grande testo, i 5 libri di *Harmonice mundi*, pubblicati a Linz nel 1619, che riassumono e concludono la fisica dell'insieme dei pianeti. Si tratta del culmine delle speculazioni cosmologiche di Keplero. Ma purtroppo dobbiamo fermarci; già da tempo abbiamo superato quanto ci è stato permesso scrivere in questa sede. Ricordiamo ancora che nel 1627 uscirono per i suoi tipi le *Tabulae Rudolphianae* che contenevano la teoria dei logaritmi appena pubblicata, a Ulm dove si era trasferito l'anno prima. Vi si trovava tra l'altro il catalogo di 777 stelle di Brahe che Keplero porto' a 1004. Passò infine nel nord della Germania, a Sagan.

Giovanni Keplero morì quasi improvvisamente il 30 (20) novembre 1630 (secondo la Encyclopaedia Britannica il 15 novembre nuovo stile) a Ratisbona, dove si era recato per tentare di riscuotere un credito.

Chapter 5

Galileo.

5.1 Gioventù.

Chi era Galileo Galilei, nato a Pisa il 15 febbraio 1564?

Il padre, Vincenzo Galilei, era musicista fiorentino; sua madre era Giulia Ammannati di Pescia. Poco è detto del periodo iniziale. Era, pare, un bambino sveglio che seguì i corsi elementari (e poi quelli avanzati) con la dovuta partecipazione.

Nel 1574 il padre Vincenzo e tutta la famiglia rientrarono a Firenze dove Galileo continuò i suoi studi. Nel 1581, il 6 settembre, Galileo si iscrisse alla Facolta' delle Arti di Pisa con l'intenzione di studiare Medicina; abbastanza rapidamente però se ne disinteressò, e cosí anche accadde per la fisica aristotelica di Borri corroborata dagli studi del peripatetico Libri; Galileo preferì occuparsi della lettura delle matematiche sotto la attenta guida di Ostilio Ricci da Fermo che era stato allievo di Tartaglia.

In tutti quegli anni Galileo subì l'influenza degli scrittori del passato: oltre a ristudiare in prima persona Aristotele, si occupò di Pitagora, Platone, Archimede, Euclide (che cominciò a studiare nella traduzione latina di Tartaglia) e di parecchi altri. Era, in quel periodo e dopo, estroverso, di grandi capacità e molto profondo. Già nel 1583 (secondo Viviani), partendo dall'osservazione dell'isocronismo delle varie oscillazioni libere di una lampada a pendolo nel Duomo di Pisa aveva scoperto le leggi dell'isocronismo.

Nel 1585 Galileo ritornò presso la famiglia a Firenze senza aver conseguito alcun titolo accademico. Vi trascorse 4 anni impartendo lezioni private e interessandosi alle piú diverse discipline.

Nel 1586 la *Bilancetta*, manoscritta, segnò il suo ingresso nella vita scientifica. Due anni dopo tenne due lezioni alla Accademia di Firenze su "figura, sito e grandezza" dell'Inferno di Dante. Nel 1589, grazie all'interessamento di Guidobaldo da Monte (uno dei matematici con cui era entrato in contatto in quegli anni) fu nominato lettore di matematiche nella Università di Pisa. Lì restò per tre anni occupandosi prevalentemente di meccanica. Si distaccò sempre di piú da Aristotele, avvicinandosi ai sostenitori della teoria dell'impeto e negli studi raccolti nel De Motu (postumo) espose le prime teorie sulla caduta dei gravi.

In questo periodo entrò in contatto con colleghi da cui ebbe diversi stimoli culturali. Tra di loro spiccava il platonico Jacopo Mazzoni di Cesena: grazie alla sua amicizia Galileo sviluppò alcuni atteggiamenti scientifici fondamentali: la fiducia platonico - pitagorica nelle matematiche come strumento di conoscenza della natura e la critica della concezione aristotelica della fisica e della cosmologia (nelle Scuole dominava l'Aristotelismo, affiancato in via subordinata da insegnamenti platonici spesso formali).

Ma la situazione economica si aggravò per la morte del padre; come primogenito era suo obbligo prendersi cura della madre, delle sorelle e del fratello minore Michelangelo.

5.2 Il periodo padovano.

Sul finire del '92 Galileo fu chiamato a ricoprire la cattedra di matematiche presso l'università di Padova, con un notevole aumento di stipendio che gli garantì la sicurezza. Trascorse lí 18 anni in grande libertà di pensiero per la garanzia fornita dalla protezione della Repubblica di Venezia contro il prepotere della Inquisizione. Furono certo, a posteriori, i suoi anni piú felici: un insegnamento coronato dal successo, l'inizio di importanti ricerche fisiche, l'ideazione di un proficuo laboratorio per apparecchiature scientifiche. Si compì l'adesione al copernicanismo sfociata nelle famose scoperte astronomiche del 1610. In questo periodo ebbe frequenti contatti con il vivo ambiente veneziano stringendo in particolare una profonda amicizia con Paolo Sarpi e con Francesco Sagredo.

Nel '93 scrisse *Le Mecaniche*, saggio di statica e dinamica archimedea, e il *Trattato di Fortificazione*, sommario di lezioni su temi di ingegneria militare. Quattro anni dopo seguirono lettere di chiaro intento copernicano a Mazzoni e a Keplero, mentre il *Trattato della sfera, ovvero Cosmografia* conteneva ancora un'esposizione del geocentrismo tolemaico. Aveva sposato la veneziana Marina Gamba, un'unione destinata a durare a lungo da cui nacque nel 1600 Virginia e l'anno dopo Livia. Piú tardi, nel '06, nacque Vincenzo.

Nel 1604 tenne tre lezioni sulla composizione di un nuovo astro (era una Supernova) di cui ci restano solo pochi frammenti. Due anni dopo pubblicò *Le operazioni del compasso geometrico e militare*, strumento da lui costruito nove anni prima la cui stampa fece nascere una aspra polemica con Baldassarre Capra che attribuiva l'invenzione al proprio maestro, il tedesco

Gutzenhausen; per queste ragioni stampò nel 1607 la *Difesa contro alle calunnie et imposture di Baldassarre Capra.*

Nel 1609 Galileo giunse alla formulazione giusta della legge sulla accelerazione di caduta e sul moto parabolico dei proiettili. Avuta notizia di uno strumento ottico in uso in Olanda per far vedere "le cose lontane cosí perfette come se fossero state molto vicine", costruì un modello (il cannocchiale) assai superiore, iniziando le fortunate osservazioni celesti. Scoprì i quattro satelliti di Giove, le macchie lunari, le fasi di Venere e piú tardi le macchie solari. Di queste scoperte dette notizia pubblicando a Venezia il 12 marzo 1610 il *Sidereus Nuncius*, dedicato a Cosimo II, il granduca di Toscana che era stato suo allievo. Si trattava di un conciso opuscolo in latino il cui lungo sotto titolo indicava sinteticamente la sconvolgente portata scientifica:

> Grandi e oltremodo mirabili spettacoli apre ed espone allo sguardo di ognuno e in special modo di filosofi ed astronomi, da Galileo Galilei, patrizio fiorentino, dello studio padovano pubblico matematico, col cannocchiale da lui da poco inventato, osservati nella faccia della luna, in innumerevoli fisse, nella Via Lattea, nelle stelle nebulose, e in primo luogo in quattro pianeti intorno alla stella di Giove, a diversi intervalli e periodi, con celerità mirabile rotanti: da nessuno finora conosciuti, primo l'autore di recente li scorse, e assegnò loro il nome di astri medicei.

Nelle pagine iniziali Galileo si soffermava a descrivere la propria invenzione del cannocchiale, ricordando sia gli analoghi strumenti rudimentali fabbricati dagli artigiani fiamminghi, sia la "dottrina delle rifrazioni" quali presupposti della propria innovazione metodologica. Espose quindi le sue nuove osservazioni sulla superficie lunare e sulla sua scabrosità (gli aristotelici la volevano liscia e speculare) e chiarì il carattere terrestre e riflesso della leggera luminosità percepita ivi nella parte in ombra. Passò poi ad esplorare la grandezza apparente delle fisse e la struttura della Via Lattea e delle nebulose. Infine la parte piú lunga e completa fu dedicata al resoconto della scoperta dei satelliti di Giove (che costituirono per Galileo una ulteriore, cospicua, conferma del copernicanismo):

> Queste sono le osservazioni sui quattro pianeti medicei, di recente e per la prima volta da me scoperti; e sebbene da esse non ancora sia dato ricostruire in termini numerici i loro periodi, è lecito almeno porre in evidenza alcuni fatti degni di attenzione. [...] Nessuno può mettere in dubbio che essi compiono i loro giri intorno a Giove nel medesimo tempo che effettuano tutti insieme i periodi dodecennali intorno al centro del mondo. [...] Abbiamo inoltre un ottimo ed eccellente argomento per togliere di scrupolo coloro che, pur accettando con animo tranquillo nel sistema copernicano la rivoluzione dei pianeti intorno al sole, sono peró cosí turbati dalla rotazione della sola luna intorno alla terra, mentre intanto ambedue compiono l'annuo giro intorno al sole, da ritenere che si debba respingere questa struttura dell'universo come impossibile.

5.3 Galileo a Firenze: prima parte.

Il 10 luglio 1610 Galileo accettò di ritornare a Firenze (superando ogni remora del patriziato veneto); venne nominato "primario matematico" dello Studio di Pisa senza obbligo di lezioni e "primario matematico e filosofico" del Duca di Toscana. Il lungo periodo veneziano lo aveva maturato: si sentiva adesso completamente a suo agio, il suo copernicanismo era aperto ed evidente; aveva grandi amici, era stimato ed immensamente considerato. Il suo rientro a Firenze non poteva cominciare in condizioni migliori. Cercava dunque di favorire la diffusione del Copernicanismo da grato figlio della Chiesa, sempre pensando agli effetti nuovi ed al modo di presentarli alle persone dotte e amanti del nuovo, capaci di vedere le cose nuove; non certo ai dottori che si annidavano nelle università. Si adoperò sempre ad affrontare i problemi concreti, evitando formalismi (dannosi) ed artifizi verbali. Tra l'altro per lui il cannocchiale restò "l'occhiale", il microscopio era "l'occhialino", la bilancia idrostatica era "la bilancetta".

Nel marzo del 1611 si recò a Roma. Fu il periodo piú luminoso della sua carriera. Al suo arrivo (fine marzo) scrisse a Filippo Salviati:

> Sono stato favorito da molti di questi Ill.mi Sigg. Cardinali, Prelati et diversi Principi, li quali hanno voluto vedere le mie osservazioni e sono tutti restati appagati. [...] Questa mattina sono stato a baciare il piede a Sua Santità, presentato dall'Ecc.mo Sig. Ambasciator nostro, il quale mi ha detto che io sono stato straordinariamente favorito, perché Sua Beatitudine non comportò che io dicessi pure una parola in ginocchioni.

Per i suoi meriti l'Accademia dei Lincei lo accolse tra i suoi soci con grande onore, offrendogli un circolo fidato e una tribuna. Malgrado la giovane età il suo fondatore, Federico Cesi (allora Marchese di Monticelli, piu' tardi Duca d'Acquasparta e Principe di S. Angelo), fu il suo piú fido amico e consigliere in Roma.

Restava, purtroppo, la grossa svista: per Galileo, spirito vigoroso e semplice al tempo stesso, si trattava di avvicinare le persone importanti al Copernicanismo (come se si trattasse di una strada da percorrere); fra le persone che si contavano era una cosa diversa: il copernicanismo poteva andare bene fino ad un dato punto, fino a quando non entrasse in contrasto con le dottrine ecclesiastiche piú fondamentali, con la filosofia e la teologia, la cui cosmologia era tolemaica. Ma dal punto di vista superiore, teologico, non c'era dubbio che il "vero" sistema fosse tolemaico. Una lenta introduzione, durata 100 - 200 anni, sarebbe stata possibile: non un rapido passaggio per le persone illustri, che ad altissimo livello mancavano. Fu questa la base del profondo dissidio tra Galileo e la Chiesa che si sarebbe risolto nel '33 con la condanna di Galileo.

Di temperamento aperto e vigoroso, Galileo sapeva dunque di dover andare cauto: non si faceva illusioni sulla comprensione della gente, neppure nei confronti di cose semplici ed evidenti, per esempio la prova che le macchie solari si trovano sulla superficie del globo solare, invece di essere (come riteneva il gesuita padre Scheiner) corpi opachi gravitanti intorno al Sole. Sperava che potessero penetrare a poco a poco. Le sue armi consistevano nelle "necessarie dimostrazioni" e in una cauta ironia. Era ben lontano dall'essere indiscreto presentando al popolo in volgare un problema (quello copernicano) che nella forma data avrebbe dato scandalo alle anime pie. Alla fine, sulle questioni fondamentali ecclesiastiche il Papa e i Cardinali naturalmente non potevano copernicanizzarsi; un lavorio lento, continuo, che richiedesse l'adesione al copernicanismo e la revisione della forma delle Scritture, avrebbe richiesto centinaia di anni.

Il Cardinale Conti, al quale aveva chiesto consiglio, gli rispose il 7 luglio 1612:

> ... se V. S. parla dell'incorrottibilità del cielo, come pare che accenni nella sua, dicendo scoprirse ogni giorno nove cose nel cielo, le respondo non esser dubbio alcuno che la Scrittura non favorisce ad Aristotele, anzi piuttosto alla sentenza contraria, sì che fu comune opinione dè Padri che il cielo fosse corruttibile. Se poi queste cose che di nuovo si scorgono in cielo, dimostrino questa corruttibilità, ricerca longa consideratione, sí perché il cielo essendo da noi sí distante, è difficile affermare di lui cosa di certo senza longhe osservatione, sí anco perché se è corruttibile, bisogna habbi determinate cause di queste mutatione. [...] Quanto poi al moto della terra et del sole, si trova che di due moti della terra puol essere questione: l'uno dè quali è retto, et fassi dalla mutatione del centro di gravità; et chi ponesse tale moto, non direbbe cosa alcuna contro la Scrittura, perché questo é moto accidentario alla terra. L'altro moto è circolare, sí che il cielo stii fermo et a noi appare moversi per il moto della terra, come à naviganti appare moversi il lido; et questa fu l'opinione di Pittagorici, seguitata poi dal Copernico, dal Calcagnino et altri, et questa pare meno conforme alla Scrittura [...]. Nondimeno Diego Stunica, sopra il nono capo di Giob, al versetto 6, dice essere piú conforme alla Scrittura moversi la terra, ancor che comunemente la sua interpretatione non sia seguita. Che è quello che si è potuto trovare fin hora in questo proposito; se bene quando V. S. desideri di havere altra chiarezza d'altri luoghi della Scrittura, me lo avisi, ché gli lo mandarò.

Il maestro dei teologi, cardinale Roberto Bellarmino, se ne era impensierito; già nel 1611 aveva voluto sapere che cosa fosse quella novita' del "cannone ovvero occhiale". Il dibattito copernicano si era imposto alla sua attenzione. Bellarmino aprì un'inchiesta (segreta, naturalmente) sulla questione. Nel suo spirito, il sospetto teologico non aveva nessun rapporto con le conclusioni scientifiche, da lui ritenute esenti da pregiudizi; ma la sua posizione generale, lontana dalla imparzialità scientifica, si mostrò evidente alla luce degli avvenimenti successivi (per Galileo fu estremamente difficile da comprendere). E inoltre, non gli pareva poi importante la sostanza di alcune frasi di Galileo e il suo stesso testo delle *Controversie* era stato posto all'Indice nel 1590 *donec corrigeretur*. Bastava che Galileo parlasse ex suppositione, proprio come sembrava il caso di Copernico, e così infatti rispose al napoletano Padre Antonio Foscarini, Provinciale della Calabria, il 12 aprile 1615.

A Firenze Niccolò Lorini, professore di storia ecclesiastica, inveì dal pergamo contro le nuove dottrine il giorno dei Morti del 1612; era un po' presto: colto in fallo, si tirò indietro con una lettera di scuse a Galileo. Nel frattempo Galileo aveva fatto pubblicare nel marzo 1613 le Lettere sulle macchie solari a Marco Welser (stampate a Roma a cura della Accademia dei Lincei). Il loro titolo ufficiale era *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*: rappresentano la risposta a padre Cristoforo Schneider nella disputa sulla priorità dell'osservazione e sulla natura stessa delle macchie. Esse sono apertamente copernicane.

Nel '12 era uscito il *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua o in quella si muovono*. Alla fine del '13 (il 21 dicembre) Galileo scrisse una *Lettera a Castelli*, modello di misura e abilità, in cui abilmente notava che, mentre nel sistema Tolemaico non si può bloccare il sole, pena la disorganizzazione dell'intera macchina dei cieli, col sistema Copernicano, posto il sole al centro del mondo, diventa lecito intendere che Giosuè abbia fermato proprio il moto della terra e dei pianeti senza disordinarli. Queste acrobazie intellettuali tendevano a scindere il fronte avversario.

5.4 Dal 1614 al 1616.

La quarta domenica dell'Avvento, il 20 dicembre 1614, Tommaso Caccini, dell'ordine dei Predicatori, salì il pergamo di Santa Maria Novella a ribadire il testo di Giosuè sostenendo che l'idea dell'immobilità del sole era eretica; passò poi ad asserire che la Matematica era un'arte diabolica e che i Matematici andavano banditi da ogni stato cristiano. Nel linguaggio corrente "astronomo" significa "astrologo", e i principi avevano sempre avuto ai loro dipendenze "matematici di corte" la cui funzione principale era stata di stendere oroscopi. Cosí, con manovra astuta, Caccini tentava di mettere nello stesso sacco le idee scientifiche nuove e tutto il vecchio arsenale di magie, fatture e strologamenti che spaventava il popolino.

La pressione si accrebbe: il 7 febbraio 1615 Lorini inviò al Santo Uffizio una copia della Lettera a Castelli. Era sbagliata in modo essenziale su due punti. Anche Caccini era tornato alla carica e chiese di essere convocato al Santo Uffizio. La sua domanda fu ammessa alla seduta del 19 marzo: "Il Santissimo ha disposto che sia interrogato Padre Tommaso Caccini il quale, al dire del Cardinale d'Aracoeli, è informato su quanto concerne gli errori di Galileo, e domanda di testimoniare su questo soggetto per sgravio di coscienza". Seguì, il 13 novembre, Padre Ximenez, lo spagnolo sempre in viaggio, che confermò di aver sentito da scolari che la terra si muove, che Iddio e' accidente e che non esistono quantita' continue; che Dio e' sensitivo *dealiter*, che ride e piange *etiam dealiter*. Si trattava in definitiva di beghe fratesche; a queste il Sant'Uffizio non dedicò particolare attenzione. Già avevano capito che si trattava solo di beghe fratesche prive di riscontri oggettivi. Ma al di là della disputa, poco rilevante, restava la certezza del Santo Uffizio che il Copernicanismo poteva essere usato magari come ipotesi ma certo non doveva sostituirsi al generale atteggiamento tolemaico, indispensabile corollario della filosofia aristotelica.

Al contrario Galileo, da semplice e profondo credente, si batteva attentamente per sostituire il nuovo credo al vecchio. Ma la situazione a quel punto era diventata impossibile: i fatti scientifici diventavano problemi teologici; troppi erano allora i nodi ritenuti insolubili. Da una parte stava Galileo, che credeva nella possibilita' platonico - pitagorica di fornire nuove idee essenziali connesse a nuove scoperte; dall'altra parte stavano i Cardinali del Santo Uffizio che ritennero che nelle questioni teologiche e filosofiche la dottrina cristiana fosse chiaramente tolemaica (e che su queste questioni non esistessero problemi).

Alla fine del 1615 Galileo ritenne che non fosse piú il caso di indugiare. Partì dunque per Roma il 3 dicembre. Continuava, da buon cristiano, ad adoprarsi per il Copernicanismo; e non si avvide che, in una società priva di valori assoluti e di scienza, il Copernicanismo non poteva essere la nuova dottrina ma al piú avrebbe potuto essere tollerato come "ipotesi" puramente matematica. La decisione segreta finale sulle "proposizioni di Galileo" cominciò il 18 febbraio: il 23 i qualificatori del Santo Uffizio si pronunciarono segretamente. Delle due proposizioni (il sole è il centro del Mondo, e per conseguenza immobile di moto locale; la Terra non è il centro del Mondo, e non è immobile, ma si muove secondo se tutta, *etiam* di moto diurno), la prima fu dichiarata all'unanimità filosoficamente *stultam et absurdam, et formaliter haereticam*, poiché contraddiceva esplicitamente in molti punti la dottrina della Sacra Scrittura, sia nel senso letterale che nella interpretazione unanime dei Padri. La seconda proposizione fu dichiarata, anche essa all'unanimità, *meritare la stessa censura in filosofia, e quanto alla verità teologica, essere almeno erronea quanto alla fede.*

La censura fu sottomessa alla Congregazione Generale della Inquisizione il 25 febbraio, e ne uscì con la ratifica esecutiva del Papa. Bellarmino ebbe istruzione di convocare Galileo in udienza privata e di ammonirlo paternamente di abbandonare in tempo l'opinione che stava per essere proclamata erronea e contraria alla fede. Il 3 marzo, alla seduta settimanale della Congregazione, il Cardinale riferì che tutto era a posto e venne ordinata la pubblicazione del decreto in cui, oltre a vari altri libri (di Corrado di Schusselburg e di altri) si disse (tradotta in Italiano):

> E poiché anche alla notizia della Sacra Congregazione pervenne, che quella falsa dottrina Pitagorica in tutto opposta alla Divina Scrittura, sulla mobilità della terra ed immobilità del sole, che *De revolutionibus orbium coelestium* di Nicolao Copernico e *Giob* di Diego Astunica già insegnano a divulgare e far recepire; [...] pertanto, affinché non sia salvata ulteriormente l'opinione a disdoro della verita' Cattolica, ordinò che i detti Nicolao Copernico, De revolutionibus orbium coelestium, e Diego Astunica, Giob, siano da sospendere fino a che siano corretti; invece il libro del Padre Paolo Antonio Foscarini carmelitano sia del tutto da proibire e da condannare; e tutti gli altri libri da proibire; pertanto col presente Decreto li proibisce tutti, condanna e sospende.

Il 5 marzo il decreto fu pubblicato: i libri condannati furono confiscati. Per non aver potuto presentare l'*imprimatur* Lazzaro Scorriggio, lo stampatore di Foscarini, fu gettato in prigione dal Cardinal Carafa a Napoli. La Congregazione se ne compiacque.

Cosa era accaduto a Galileo? Nell'incartamento segreto della Inquisizione si trova l'argomento che segue.

> Giovedì 25 febbraio 1616
>
> L' Ill.mo S. Cardinale Millino notificò al Rev. Padre assessore e commissario del Santo Uffizio la relata censura dei P. Teologi alle proposizioni del Matematico Galileo, che il sole sia il centro del mondo e sia immobile di moto locale, e che la terra si muova, anche di moto diurno; il Santissimo ordinoàll'Ill.mo S. Cardinale Bellarmino, di chiamare il detto Galileo e di ammonirlo di tralasciare l'opinione detta; e se intendesse ricusare, il P. Commissario, in presenza di Notaio e Testi, gli faccia precetto di astenersi totalmente dall'insegnare o difendere o comunque trattare questa dottrina; se non si fosse assoggettato, venisse carcerato.
>
> Venerdì 26
>
> Nel palazzo di abitazione del detto S. Card. Bellarmino e nelle mansioni di Sua Ill.ma dominazione, lo stesso Ill.mo S. Cardinale, chiamato il sopraddetto Galileo, [...] in presenza del R. P. Michelangelo Seghizi di Lauda, dell'ordine dei Predicatori, Comm. Gen. del Santo Uffizio, ammonì Galileo sull'errore della suddetta opinione, e di tralasciarla; indi senz'altro il P. Commissario al

> predetto Galileo, ancora presente e costituito, prescrisse ed ordino' a nome del S.mo N. S. Papa e di tutta la Congregazione del Santo Uffizio, di abbandonare completamente l'opinione suddetta che il sole sia il centro del mondo ed immobile e la terra venga mossa, né di essa in alcun modo tenga, insegni né difenda; altrimenti, si proceda contro di lui nel Santo Uffizio. A questo precetto il detto Galileo aderì e promise di adeguarsi.

La logica della prima parte dell'operazione e' evidente. Galileo era venuto a Roma in veste di chi sollecita chiarimenti e direttive; tutto si era svolto correttamente e nella seduta del 3 marzo le sue pur copernicanissime Lettere Solari vennero esentate da ogni pecca. La cosa fuori posto era l'intimazione *sub poenis* ad abbandonare il Copernicanismo, di non tenerne alcun conto. Galileo aveva aderito. Anche dal punto di vista formale l'ultima parte del documento non funzionava. Le istrruzioni dicevano "avanti a notaio e testi"; ma il notaio non aveva firmato e, diversamente dall'uso, nessun funzionario dell'Inquisizione era stato menzionato come testimone. Infine l'accusato era richiesto di firmare di sua mano e la firma doveva essere legalizzata. Ciò non era avvenuto. Anche dalla minuta sembra quindi trattarsi solo di un verbale di notifica. Ma allora dove è l'originale? e la formula "io, Galileo Galilei, ho ricevuto precetto come sopra e prometto di obbedire"?

Per mettere fine alle voci e salvaguardare l'onore Galileo domandò a Bellarmino un certificato e l'ottenne:

> Noi, Roberto Cardinale Bellarmino, havendo inteso che il Signor Galileo Galilei sia calunniato o imputato di havere abiurato in mano nostra, et anco di essere stato per ciò penitenziato di penitentie salutari, [...] diciamo che il Sig. Galileo non ha abiurato in mano nostra né di altri qua in Roma né meno in altro luogo che noi sappiamo, alcuna sua opinione o dottrina, [...] ma solo gli è stata denuntiata la dichiarazione fatta da N.ro Signore et publicata dalla Sacra Congregazione dell'Indice, nella quale si contiene che la dotttrina attribuita al Copernico sia contraria alle Sacre Scritture, et però non si possa difendere né tenere. Ed in fede di ciò habbiamo scritta et sottoscritta la presente di nostra propria mano, questo dì 26 di Maggio 1616.

Galileo resto' a Roma ancora 4 mesi. Solo il 30 giugno si rimise in viaggio per Firenze. Il 24 ottobre la figlia Virginia ricevette i voti col nome di suor Maria Celeste. L'anno dopo anche la figlia Livia ricevette i voti come suor Arcangela. Nel '20 gli mori' la madre.

5.5 Tra il 1617 e il 1633.

Nel '21 mori' Bellarmino, l'anno dopo, il 28 gennaio, fu la volta di Cosimo II, succeduto da Ferdinando II sotto la tutela di Maria Cristina. Il 6 agosto del '23 divenne papa Urbano VIII il card. Maffeo Barberini, uomo di vasta cultura e amico personsle di Galileo. In quell'anno venne pubblicato a cura della Accademia dei Lincei il *Saggiatore, nel quale con bilancia esquisita e giusta si ponderano le cose contenute nella libra astronomica e filosofica di Lotario Sarsi Sigensano.* In un suo passo è scritto:

> La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo), ma non si puo' intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola.

L'anno dopo Galileo si recò nuovamente a Roma e fu ricevuto da Urbano; aveva in animo di informarsi con cautela anche sulle sue opinioni sulle tesi copernicane, ma non ottenne risposte precise. Tuttavia uscì dai colloqui con animo rinfrancato, riprendendo la battaglia interrotta nel '16. In risposta alla *Disputatio de situ et quiete terrae* in cui Francesco Ingoli intendeva confutare le teorie copernicane, scrisse una lettera che non venne né pubblicata né spedita, ma fu largamente diffusa tra gli amici di Galileo e venne fatta leggere allo stesso papa Barberini per saggiare fino a che punto la sua apertura in campo culturale concepisse una libera ricerca scientifica. La risposta parve abbastanza favorevole e Galileo iniziò a scrivere il *Dialogo dei massimi sistemi*, opera di grande ampiezza da pubblicare con la licenza della Autorità ecclesiastica. La stesura, piú volte interrotta per via di una infermità, venne infine terminata nel '30 e Galileo si recò nuovamente a Roma, anche per ottenere l'*imprimatur*. Comr formula iniziale Galileo scrisse:

> *Dialogo di Galileo Galilei, Linceo, matematico straordinario dello studio di Pisa e filosofo e matematico primario del Serenissimomo Gran Duca di Toscana. Dove ne' congressi di quattro giornate si discorre sopra i due Massimi Sistemi, Tolemaico e Copernicano; proponendo indeterminatamente le ragioni filosofiche e naturali tanto per l'una quanto per l'altra parte.*

Si trattava di un poderoso volume in italiano, a forma di dialogo, scritto a imitazione platonica in 4 giornate. Si confrontano 3 personaggi: Filippo Salviati (amico e discepolo di Galileo e suo portaparola copernicano, da poco deceduto), Francesco Sagredo (parimentiti legato a Galileo da grande amicizia e qui simbolicamente investito del ruolo di interessante e colto moderatore); Simplicio (immaginario alfiere della concezione aristotelico - tolemaica).

Nonostante apparenti concessioni allo "ipoteticismo" di Urbano, secondo cui le teorie di Tolomeo e di Copernico sarebbero solo ipotesi calcolatorie, prive di reale valore di verità, il Dialogo dei Massimi Sistemi era in effetti una serrata disamina per sostenere con argomenti logici ed empirici la superiorità del Copernicanismo come cosmologia corroborata razionalmente e fattualmente nei confronti del dogmatico geocentrismo e teleologismo peripatetico.

Nel Dialogo la materia è svolta secondo il coerente schema che segue. Prima giornata, confutazione della basilare presa della scienza tradizionale sulla eterogeneità del mondo celeste e terrestre; si adducono indizi atti a smentire l'inalterabilità e incorruttibilità dei cieli e ad attestare l' unità fisica del cosmo. Seconda giornata: il moto della terra elimina le cospicue obiezioni anti copernicane sulla base di considerazioni logiche ed empiriche: il principio di inerzia, la relativita' del moto e l'isocronismo pendolare. Terza giornata: rivoluzione intorno al sole: le osservazioni dei moti planetari, le fasi di Venere, i satelliti di Giove, le macchie solari consentono a Galileo, per bocca di Salviati, di mostrare che la dottrina aristotelica non corrisponde all'osservazione dei fenomeni astronomici e che il sistema eliocentrico è geometricamente e dinamicamente possibile. La Quarta giornata riguarda le maree (spiegazione sbagliata; era giusta invece quella kepleriana in termini di attrazione lunare, essenzialmente per via della diffidenza galileiana verso concezioni di attrazione, ritenute dotate di precipuo significato astrologico).

Ottenuta l'autorizzazione della Chiesa a condizione che nell'opera risultasse esplicitamente una posizione molto scettica relativamente alle teorie esposte, ammettendo che l'Artefice del mondo abbia potuto imporre alla natura tanto le tesi tolemaiche che quelle copernicane, Galileo pubblicò il 21 febbraio 1632 il Dialogo presso il tipografo G. B. Landini di Firenze.

Ma in luglio l'Inquisizione fiorentina emise l'ordine di sequestrare l'opera appena uscita. Il Papa Urbano VIII appariva fuori di sé: ma come, Galileo l'aveva preso in giro; e lui stesso, volendo fare il mecenate, l'aveva incoraggiato e si era posto tra l'uscio e il muro! Il successivo 1 ottobre l'Inquisitore di Firenze si recò da lui e gli intimò a nome del Santo Uffizio di presentarsi a Roma entro un mese. Galileo si ammalò e cercò di soprassedere ma il 19 novembre ricevette la seconda convocazione che dichiarava che in caso di ritardo un commissario, scortato da un medico, avrebbe condotto Galileo a Roma prigioniero e in catene.

Nel frattempo la posizione di Galileo era leggermente migliorata, mentre il tono del Papa si era un po' attenuato. Nel suo primo colloquio con Niccolini, il 5 settembre, il Papa aveva parlato della "piu' perversa materia che si potesse mai avere alle mani"; il 27 febbraio ebbe a dire "materia gelosa e fastidiosa, cattiva dottrina [....] fu mal consigliato [...] era stata una cismpolata cosí fatta. Anche il Santo Uffizio aveva incontrato difficoltà sul terreno del dogma; si sarebbe rifatto su quello politico.

Dopo 23 giorni di viaggio, compresa una penosa quarantena a Ponte a Centino, Galileo giunse all'ambasciata il 13 febbraio 1633; ricevette le cure sollecite della moglie dell'ambasciatore, Caterina Niccolini. Per alcune settimane vi restò formalmente indisturbato e ricevette visite ufficiose di prelati vicini all'Inquisizione. Galileo non sapeva niente dei dettagli del processo. Era indignato, battagliero e pronto ad affrontare il dibattito. Quando, l'8 aprile, Galileo fu informato di quanto l'attendeva, accolse la notizia con immenso coraggio: sarebbe stato di fronte a 10 cardinali obbligati ad ascoltare e ad intendere ragione. Vi è una grandezza tragica in questa speranza che egli conservò fino all'ultimo: la speranza di convincere quelle menti che egli avrebbe dovuto sapere essere immobili. Niccolini dovette dirgli ad un certo punto che le cose si sarebbero svolte diversamente, che Galileo era in grande pericolo di essere trattenuto e carcerato. Galileo ne uscì cosí trasformato che Niccolini temette per la sua vita.

L'11 aprile Galileo si rese presso il Sant'Uffizio e a partire dal 12 fu interrogato. Poiché il *Dialogo* era uscito con le autorizzazioni ecclesiastiche l'accusa che gli venne mossa ad un certo punto fu di non aver reso nota al censore l'ammonizione rivoltagli dal card. Bellarmino nel 1616. Nella fase finale fu accusato di aver volontariamente evitata la citazione di precetto, che egli non aveva mai avuto (solo Bellarmino aveva parlato della questione il 26 febbraio 1616, senza far apparire precetto alcuno). Ma a questo punto Galileo, stanco, infermo, sfiduciato e minacciato di tortura dovette ammettere il suo "errore". Nella mattina del 21 giugno si presento' di nuovo al Segretario e gli venne ancora chiesto di dire la verita', ché altrimenti si sarebbe venuti alla tortura. Galileo ripetè:

> Io son qua per far l'obedienza; e non ho tenuta questa opinione dopo la determinatione fatta, come ho detto.

Dopo quest'ultima risposta di Galileo si trova questa frase a conclusione del processo verbale:

> E siccome nulla piú si poteva ottenere in esecuzione del decreto gli si fece firmare la sua deposizione e venne rinviato alle sue stanze.

Il giorno seguente, mercoledı̀ 22 giugno, Galileo fu condotto sulla mula dell'Inquisizione alla grande sala del convento domenicano di Santa Maria sopra Minerva, nel centro di Roma, dove erano riuniti i cardinali del Santo Uffizio e oltre venti testimoni. Rivestito del camice bianco dei penitenti, si inginocchiò davanti ai giudici mentre gli veniva letta la lunga sentenza che terminava con queste parole:

> Ti condanniamo al carcere formale in questo S.to Off.o ad arbitrio nostro, e per penitenze salutari t'imponiamo che per tre anni a venire dichi una volta la settimana li sette salmi penitentiali; riservando a noi facoltà di moderare, mutare, o levar in tutto o parte le sodette pene e penitenze.
>
> Et cosí diciamo, pronuntiamo, sententiamo, dichiariamo, ordiniamo e reservamo in questo et in ogni altro meglio modo e forma che di ragione potemo e dovemo.

Dopo questa sentenza venne presentata a Galileo la formula della abiura. Galileo fece due eccezioni: che egli non dovesse mai dire di non essere cattolico, e che mai avesse ingannato nessuno nella pubblicazione del suo libro. Quindi pronunciò l'abiura, poi si levò e andoà firmarlo:

> Io Galileo Galilei sodetto ho abiurato, giurato, promesso e mi sono obligato come sopra, et in fede del vero, di mia propria mano ho sottoscritta la presente cedola di mia abiuratione et recitatala di parola in parola, in Roma, nel convento della Minerva, questo dì 22 Giugno 1633. Io Galileo Galilei ho abiurato come di sopra, mano propria.

Due giorni dopo, il venerdì, Galileo venne ricondotto dall'Ambasciatore alla Trinita' dei Monti. Dal 6 luglio passò a Siena, presso l'amico vescovo Ascanio Piccolomini. Lì comincio' a stendere le *Nuove Scienze*. In dicembre ottenne dal Papa il permesso di trasferirsi nella sua villa "Il Gioiello", ad Arcetri.

5.6 Gli ultimi anni.

Il 2 aprile 1634 morì ad Arcetri, nel convento di San Matteo, la figlia suor Maria Celeste che gli era stata sempre vicina, confortandolo nelle ore piú difficili, e con la quale aveva scambiato un voluminoso carteggio. L'anno dopo, a Leida, presso gli Elzeviri, venne pubblicata una edizione latina del *Dialogo dei Massimi Sistemi* tradotto da Mattia Bernegger.

Galileo, che continuava ad occuparsi dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e ai movimenti locali, con un'appendice del centro di gravità di alcuni solidi*, dedicati al Conte di Noailles, divenne completamente cieco alla fine del 1637. I *Discorsi* vennero pubblicati anche essi a Leida nel 1638, scritti in forma di dialogo tra Salviati, Sagredo e Simplicio in 4 giornate. Alcune parti frammentarie vennero trovate dopo la sua morte.

Le prime 2 giornate sono in italiano mentre la terza e la quarta contengono ampi passi latini del trattato *De motu locali* che Salviati attribuisce all'amico Accademico (Galileo stesso). Anche qui si trova una digressione su temi varii, senza che l'alto interesse scientifico e l'organicità sostanziale dell'opera siano pregiudicati; anzi, ne risulta una trattazione di straordinaria ricchezza intellettuale e di significato storico rivoluzionario. La resistenza dei materiali costituisce le due giornate iniziali dei Discorsi mentre la dinamica ne costituisce la seconda parte.

Prima giornata: si riflette sulla struttura della materia, sulla continuità, sulla indivisibilità, sull'atomo e il vuoto; si intravvede l'incipiente transizione della problematica dell'atomismo democroteo da pura congettura filosofica a ipotesi propriamente scientifica. Con motivazioni teoriche e di fatto sono sconfitte le tesi aristoteliche dell'impossibilità del movimento nel vuoto e della proporzionalità tra peso e velocità di caduta; si riprendono quindi le analisi delle leggi sulle oscillazioni pendolari insieme a considerazioni importanti di ottica e acustica.

La seconda giornata riguarda vedute archimedee e riconduce i diversi casi di resistenza dei materiali a combinazioni di leve. La statica viene applicata con argomentazioni geometriche.

La terza giornata è dedicata allo studio delle leggi del moto uniforme, del moto naturalmente e uniformemente accelerato o ritardato, con un geniale procedimento ipotetico deduttivo. Le postulazioni astratte iniziali sono stabilite matematicamente (con ricorso a "infiniti gradi di tardità") e sottoposte a controllo mediante noti esperimenti sui piani inclinati.

La quarta giornata è unita alle precedenti per argomento e per valore intrinseco; si compongono le traiettorie dei proiettili sulla base del principio della composizione dei movimenti. Si tratta di una indagine ipotetico deduttiva, scevra di remore aristoteliche, che rende comprensibile il moto "naturale" della caduta dei gravi e quello "violento" dovuto all'esplosione delle polveri da sparo, Essa dimostra teoricamente e conferma empiricamente che la traiettoria ha una struttura parabolica. Estremamente importante è infine la precisazione del principio di inerzia e il suo rapporto con il principio di relatività.

Nel 1640 Galileo scrisse la breve *Lettera sul candore della luna*. Colpito nel novembre 1641 da un attacco febbrile, Galileo morì ad Arcetri l'8 gennaio 1642.

Chapter 6

Newton.

6.1 Date.

Isaac Newton era nato il 25 dicembre 1642. Mor`ìil 20 marzo 1726 - 1727. Perché allora queste ambiguità? La risposta richiede una digressione sul calendario.

Come sanno gli appassionati di datazione, la riforma gregoriana del conteggio del tempo era entrata in funzione un certo giovedì 4 ottobre del 1582; il Papa aveva decretato che il giorno dopo era il venerdì 15 ottobre. Come questo sia avvenuto nei dettagli non lo so, bisogna chiederlo a quegli storici che ricostruiscono le vicende quotidiane della gente comune (nessuno riceveva lo stipendio a mese, e pochi si interessavano alla data; il giorno della settimana, dato fondamentale, non fu toccato e i santi vennero spostati in avanti in modo che la loro successione restasse immutata, con qualche inevitabile ritocco).

Ma gli Inglesi non avevano seguito l'esempio degli aborriti papisti. Cosí il loro Natale 1642, nascita di Isaac, era per i Cattolici il 4 gennaio 1643. Quindi la morte di Galileo (8 gennaio 1642, per gli Inglesi 29 dicembre 1641) non avvenne nello stesso anno della nascita di Newton, come qualcuno aveva sostenuto in un simbolico accostamento.

Fin qui niente di tanto strano: anche la rivoluzione d'ottobre è avvenuta il 7 novembre. Ma c'è di piú. Gli Inglesi di quel tempo cambiavano la numerazione dell'anno il 25 marzo. Per la verità qualcuno aveva delle incertezze e tra il 1^o gennaio e il 25 marzo spesso si usava la datazione doppia (cosí nel caso in questione la morte sarebbe avvenuta il 20 marzo 1726/27)[1]. Ad ogni modo, la morte di Newton per i Cattolici avvenne il....30 marzo 1727 diranno tutti aggiungendo 10 giorni. Invece no, il 31. Perché nel frattempo era passato l'anno 1700, bisestile per i Giuliani (e per gli Inglesi quindi) ma non per i Gregoriani. I giorni di discrepanza erano saliti dunque a 11 (dopo il 1900 furono 13, come sanno appunto gli interessati alle vicende russe del 1917; ma gli Inglesi avevano provveduto a mettersi in linea nel 1752, saltando dal mercoledí 2 settembre al giovedí 14, occasione di parecchie morti.).

La personalità di Newton è molto complessa; le sue pubblicazioni sono una piccola parte degli scritti che sono rimasti, una parte interessante scoperta nel secolo XX, molti tuttora non pubblicati[2].

[1] Questo metodo della doppia data è molto scomodo, come sanno quelli che facevano le scuole nel ventennio fascista, dove in piu' bisognava scrivere l'Era Fascista in odiatissime cifre romane.

6.2 I Principia.

Newton pubblicò nel 1687 il libro "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica". Non ne abbiamo una copia in biblioteca, il numero di copie che furono tirate in quella prima edizione era attorno a 300-350. Ma ho una riproduzione del frontespizio che forse vi interessa vedere. Si tratta di fotocopia da fac-simile. Vi mostro anche il frontespizio della traduzione in Inglese di Andrew Motte del 1729; è basato sulla terza edizione, quella del 1726, e naturalmente contiene lo Scholium Generale aggiunto da Newton alla seconda edizione, del 1712.

Nei "Principia" Newton prende a modello il trattato di Euclide: il libro è composto in maniera deduttiva, con proposizioni, dimostrazioni, discussioni e commenti. Benché Newton possedesse lo strumento del calcolo infinitesimale le dimostrazioni sono condotte con metodi geometrici.

La dinamica newtoniana ha alla base i concetti di spazio e di tempo, di cui in questa sede sottolineiamo alcuni punti di particolare importanza.

In Newton lo spazio ha due funzioni. È il quadro nel quale si situano gli eventi (il punto materiale, concetto alla base della meccanica newtoniana, è caratterizzato dalla massa e dalla posizione nello spazio). Ma lo spazio determina anche un sistema di riferimento assoluto, quello nel quale le forze sono "non apparenti"[3]. Lo spazio dunque è indipendente dalla materia che può contenere (si può pensare a contenuti diversi) e possiede la fondamentale proprietà fisica di discriminare le forze vere da quelle apparenti. Nello spazio assoluto le forze agenti sono vere, mentre nei sistemi in moto accelerato rispetto allo spazio assoluto sono presenti forze apparenti.

Analogamente per il tempo: non e' permesso usare senza conseguenze tempi allungati in certe parti e accor-

[2] La biografia piu' recente di Newton e' R. Westfall, Never at Rest, trad. italiana 19.., che raccomandiamo di consultare se si vuole avere un'idea attuale della sua complessa personalità.

[3] Come diciamo in altra sezione, i sistemi in moto uniforme rispetto allo spazio assoluto sono indistinguibili dal punto di vista delle leggi del moto. Tuttavia lo spazio assoluto permette di eliminare ogni altra discussione, e di questo c'è un gran bisogno nel 1687.

ciati in altre, come una specie di elastico. Il tempo vero è uno, e le leggi del moto valgono per quel tempo: un corpo isolato si muove di moto uniforme in quel tempo. Usando il tempo assoluto e lo spazio assoluto le accelerazioni sono causate dalle vere forze, anzi, secondo l'equazione fondamentale del moto, sono proporzionali ad esse: il coefficiente di proporzionalità è la quantità di materia. Inoltre, poiché forze, quantità di materia e accelerazioni restano le stesse per due sistemi in moto relativo uniforme, l'equazione del moto scritta senza forze apparenti vale in ogni sistema in moto uniforme nello spazio assoluto.

Naturalmente la separazione tra spazio e tempo è la stessa per tutti i sistemi di riferimento.

Lo spazio e il tempo sono dunque due entità postulate che sono componenti autonome della rappresentazione della realtà fisica. L'altra fondamentale entità è la materia, la quale ha la proprietà dell'inerzia ed è caratterizzata da una certa massa in un certo punto dello spazio ad un dato istante del tempo. La scena è ora completa: lo spazio è il quadro e garantisce la realtà delle forze, la materia in questa cornice si muove nel tempo secondo le forze.

Newton pone Dio a fondamento dello spazio, sia vuoto che pieno, e del tempo. Dio è dovunque e sempre in modo esplicito, non come metafora. Lo spazio e il tempo sono *sensorium Dei*[4].

La formalizzazione è stata realizzata postulando quanto era necessario e rinunciando a quant'altro fosse inutile: per esempio, ad una concezione di cosmo unitario, concluso, finito e significativo, che magari avesse cause e principii geometrici per spiegare l'intera struttura del mondo. Tutto questo viene rimosso. E con questi concetti viene rimossa anche ogni gerarchia e ogni ordine che non provengano dai nuovi, appunto, principii matematici.

La concezione di spazio e tempo dotati di esistenza propria, ontologicamente indipendenti dalla materia, giunge a Newton dalla scuola platonica di Cambridge. Noi siamo abituati alla concezione in cui la geometria precede la fisica (spazio indipendente e idealmente precedente la materia). Ma bisogna riflettere un momento sul cambiamento operato da questa concezione rispetto alla fisica aristotelica: si pone il problema dello spazio vuoto. Che cosa lo definisce? Come può esistere uno spazio senza che un corpo esistente lo occupi? Leibniz e la sua scuola razionalista criticheranno questa concezione, considerata metafisica; ma questa è la concezione dello spazio e del tempo che tuttora usiamo. Si dice che in Relatività Generale lo spazio e il tempo abbiano una metrica dipendente dalla materia; ma la materia modifica le proprietà metriche dello S-T, non ne determina le dimensioni e la segnatura, che tra l'altro distingue la coordinata temporale da quelle spaziali.

[4]Nella filosofia del '600 veniva chiamato Sensorium l'organo nel cervello dove l'informazine proveniente dai sensi viene raccolta e percepita dall'anima immateriale.

6.3 I vortici di Cartesio.

Una parte dei Principia è dedicata all'esame dell'ipotesi fisica di Cartesio (René Descartes, 1596 - 1650), secondo il quale l'attrazione è una conseguenza del moto di vortici di materia sottile che compenetra tutti i corpi.

Alla base della concezione di Descartes stava il dualismo nella concezione del mondo, la separazione tra le operazioni dello spirito, libere, e le regole della natura che segue rigidamente e senza alcuna libertà leggi meccaniche di azione a contatto (l'unica libertà risiede nella mente umana che però non costituisce un principio attivatore della natura; spetta al Creatore l'avviamento, ottenuto imprimendo movimento, e il sostegno della natura).

Nella spiegazione cartesiana "meccanica" del mondo, la materia era stata creata da Dio e posta in movimento. Del tutto inerte, a parte l'impulso iniziale, la materia era il regno della necessità. Essa era stata creata inizialmente nella forma di cubi, che sono la piú semplice figura geometrica. Gli angoli dei cubi poi si smussarono producendo una sorta di limatura, e i cubi si ridussero a sferette (secondo elemento, materia luminifera). La limatura forma il primo elemento (materia luminosa), la cui agitazione costituisce la luce che si trasmette attraverso le piccole sfere del secondo elemento. La limatura si riunisce anche in agglomerati a forma di viti, o scanalature, capaci di colmare i vuoti tra le particelle del secondo elemento e anche di agglomerarsi tra loro per formare il nucleo di materia che costituisce la Terra e i pianeti. Il Sole e le altre stelle fisse sono circondati da enormi vortici composti di materia dei due primi elementi (luminosa e luminifera). I pianeti, circondati ciascuno a sua volta da un vortice minore, galleggiano in questi vortici. Per esempio il vortice terrestre va diciassette volte piú veloce della Terra e quindi possiede una forza centrifuga assai maggiore che di conseguenza respinge tutti i corpi lenti verso la Terra che li trascina intorno al Sole. La finitezza e la stabilità dei vortici sono dovute all'azione dei vortici contigui, e le forze centripete che trattengono nell'orbita i pianeti sono, per Descartes, dovute ai vortici; cosí anche la gravità terrestre è dovuta al suo vortice.

Il vuoto in questa concezione meccanica non trova posto. L'universo è completamente pieno delle diverse materie originate dalla materia cubica iniziale. Né trovano posto agenti occulti: gli eventi materiali (cioé, a parte l'attività spirituale umana) sono i prodotti necessari di processi fisici rigidamente determinati.

Idee di questo genere (a parte la non esistenza del vuoto) sono condivise anche dagli atomisti del tempo (ricordare Pierre Gassendi). Per tutti costoro la natura è composta da una sola materia, che può assumere differenti forme e grandezze; le differenti parti di essa possono interagire solo per contatto. Quanta saggezza solo apparente in questo programma di meccanicismo! e quanto lontane sono queste concezioni dalla scienza di Newton!

D'altra parte, alternativamante alla spiegazione di Cartesio vi erano altri "modelli fisici" per spiegare la gravità. Descartes aveva bandito attrazione e vuoto.

La parola "attrazione" fu molto spesso usata da quanti si occupavano di magnetismo per descrivere la "virtù" con la quale il magnete attrae il ferro. Gilbert, nel 1600, adoperava per il magnetismo il termine "coitio" (coesione, tendenza all'unione). Keplero prese in prestito il termine "attrazione" proprio dal magnetismo, per rappresentare la gravità come una forza magnetica inerente ai corpi che si respingono o si attraggono come i magneti. Per essa la Terra attrae i corpi (Keplero era in dissenso da Copernico, per il quale i corpi terrestri e planetari erano "animati" da una certa tendenza a unirsi).

Si capisce da queste rapidissime osservazioni perché Cartesio ritenesse di aver dato una spiegazione meccanica della gravità. Si comincia a comprendere anche quale strano impatto abbia costituito la visione newtoniana.

Newton sottopose a analisi matematica e geometrica questa teoria, dimostrando che in nessun modo si poteva accordare con la fenomenologia. Il vortice della Terra perderebbe a poco a poco il movimento; se la Terra galleggiasse nel vortice, dovrebbe averne la stessa densità. Esiste il vuoto e l'aria pesa. E Infine e' impossibile accordare questa descrizione con le leggi di Keplero, né il moto sull'ellisse avviene con le velocità previste dai vortici.

Nel Libro II (Scolio alla Sez. 9) cosí Newton conclude la discussione sull'impossibilità dei vortici cartesiani:

> È infine evidente che i pianeti non sono portati in giro da vortici corporei; infatti, secondo l'ipotesi *Copernicana*, i pianeti ruotano intorno al Sole in ellissi di cui il Sole sta nel fuoco comune; e i raggi diretti verso il Sole descrivono aree proporzionali ai tempi. Ma le parti dei vortici non possono mai ruotare in questo modo.

Segue l'analisi dettagliata del moto in un vortice che prova l'incompatibilità del moto cartesiano con le leggi di Keplero.

6.4 La matematizzazione della gravità: "Non faccio ipotesi".

La concezione delle forze newtoniane deriva dalla statica: la forza è un agente fisico, ubbidisce alla regola del parallelogramma, le forze (non le accelerazioni!) si sommano, vale il principio di azione e reazione. Nella statica le forze risultanti si annullano. In generale se le forze applicate non si fanno equilibrio la loro applicazione produce una accelerazione la cui entità è inversamente proporzionale ad un coefficiente caratteristico del corpo che Newton individua come la quantità di materia (la massa).

(La teoria della composizione e dell'equilibrio discende in ultima analisi dal mondo degli artigiani e dei costruttori cui tanto deve Galileo, non certo dalle "cause" della fisica aristotelica.)

Dopo aver stabilito le proprietà dello spazio e del tempo Newton enunciò le leggi fondamentali della dinamica. Con l'ausilio dei concetti di spazio assoluto e di tempo assoluto dotati di proprietà fisiche ha senso affermare che nello spazio assoluto un corpo non soggetto a forze si muove di moto uniforme. Infatti Newton riteneva di conoscere le forze: sono trazioni, spinte che ubbidiscono alla legge di composizione (sono vettori, diciamo oggi). Ma c'è di piú. Sono forze che ubbidiscono a leggi matematiche, per esempio le forze costanti o quelle elastiche (o di gravita', come vedremo tra un istante). E proprio l'espressione matematica delle forze riempie di significato la legge fondamentale della dinamica, $F = ma$. Essa non è una tautologia ma una equazione che lega tre quantità definite in modo diverso e per questo è l'equazione fondamentale della dinamica.

Dalle forze tangibili Newton passò rapidamente alla gravità di cui egli era in grado di dare soltanto la legge matematica. Nel libro I dei Principia, dopo aver provato le proprietà generali delle forze centripete che sono inversamente proporzionali al quadrato della distanza, la discussione si conclude con questo Scolio:

> Queste Proposizioni ci conducono naturalmente all'analogia che esiste tra le forze centripete e i corpi centrali verso i quali queste forze sono di solito dirette; infatti e' ragionevole supporre che forze che sono dirette verso certi corpi devono dipendere dalla natura e dalla quantità di questi corpi, come vediamo che accade negli esperimenti magnetici. E quando questo casi avvengono dobbiamo calcolare le attrazioni dei corpi assegnando a ciascuna delle sue particelle la propria forza e trovando poi la somma totale. Io qui uso la parola *attrazione* in genere per una tendenza qualsiasi dei corpi ad avvicinarsi, sia che la tendenza insorga dall'azione dei corpi stessi tendenti uno all'altro o in agitazione reciproca per mezzo di spiriti emessi; o se abbia origine dall'azione dell'etere, o dell'aria, o di qualsiasi mezzo, vuoi corporeo o incorporeo, che in qualche maniera obblighi i corpi in esso posti a muoversi uno verso l'altro. Nello stesso senso generale uso la parola *impulso*, senza definire in questo trattato la specie o le qualità fisiche delle forze, ma studiando le loro quantità e proporzioni matematiche; come ho osservato prima nelle Definizioni. In matematica dobbiamo investigare le quantità delle forze con le loro proporzioni in conseguenza delle condizioni supposte; poi, quando si entra nel campo della fisica, paragoneremo quelle proporzioni con i fenomeni della Natura, in maniera da sapere quali condizioni di quelle forze rispondano ai diversi generi di corpi attrattivi. E fatti questi preparativi potremo argomentare con maggiore sicurezza sulle specie fisiche, sulle cause e sulle proporzioni delle forze. Vediamo di trovare adesso con quali forze i corpi sferici composti da particelle

dotate di poteri attrattivi nel modo descritto devono agire uno con l'altro; e che genere di moto ne consegue.

Newton separa dunque la descrizione matematica delle forze dalla discussione della loro natura fisica. Questo è il senso in cui Newton disse "Hypotheses non fingo": non aveva spiegazioni per la legge della forza.

6.5 Lo Scholium Generale.

È interessante riportare il testo dello Scholium Generale che conclude la seconda edizione dei Principia. Newton comincia riassumendo gli argomenti contro i vortici cartesiani.

> L'ipotesi dei vortici è piagata da molte difficoltà. Se per ogni pianeta il raggio che lo congiunge al Sole possa descrivere aree proporzionali ai tempi, i tempi periodici delle varie parti dei vortici dovrebbero osservare la proporzione duplicata delle loro distanze dal Sole. Ma se i tempi periodici dei pianeti devono seguire la sesquiplicata [proporzione T^2/R^3] proporzione delle loro distanze dal Sole, i tempi periodici delle parti del vortice dovrebbero stare in proporzione sesquiplicata alle loro distanze. Se i vortici minori [quelli responsabili del moto dei satelliti] possono mantenere le loro minori rivoluzioni intorno a Saturno, Giove, e agli altri pianeti, e navigare tranquillamente e indisturbati nel vortice maggiore del Sole, i tempi periodici delle parti del vortice del Sole dovrebbero essere uguali. Ma le rotazioni del Sole e dei pianeti intorno ai loro assi, che dovrebbe corrispondere al moto dei loro vortici, sono ben lontane da queste proporzioni. I moti delle comete sono perfettamente regolari, sono governati dalle stesse leggi del moto dei pianeti, e non possono in alcun modo essere spiegati dall'ipotesi dei vortici. Infatti le comete sono trasportate con moto molto eccentrico attraverso tutte le parti del cielo indifferentemente, con una libertà che è incompatibile con la nozione di un vortice.
>
> I corpi proiettati nell'aria non soffrono alcuna resistenza se non dell'aria. Togliamo l'aria, come avviene nel *vuoto* del signor Boyle, e la resistenza cessa. Infatti nel vuoto una piumetta leggera e un pezzo di oro solido discendono con velocità uguale. E la parità di ragione deve accadere negli spazi celesti al di sopra della atmosfera terrestre; in questi spazi in cui non c'è aria che si opponga al moto tutti i corpi si muovono con la massima libertà; e i pianeti e le comete continueranno costantemente le loro rivoluzioni in orbite date, in tipo e in posizione, dalle leggi spiegate sopra.

Ma Newton ora cambia argomento. Un conto sono le leggi della meccanica, un conto diverso la disposizione del sistema solare, che mostra l'opera di un artefice. Il discorso prende tutt'altra impronta.

> Ma sebbene questi corpi possano perseverare nelle loro orbite semplicemente per via delle leggi della gravità, tuttavia essi non possono in alcun modo aver ottenuto all'inizio le posizioni regolari delle stesse orbite da quelle leggi [le condizioni iniziali].
>
> I sei pianeti primari ruotano intorno al Sole, in cerchi concentrici al Sole, e con moti diretti verso le stesse parti [nella stessa direzione] e quasi nello stesso piano. Dieci Lune girano intorno alla Terra, a Giove e a Saturno, su cerchi concentrici, con le stesse direzioni del moto e quasi nei piani delle orbite di quei pianeti. Ma non si può concepire che cause puramente meccaniche possano dar luogo a moti cosí regolari: infatti le comete si muovono per tutte le parti del cielo, in orbite molto eccentriche. Con quel genere di moto esse si spostano facilmente attraverso gli orbi dei pianeti, e con grande rapidità; e nei loro afelii, dove si muovono piu' lentamente, e si trattengono piu' a lungo, recedono ad una enorme distanza reciproca e subiscono quindi un disturbo minimo dalla loro attrazione reciproca. Questo sistema immensamente bello del Sole, dei Pianeti e delle comete, può procedere soltanto dal disegno e dal potere di un essere intelligente e potente. E se le stelle fisse sono centri di sistemi simili, anch'essi formati da simile saggio disegno, devono essere tutti soggetti al potere di Uno; specialmente, perché la natura della luce delle stelle fisse è la stessa di quella solare, e da ogni sistema la luce passa in tutti gli altri sistemi. E per impedire che i sistemi delle stelle fisse possano, per la loro gravità, cadere mutuamente uno sull'altro, Egli ha posto questi sistemi ad immense distanze tra loro.

Chi dunque e' l'architetto? Newton prosegue:

> Questo Essere governa tutte le cose, non come l'anima del mondo ma come il Signore di tutto: e per via del suo dominio egli deve essere chiamato *Il Signore Dio Pantocrator* [in greco], ovvero *Reggitore Universale*. Perché *Dio* è una parola relativa rispetto ai servi; e *Deità* è il dominio di *Dio*, non sul proprio corpo, come immaginano coloro che immaginano *Dio* come l'anima del mondo, ma sui servi. Il Dio supremo è un Essere eterno, infinito, assolutamente perfetto; ma un essere per quanto perfetto, senza dominio non può dirsi essere il *Signore Iddio*; perché noi diciamo, mio Dio, tuo Dio, il Dio di Israele, il Dio degli Dei, e il Signore dei Signori; ma noi non diciamo il mio Eterno, il tuo Eterno, l'Eterno di Israele, l'Eterno degli Dei; non diciamo il

mio Infinito, né il mio Perfetto: questi sono titoli che non hanno connessione con i servi. La parola *Dio* significa di solito *Signore*; ma non ogni Signore è *Dio*. E' il potere di un Essere spirituale che costituisce un Dio; un vero, supremo o immaginario potere costituisce il vero, supremo o immaginario Dio. E dal suo vero potere segue che il vero Dio è un Essere Vivente, Intelligente e Potente; e dalle sue altre perfezioni, che è Supremo o il Piú Perfetto. Egli è Eterno ed Infinito, Onnipotente ed Onnisciente; cioé, la sua durata va dall'Eternità all'Eternità; la sua presenza dall'Infinito all'Infinito; egli governa tutte le cose, e sa tutte le cose che sono o che possono essere. Egli non è l'Eternità o l'Infinito, ma è Eterno ed Infinito; non è la Durata o lo Spazio ma dura ed è presente. Egli dura per sempre, ed è presente ovunque; ed esistendo sempre e dovunque, egli costituisce la Durata, e lo Spazio. Poiché ogni parcella di Spazio è *sempre*, e ogni momento indivisibile di Durata è *ovunque*, certo Il Fattore e Signore di tutte le cose non può essere *mai* né *in nessun posto*. Ogni anima che ha percezione è, sebbene in differenti tempi e in differenti organi di senso e di moto, ancora la stessa persona indivisibile. Ci sono parti successive nella durata, parti co-esistenti nello spazio, ma né l'una nè l'altra nella persona di un uomo o nel suo principio pensante; e molto meno esse possono essere trovate nella sostanza pensante di Dio. Ogni uomo, nella misura in cui ha percezione, è uno e lo stesso uomo durante l'intera vita, in tutti e ognuno i suoi organi di senso. Dio è lo stesso Dio, sempre e dovunque. Egli è onnipresente, non solo *in linea di principio*, ma anche *in realtà*; perché il principio non può sussistere senza realtà. In lui sono tutte le cose contenute e mosse; ma esse non lo cambiano: Dio non è cambiato per nulla dal moto dei corpi; i corpi non sentono resistenza dalla presenza di Dio. Tutti ammettono che il supremo Iddio esiste necessariamente; e con la stessa necessità egli esiste *sempre e dovunque*. Per cui egli tutto pervade, è occhio, orecchio, mente, braccio, potere di percepire, di capire, di agire; ma in una maniera per niente corporea, in una maniera del tutto sconosciuta a noi. Come un cieco non ha idea dei colori, cosí non abbiamo idea del modo in cui il saggissimo Dio percepisce e comprende le cose. Egli è totalmente privo di corpo e di figura corporea, e quindi non può essre visto, ne' sentito, né toccato; e non deve essere adorato sotto rappresentazione di alcuna cosa corporea. Noi abbiamo un'idea dei suoi attributi ma non sappiamo quale sia la reale sostanza. Dei corpi vediamo solo le figure e i colori, udiamo solo i suoni, tocchiamo solo le superfici esterne, percepiamo gli odori e sentiamo il gusto; ma le loro sostanze interne non sono note né con i sensi né con alcun atto riflesso della mente; ancora meno possiamo avere un'idea della sostanza divina. Noi lo conosciamo soltanto dalla sua saggissima ed eccellentissima composizione delle cose e dalle cause finali; lo ammiriamo per la sua perfezione; lo riveriamo e l'adoriamo per via del suo dominio. Infatti lo adoriamo come servi; e un Dio senza dominio, porovvidenza e cause finali non è altro che Fato e Natura. Una cieca necessità metafisica, che sarebbe certo la stessa sempre e dovunque, non potrebbe produrre la varietà delle cose. Tutta quella diversità di cose naturali che troviamo, adattata a tempi e luoghi differenti, può aver origine soltanto dalle idee e dal volere di un Essere che esiste necessariamente. Ma per allegoria si dice che Dio vede, che parla, che sorride, che ama o odia, che desidera, che dà, che riceve, che si rallegra, che si adira, che combatte, che trama, che lavora e costruisce. In effetti tutte le nozioni di Dio sono tratte dagli usi del genere umano, da una certa similitudine che, benché non perfetta, ha qualche somiglianza. E cosí via per quanto concerne Dio; di cui, discutere dall'apparenza delle cose appartiene certamente alla filosofia naturale.

Adesso riprende il discorso sulla gravità con il famoso "Hypotheses non fingo":

> Fin adesso abbiamo spiegato i fenomeni dei cieli e del nostro mare [le maree] per mezzo del potere della gravità, ma non abbiamo ancora definito la causa di questo potere. È certo che essa deve procedere da una causa che penetra fino proprio al centro del sole e dei pianeti senza soffrire la minima diminuzione della sua forza; che opera, non secondo la quantità delle superfici delle particelle su cui opera (come abitualmente facevano le cause meccaniche) ma secondo la quantità di materia solida che essi contengono, e propaga la sua virtu' in tutte le direzioni a distanze immense, decrescendo sempre come l'inverso del quadrato delle distanze. La gravitazione verso il sole è costituita dalle gravitazioni verso le molte particelle di cui è composto il corpo del sole; e nell'allontanarsi dal sole recede precisamente come l'inverso del quadrato delle distanze fino all'orbita di Saturno [ultimo pianeta noto], come è evidentemente manifesto dalla quiescenza dell'afelio dei pianeti; no, perfino dal piu' remoto afelio delle comete, se anche quegli afelii sono quiescenti. Ma finora non sono riuscito a dedurre dai fenomeni la causa di questa proprietà della gravità, e non immagino ipotesi [hypotheses non fingo]. Tutto ció che non si deduce dai fenomeni va infatti chiamato ipotesi e nella filosofia sperimentale

> non trovano posto le ipotesi, sia metafisiche che fisiche, sia di qualità occulte, sia meccaniche. In questa filosofia proposizioni particolari vengono desunte dai fenomeni e quindi rese generali con l'induzione. È cosi' che furono scoperte l'impenetrabilità , la mobilità e le forze impulsive dei corpi [le leggi dell'urto], e le leggi del moto e della gravitazione. E per noi è sufficiente che la gravità esiste realmente ed agisce secondo le leggi che abbiamo spiegato, e serve abbondantemente a rendere conto di tutti i moti dei corpi celesti, e del nostro mare.

6.6 La materia.

È interessante osservare che le righe successive, che chiudono i Principia, accennano alla struttura della materia, argomento cui Newton dedicò pensiero e osservazioni ma su cui non raggiunse mai certezze paragonabili a quelle sulla dinamica, sul sistema del mondo e sull'ottica:

> E adesso potremmo aggiungere qualcosa riguardo un certo sottilissimo spirito che pervade i corpi macroscopici e vi risiede; per la forza ed azione di questo spirito le particelle dei corpi si attraggono a vicenda a breve distanza e hanno coesione, se contigue; e i corpi elettrici operano a distanze maggiori, e respingono o attraggono i corpuscoli vicini; e la luce è emessa, riflessa, rifratta, inflessa, e riscalda i corpi; e ogni sensazione viene eccitata, e le membra dei corpi animali si muovono al comando della volontà, cioè per le vibrazioni di questo spirito si propagano mutuamente lungo i filamenti nervosi solidi, dagli organi esterni dei sensi al cervello e dal cervello ai muscoli. Ma queste son cose che non possono essere spiegate in poche parole, né noi siamo dotati di quella sufficienza di esperimenti che è richiesta per una determinazione accurata e dimostrazione delle leggi con cui questo spirito elettrico ed elastico opera.

David Gregory (1659-1708) giovane matematico scozzese che frequentò Newton, lasciò una nota[5]:

> Il suo dubbio era se dovesse porre l'ultima Questio cosi': *Di che cosa è riempito lo spazio che è privo di corpi.* La pura verità è che egli ritiene che Dio sia onnipresente nel senso letterale; E che come noi siamo sensibili agli Oggetti quando le loro Immagini ci sono portate all'interno del cervello, cosi Dio deve essere sensibile ad ogni cosa; infatti egli ritiene che come Dioè presente nello spazio in cui non vi è alcun corpo, cosi' è presente nello spazio in cui è presente un corpo. Ma se questo modo di proporre questa sua nozione fosse troppo audace, egli ritiene di fare cosi'. *Quale causa gli antichi assegnavano per la gravità.* Egli ritiene che essi attribuivano a Dio la causa, niente di meno; nessun corpo essendo la causa poiché tutti i corpi sono pesanti.

Nel 1672/73 Newton ebbe una corrispondenza col teologo Richard Bentley. Bentley era entusiasmato dalla fisica newtoniana e dalla gravità che tendeva ad interpretare come una emanazione o forza divina.

Newton risponde alle domande poste dal teologo. Riafferma che la costituzione del Sole e del sistema solare rivela un disegno divino, mentre l'inclinazione dell'asse terrestre, che provoca le stagioni, non è altrettanto significativa. Commenta poi il caso di un universo con materia diffusa, finito ed infinito e, discutendone le instabilità, risponde a Bentley spiegando che in un universo infinito ed omogeneo basta una perturbazione a cambiarne la struttura. La seconda lettera (17 gennaio 1692/93) dice tra l'altro:

> In secondo luogo io non conosco alcun potere nella natura che possa causare questo moto trasverso [dei pianeti intorno al Sole; si parla sempre delle condizioni iniziali] senza il braccio divino.

Newton prosegue spiegando le ragioni dell'innaturalezza delle condizioni iniziali del sistema. Le abbiamo già trovate nello Scholium Generale. Infine in chiusura dice:

> Lei talvolta parla della gravità come essenziale e inerente alla materia: La prego di non attribuirmi quella nozione, perché la causa della gravità io non pretendo di conoscere, e quindi la sua considerazione prenderebbe piu' tempo [si riferisce a quanto affermato nello Scholium Generale].

Nella quarta lettera (25 febbraio 1692/93) Newton commenta cosi' la questione delle cause della gravità:

> Mi piace molto l'ultima parte della Sua seconda Affermazione.
>
> E' inconcepibile che la materia bruta inanimata debba (senza la mediazione di qualcosa altro che sia non materiale) operare su altra materia senza mutuo contatto; come deve se la gravitazione nel senso di Epicuro e' essenziale ed inerente in essa. E' questa la ragione per cui non desidero che Lei attribuisca a me il concetto di gravità innata. Che la gravità debba essere innata inerente ed essenziale alla materia in modo che un corpo possa agire a distanza attraverso il vuoto senza la mediazione di alcunche' per il cui mezzo e attraverso cui l'azione o la forza possa essere trasportata dall'uno all'altro e' per me

[5] Vedere J.B Cohen and R.S. Westfall, Newton, Norton Critical Edition 1995 p.329.

un'assurdità cosi' grande che ritengo che nessuno che abbia nelle questioni filosofiche una facoltà competente di pensiero possa giammai caderci. La gravità deve essere causata da un agente che agisce costantemente secondo certe leggi, ma che questo agente sia materiale o immateriale e' una questione che ho lasciato alla considerazione dei miei lettori.

E ancora, nella Query aggiunta alla seconda edizione dell'Opticks, del 1717, Newton chiarisce il suo pensiero profondo:

> Considero questi principii [gravità, fermentazione o azioni chimiche e coesione] non come qualità occulte che si suppone risultino da forme specifiche di cose, ma come leggi generali della natura, dalle quali le cose stesse sono formate e la cui verità ci appare attraverso i fenomeni, benché le loro cause non siano ancora scoperte. Poiché queste sono qualità manifeste, e soltanto le loro cause sono occulte. [...] Dire che ogni specie di cose è dotata di una qualità occulta specifica in virtù della quale esse agiscono e producono effetti manifesti equivale a non dire nulla: ma derivare due o tre principii generali del moto dai fenomeni e dire poi come le proprietà e azioni di tutte le cose corporee seguano da tali principii manifesti sarebbe un grande passo avanti in filosofia, anche se le cause di tali principii non fossero ancora scoperte; perció non ho scrupoli a proporre i principii del moto menzionati sopra, i quali hanno una portata molto generale, e lascio ad altri l'incarico di scoprirne le cause.

Affermazioni, come si vede, molto realistiche. Newton non sbandiera alcun positivismo o empirismo pratico: sta discutendo fatti reali, ne ha compreso le leggi matematiche, ma non conosce le cause meccaniche del comportamento della gravità. E non fa, come qualcuno potrebbe credere, una difesa della conoscenza puramente descrittivo - matematica. Le cause, semplicemente, non gli sono note.

6.7 Newton e la Fisica.

Agli occhi dei filosofi continentali contemporanei l'incapacità di fornire la causa fisica della gravità costitui' un regresso. Parve a chi si occupava dall'esterno di queste questioni che Newton introducesse forze occulte a distanza, e quindi la sistemazione newtoniana fu vista da costoro come una forma di oscurantismo.

In realtà dopo Newton, portato dal suo rigore e dalla volontà di sistemare i fatti sperimentali significativi a dare una sistemazione matematica, si spostano i significati delle parole "conoscere" e "capire". La fisica ha preso proprio la strada di Newton, quella della matematizzazione della scienza e della geometrizzazione dello spazio (e del tempo).

Ci sono, in questa storia newtoniana, molte lezioni da apprendere sul modo di procedere della scienza moderna. Lo scienziato è interessato alla reale descrizione e previsione in termini quantitativi; crede fermamente nella razionalità del mondo esterno e cerca le cause e le descrizioni che permettono di classificare e prevedere i fenomeni. Certamente non lancia proclami di metodo, che agli occhi dello scienziato non servono gran che per far progredire la conoscenza del reale. E ciò vale anche se le convinzioni personali della persona in questione nei riguardi dell'oggettività, in senso filosofico, del mondo son le più varie: lo scienziato si comporta sempre come se il mondo fosse esterno, comprensibile razionalmente ma rigido, che cede le sue leggi a chi si accosta con intelligenza e con pazienza cerca di comprenderne la logica.

6.8 La materia per Newton.

A sua volta la materia e' costituita da atomi eguali e da interstizi, pori vuoti. Il vuoto esiste, anzi la maggior parte dei corpi e' vuota. Nel 1777 Joseph Priestley scrisse [6]:

> Non appena furono noti i principii della filosofia newtoniana si comprese quanto poco, rispetto ai fenomeni della natura, fosse dovuto alla *materia solida* e quanto invece alle *potenze* [...] E' stato affermato che [...] tutta la materia solida dell'universo potrebbe essere racchiusa in un guscio di noce.

Newton dedicò molti studi alla struttura della materia. In parte si trovano nel trattato di Ottica che fu stampato nel 1704, ma per la maggior parte non furono pubblicati proprio perché Newton non giunse ad un risultato che soddisfacesse il livello di certezza che gli pareva necessario per giungere ad una conclusione. Pur senza addentrarci nella epistemologia di Newton dobbiamo sottolineare che la sua modernità, più che nelle sue concezioni, sta proprio nel rigore dei controlli cui sottopose le teorie prima di poterle accettare con sicurezza. Esempi di questo modo di procedere sono proprio i due libri sui principii della meccanica (1787) e dell'ottica (1704).

Non possiamo discutere delle proprietà ottiche. Ricorderemo solo che nel corso dell'800 gli atomi differenziati della chimica sostituirono gli atomi indifferenziati del '700.

[6] Vedere A. Thackray, Atoms and Powers, Harvard Un. Press, Cambridge MA 1970.

Chapter 7

La fisica dopo Newton.

7.1 Newtonianesimo e cartesianismo continentale.

I seguaci di Newton accettarono immediatamente la sua attrazione come una proprietà fondamentale della materia, senza piú porsi domande sulle cause. Cosí l'attrazione newtoniana conquistò validità reale rapidamente, almeno in Inghilterra. Da questa situazione risultò (temporaneamente) un totale divorzio tra la concezione del mondo diffusa tra gli scienziati inglesi e i continentali nella prima parte del Settecento. È divertente ricordare cosa scrisse Voltaire nelle sue Lettres Anglaises (1733):

> Un Francese che arriva a Londra trova le cose veramente cambiate, in filosofia come in tutto il resto. Ha lasciato il mondo pieno; lo trova vuoto. A Parigi, l'universo lo si vede composto di vortici di materia sottile; a Londra non si vede niente di tutto ció. Da noi, è la pressione della Luna che causa il flusso del mare; presso gli Inglesi è il mare che gravita verso la Luna, di modo che quando voi credete che la Luna dovrebbe darci l'alta marea, questi signori credono che dovrà esserci bassa marea; il che, sfortunatamente, non potrà essere controllato, dato che, per chiarire il problema, sarebbe stato necessario esaminare la luna e le maree al primo istante della creazione.
>
> Rileverete inoltre che il Sole, che in Francia non entra affatto in questa faccenda, qui vi contribuisce per circa un quarto. Per i vostri cartesiani, tutto avviene per un impulso che non si comprende affatto; secondo Newton, per un'attrazione di cui non si conosce meglio la causa. A Parigi, la Terra ve la immaginate fatta come un melone; a Londra, essa è appiattita ai due lati. La luce per un cartesiano esiste nell'aria; per un newtoniano, giunge dal Sole in sei minuti e mezzo. La vostra chimica fa tutte le operazioni con acidi, alcali e materia sottile; l'attrazione domina fin nella chimica inglese.
>
> L'essenza stessa delle cose è talmente cambiata da non potervi accordare né sulla definizione dell'anima né su quella della materia. Descartes afferma che l'anima e il pensiero sono la stessa cosa, Locke prova piuttosto bene il contrario.
>
> Descartes afferma ancora che la sola estensione costituisce la materia; Newton vi aggiunge la solidita'.

Spero che sia chiara la rottura che Newton provocò nella concezione meccanica del mondo. La favola meccanicista di Descartes non resse all'analisi quantitativa di Newton. Newton trovò la legge matematica della forza di gravità e non volle fare ipotesi; i successori dimenticarono la querelle meccanicista e accettarono come spiegazione la legge di Newton. Cambiò il significato della frase "spiegazione fisica".

7.2 Il Newtonianesimo dopo Newton.

La visione della fisica post-newtoniana, a sua volta chiamata meccanicismo, è fondata sul postulato della struttura dello spazio-tempo, sul postulato della materia costituita da particelle dotate di massa e soggetta alla equazione del moto, sulle forze e in particolare sulla legge della gravita'.

I postulati non si discutono: si giustificano sulla base dei risultati. E i risultati, sia quelli immediati di Newton che quelli derivati da tutta la scienza meccanica del Settecento, sono in pieno accordo con l'esperienza.

Cosí un altro spostamento di prospettiva si è compiuto: dopo Newton l'accento e l'interesse per la spiegazione del cosmo è cambiato. Nella concezione del sistema solare i dati fondamentali erano ora la legge dell'attrazione e le equazioni del moto, concetti matematici, mentre molte cose che prima erano giudicate importanti erano lasciate da parte, almeno per il momento. La struttura effettiva del sistema, il numero e la disposizione dei pianeti, erano considerati dati accidentali, pure condizioni iniziali. Venivano annullati i tentativi di spiegare globalmente la struttura come avevano tentato invece molti, compreso il primo Keplero del Mysterium Cosmographicum del 1596. Si trattava di un processo iniziato molti anni prima.

Col "De Revolutionibus..." di Copernico, pubblicato nel 1543 attraverso il parallasse dei pianeti si introducevano le dimensioni lineari del sistema solare e la visione cosmologica veniva disarticolata, introducendo spazi vuoti insensati e incomprensibili per i cosmologi del tempo. Questa sistemazione, di cui ora con Newton si comprende la causa, permette di portare alla perfezione la meccanica classica, sia per i risultati fisici che per gli sviluppi formali.

Naturalmente se Newton aveva fatto immensi progressi nel calcolo infinitesimale, la sua esposizione, nei Principia, era basata su argomenti geometrici. Ma tra gli sviluppi formali e i successi non c'è certo né il bisogno nè il desiderio di rivedere i principi: funzionano troppo bene e c'è troppo da fare. Semmai, i successi rafforzano le convinzioni.

Dopo Newton la considerazione delle "forze" si adegua rapidamente. Come abbiamo detto è cambiato il concetto. Dalla ricerca della "spiegazione" fisica si passa alla "legge matematica" come unica spiegazione dei moti. Con Lagrange si discutono le conseguenze fisiche, non i principii primi.

Sarebbe interessante allargare la rassegna del concetto di forza alla discussione settecentesca sulle forze che tengono unita la materia. La forza di gravità viene presa come esempio e punto di partenza per spiegare la repulsione tra corpi a distanze ravvicinate (dove sta un corpo non ce ne puo' stare un altro). Con l'aiuto della concezione atomistica (interazione tra corpi puntiformi) si genera una modellistica di leggi di forza dipendenti dalla distanza (Ruggero Boscovich, vedere il libro di Thackray) in cui non possiamo addentrarci qui.

7.3 Mezzi continui newtoniani.

Compare e si sviluppa, nel Settecento e nell'Ottocento, anche il concetto di campo: descrizione di un sistema continuo. Gli esempii non mancavano nella fisica, dalle velocità e densità in un fluido al calore e alle deformazioni in un mezzo elastico. Si tratta peró, almeno per la fluidodinamica e l'elasticità, di un concetto ausiliario che non cambia né allarga i postulati fondamentali della meccanica newtoniana. La descrizione di un sistema mediante il campo, funzione continua dello spazio, è considerato come una approssimazione: la costituzione fondamentale dei sistemi è sempre data dalle particelle newtoniane dotate di massa. I campi si producono solo nella materia ponderabile e descrivono in modo approssimato il comportamento di moltissime particelle contigue mediante l'approssimazione di rappresentarle come un sistema continuo nello spazio.

Resta il problema delle loro azioni reciproche, cioè della coesione e dei fenomeni chimici, ma è un problema lontano dagli interessi della fisica; cosìii anche la luce, per tutto il Settecento, resta al livello cui l'aveva lasciata Newton.

Da dove riparte il movimento che porterà in definitiva a immense novità tra l'altro nel concetto di campo, e cambierà la concezione dello spazio e del tempo?

Chapter 8

Il campo elettromagnetico.

8.1 Nuovi fenomeni in gioco.

Per allargare e cambiare il quadro delle grandezze fisiche sarà necessario conoscere una serie di nuovi fenomeni elettro magnetici. Sarà essenziale il concetto di campo elettro magnetico come nuova entità fondamentale a pari livello con le particelle newtoniane dotate di massa.

Nel Settecento inizia lo studio (talvolta salottiero) dei fenomeni elettrici; ma bisogna aspettare la fine del secolo perché Coulomb (1736-1806) formuli, negli anni 1785-89, la legge dell'attrazione e repulsione delle cariche elettriche, del tutto analoga alla legge gravitazionale. L'azione a distanza è ancora al centro della descrizione. E del resto Kant in un suo lavoro giovanile del 1747 non aveva suggerito che il numero di dimensioni spaziali fosse determinato dalla forma della legge di Newton? Se Dio avesse scelto una qualsiasi altra legge di potenza, la dimensionalità dello spazio sarebbe stata diversa (evidentemente Kant conosceva la geometria euclidea in N dimensioni).

Ma nell'Ottocento i progressi sono rapidi. E le novita' verranno sia dall'ottica che dai nuovi esperimenti che chiariscono la dinamica dei fenomeni elettrici e magnetici.

Ricordiamo che nei primi decenni dell'Ottocento era stata riconosciuta la natura ondulatoria della luce e la sua polarizzabilità. Ora, se la luce è un moto ondoso, deve esserci un mezzo sede della vibrazione. Ogni buon fisico esperto sui fenomeni ondosi (onde del mare, onde acustiche etc) non avrebbe dubitato un solo momento a interpretare la luce come la propagazione di un'onda trasversale in un mezzo meccanico: questo mezzo fu chiamato etere.

Ma l'etere luminifero dà problemi. La polarizzazione della luce è trasversale e ne segue che l'etere deve essere un corpo quasi rigido, le cui parti possono muoversi solo secondo le piccole oscillazioni che costituiscono appunto le onde luminose. Come si muovono i corpi ponderabili in questo mezzo? L'etere viene trascinato da quelli o resta immobile? L'esperimento fondamentale di Fizeau (1819-1896), nell'interpretazione di allora, mostró che l'etere entro un mezzo trasparente veniva trascinato solo parzialmente dal movimento del mezzo (oggi diremmo che Fizeau misurava un effetto dovuto alla contrazione relativistica di FitzGerald - Lorentz). È difficile immaginare un mezzo meccanico dotato di queste proprietà.

Ma pensiamo all'elettro magnetismo. Henry Faraday (1791-1867, tra i più grandi fisici sperimentali del secolo) sviluppó idee essenziali sul ruolo del mezzo nei fenomeni elettrici e magnetici. Studiando soprattutto l'induzione elettrica si era convinto che il punto di vista della azione a distanza era inadeguato per la descrizione di questi fenomeni, per via della funzione del dielettrico. Infatti l'induzione attraverso il mezzo isolante dipende dalla natura del mezzo; vi sono concomitanti fenomeni di polarizzazione; e le linee di induzione sono curve, in particolare quelle esistenti tra due corpi elettrizzati vengono modificate dalla presenza di altri corpi. Quindi il mezzo è un componente attivo del fenomeno. Ricordiamoci che fu Faraday ad introdurre i concetti di linee di forza e tubi di flusso, praticamente come li studiamo oggi nell'elettrostatica.

Faraday definí i criteri che distinguono l'azione a distanza da quella cui prende parte il mezzo e analizzó di conseguenza il comportamento dei fenomeni. Paragonando la gravità alle forze elettriche e magnetiche, la sua conclusione fu che la prima è un'azione a distanza; che invece nei fenomeni elettrici e magnetici il processo di propagazione ha un'effettiva esistenza e l'effetto dipende da ambedue le terminazioni di una linea di forza.

È difficile peró realizzare un modello fisico (cioé meccanico, materiale) dell'azione elettrica del mezzo; Faraday propose che la trasmissione avvenisse perché le particelle del mezzo si polarizzano elettricamente; l'azione si propaga per particelle contigue e dà luogo a linee di forza e tubi di flusso che possono essere curvi.

Ci si arena su problemi difficili: come spiegare le proprietà isolanti (con interstizi di vuoto? ma allora si ritorna all'azione a distanza). Ma questo non ci interessa. Ci preme sottolineare che nella teoria dell'elettro magnetismo si fa strada una concezione dell'azione continua alla quale il mezzo separatore partecipa attivamente. Il mezzo si polarizza, contiene energia analogamente ad un sistema elastico, le linee di forza sono entità fisiche. Il campo gioca un ruolo simile al campo degli spostamenti rispetto alle posizioni di equilibrio in un mezzo elastico. Faraday vedeva veramente i fenomeni elettro magnetici come una modifica del mezzo attraverso cui il campo si trasmette.

James C. Maxwell (1831-1879) giunse alla matematizzazione completa dei fenomeni elettro magnetici.

Con lui la teoria dell' elettromagnetismo arrivó allo stesso livello di formalizzazione della meccanica (ma non quanto a principii primi e interpretazione, come appunto vedremo).

La teoria matematica dell'elettro magnetismo era chiara e semplice. Un certo numero di equazioni differenziali connette la configurazione dei campi elettrici e magnetici nello spazio ad un certo istante alle configurazioni agli istanti successivi. Il mezzo partecipa pienamente ai fenomeni elettro magnetici: vi è energia nei dielettrici, il concetto di campo è dominante (e ricordiamoci che al campo sono associati impulso ed energia, cioé le caratteristiche fondamentali di ogni azione meccanica). I campi elettrici e magnetici trasportano energia e impulso, che sono appunto localizzati nello spazio dovunque esistano i campi.

Dal punto di vista formale l'elettrodinamica era ora al livello della meccanica, con la differenza che la descrizione delle azioni è continua e locale, nel senso dei criteri di Faraday: vi sono mutamenti materiali nello spazio interposto, la propagazione non è istantanea, l'energia elettromagnetica è localizzata nel campo e si puó trasformare in altri tipi di energia.

8.2 Il mezzo elettro magnetico: l'etere.

Ma non era né chiara né semplice la realizzazione di un modello meccanico che stia alla base di questi comportamenti. Ricordiamo che le particelle newtoniane erano ancora le uniche grandezze fisiche fondamentali; e quindi ogni spiegazione doveva, in ultima analisi, riportare ogni fenomeno ad un mezzo materiale descritto dalle equazioni della meccanica. Maxwell elaboró anche un modello meccanico: le linee di forza magnetiche sarebbero causate da vortici, i quali sono separati uno dall'altro da particelle il cui flusso costituisce la corrente elettrica. Questo modello si applicherebbe non solo alla materia ma allo spazio libero, ovvero all'etere luminifero. Sono sempre presenti i problemi della struttura continua o discreta del mezzo, e di conseguenza dell'esistenza di una azione a distanza.

Il modello meccanico di Maxwell non ci interessa in particolare; l'ho citato solo per sottolineare una caratteristica della fisica di questo scorcio di secolo: come ho detto, tutto quello che riguarda le equazioni del campo era bello ed elegante, mentre ogni modello meccanico era sgraziato e incapace di rendere conto di tutti i fenomeni.

La verità è che la fisica dell'elettro magnetismo veniva compresa sempre di piú in termini matematici e sempre di meno in termini di modelli meccanici. Si arrivava ad un dualismo totale nell'interpretazione: da una parte la matematica chiara, dall'altra gli insoddisfacenti modelli meccanici della materia sede dei fenomeni elettromagnetici. Una situazione schizofrenica.

Quale è la relazione tra la materia sede dei fenomeni elettro magnetici e l'etere luminifero? Ricordiamoci che Maxwell, nei lavori del 1862-63 in cui sviluppó le equazioni del campo, ottenne che i disturbi (diremmo le onde) si propagano nel campo con una velocita‘ "circa" eguale alla velocita‘ della luce, secondo le misure di Kohlrausch e Weber del 1856. E quindi, concludeva,

> l'elasticità del mezzo magnetico nell'aria è la stessa di quella del mezzo luminifero, se pure questi due mezzi coesistenti, coestesi ed egualmente elastici non sono piuttosto un unico mezzo.

(Va detto che già Faraday aveva sospettato la natura elettromagnetica della luce.)

Heinrich Hertz (1857-1894) verificó sperimentalmente la trasmissione delle onde e formuló un quadro teorico in cui materia ed etere sono simili: la materia non è soltanto veicolo di velocità e di energia cinetica, ma anche delle cariche e dei campi elettro magnetici; e poichè i campi si propagano anche dove non esiste materia normale, anche l'etere, sede dei fenomeni elettromagnetici, è una materia, simile alla materia ponderabile. E per Hertz l'etere partecipava ai moti della materia (in questo in contrasto con i risultati di Fizeau). Era, quella di Hertz, una descrizione che attribuiva proprietà meccaniche ed elettriche sia all'etere che alla materia.

Per un quadro ancora piú chiaro bisogna rivolgersi a Hendrik Lorentz (1853-1928) che formuló la teoria nel modo piú semplice, con una descrizione molto vicina a quella attuale: l'etere perde ogni proprietà meccanica, mentre la materia perde le proprietà elettro magnetiche. È solo l'etere, sia nel vuoto che nei mezzi, ad essere la sede dei campi elettro magnetici; e dal canto loro le particelle della materia sono materiali e l'unica proprietà che le collega al campo elettrico è la carica. La polarizzazione è dovuta allo spostamento degli elettroni in un isolante, e anche la magnetizzazione è dovuta alle correnti circolari degli elettroni.

A proposito dei modelli meccanici Lorentz dice:

> Le equazioni fondamentali dell'elettro magnetismo possono assumere una forma corrispondente a certi teoremi generali della meccanica e si possono inventare "modelli" meccanici in cui i fenomeni assumono la stessa forma di quelli elettro magnetici. Ma in questo processo si incontra la difficoltà che i modelli, a meno che siano validi solo per un numero limitato di eventi, diventano cosí complicati da non essere soddisfacenti.

(Albert) Einstein scherzando disse che Lorentz aveva lasciato all'etere l'immobilità come unica caratteristica; e diceva anche che aveva solo la funzione di soggetto del verbo "vibrare".

Al di là dei modelli particolari e delle ipotesi sulla struttura dell'etere e dell'elettricità guardiamo la situazione dal nostro punto di vista. Il fatto è che nelle equazioni dell' elettro magnetismo compare un coefficiente che è una velocità: c, la velocità della luce. Ció pone le equazioni fondamentali di Maxwell su un piano diverso rispetto alle equazioni di Newton, le quali, se scritte in un sistema di riferimento, valgono anche, scritte nello stesso modo, in ogni sistema che si muova di moto uniforme rispetto a quello. Questo non puo' valere per le equazioni in cui compaia una velocità a coefficiente.

Niente di male in fondo, la fisica dei mezzi materiali era abituata ad una situazione del genere: nei moti ondosi compaiono proprio coefficienti connessi alle velocità delle onde **misurate nel sistema di riferimento in cui il mezzo è in quiete**. Naturalmente queste equazioni non hanno la pretesa di essere invarianti per trasformazioni di Galileo, perché il mezzo costituisce un sistema privilegiato (l'invarianza di Galileo si riottiene, se proprio volete, se muovete anche il mezzo).

Niente di male dunque; l'elettromagnetismo tratta i fenomeni di vibrazioni e tensioni che avvengono nel mezzo, l'etere, che pervade la materia comune (le onde elettromagnetiche passano attraverso molti materiali) e anche il "vuoto" privo di materia ponderabile.

Niente di male, sebbene le caratteristiche materiali dell'etere siano strane. Deve essere molto rigido, ma i corpi ponderabili vi si muovono senza incontrare resistenza - nessuno ha sentito il vento dell'etere. Né i corpi trascinano l'etere, o, se lo fanno, la partecipazione al moto è solo parziale.

L'etere dunque nell'ultimo decennio dell'Ottocento costituisce un sistema di riferimento immobile e privilegiato, quello appunto per cui valgono le equazioni di Maxwell col coefficiente c. Lorentz ha quasi eliminato il dualismo esistente tra la bellezza delle equazioni e l'artificiosità dei modelli eliminando appunto i modelli, poiché il suo etere ha perso ogni caratteristica; è solo la sede dei fenomeni elettro magnetici.

Ma se è cosí, se le equazioni del campo elettro magnetico valgono nel sistema in cui l'etere è fermo, allora la velocità della luce in un sistema di riferimento non coincidente con l'etere dovrà essere diversa. E qui le misure precise di A. Michelson e Edward Morley, che nel 1887 a Cleveland misurarono la deriva della Terra rispetto all'etere, non si accordavano con la teoria.

È ancora confusione. L'effetto si puo' spiegare con il trascinamento totale dell'etere da parte dei mezzi materiali in moto; ma la spiegazione, oltre ad esser difficile da ammettere in generale, è in contrasto con i vecchi esperimenti ottici di Fizeau. Nel 1895 sia George Fitzgerald (1851-1901) che Lorentz propongono una spiegazione: i corpi si contraggono nella direzione del loro moto. Se cosí fosse l'etere potrebbe ancora restare immobile.

Ma è di nuovo una situazione aggrovigliata e poco elegante. E nel 1902-1904 Dayton Miller e Morley, che manovravano a Cleveland un interferometro ben piú preciso di quello del 1887, non videro differenze tra varii materiali nella contrazione. [1]

Questo breve contatto con la situazione sperimentale ci fa comprendere che la situazione era sgradevole e poco soddisfacente. Ancora una volta: da un lato la teoria, chiara ed elegante; dall'altro la presenza dell'etere, ingarbugliata e paradossale.

8.3 L'etere e lo spazio assoluto.

Tutto questo si accordava tecnicamente con i postulati della meccanica, come ho già detto. Vi è invarianza per trasformazioni di Galileo ma esiste un sistema privilegiato per i fenomeni elettro magnetici, quello dell'etere in cui valgono le equazioni di Maxwell. E molto spesso, come osserva Einstein nel primo lavoro sulla relatività, la descrizione dell'interazione tra due corpi cambia a seconda di quale dei due sia pensato a riposo nell'etere.

Ma forse questo si accorda anche con i pensieri di Newton sullo spazio assoluto. Non sarà l'etere proprio quello spazio assoluto immobile di cui parlava Newton nello Scholium? È questo che si credeva?

La questione è difficile perché vi erano parecchie categorie di persone e non so rispondere con certezza. Il problema è se gli scienziati come Lorentz, che avevano perfettamente presente la questione dal punto di vista scientifico, identificassero l'etere elettro magnetico con lo spazio assoluto di Newton. Dopo aver seguito le discussioni sulla natura e la funzione dell'etere possiamo dire che le due cose erano distinte, anche se la seconda poteva favorire psicologicamente la credenza nella prima, specie nelle attivita' non specialistiche.

Per gli scienziati attivi su tutta la questione lo spazio assoluto di Newton era un postulato remoto, di carattere matematico, che definiva le vere forze nell'equazione fondamentale della meccanica. L'etere invece era la sede dei fenomeni elettro magnetici; se ne discutevano i movimenti (il trascinamento) e le vibrazioni (le onde elettro magnetiche); se ne dettero modelli materiali, almeno fino a Lorentz. Evidentemente per costoro ogni discussione sull'etere era dettata dalla situazione della elettrodinamica. (È giusto peró ritenere che un etere immobile fosse psicologicamente particolarmente accettabile nello spazio assoluto di Newton.)

Teniamo presente che l'etere non era di per sé necessario per garantire lo spazio assoluto di Newton; infatti la meccanica aveva lo spazio assoluto e nessun etere. Il fatto è che se siamo in presenza di un fenomeno ondoso siamo abituati a pensare ad un mezzo materiale sede delle onde; e la non invarianza delle equazioni di Maxwell rispetto alle trasformazioni di Galileo veniva spiegata appunto con la presenza di questo mezzo che determinerebbe, solo per i fenomeni elettromagnetici, si noti, un riferimento privilegiato (nella meccanica nes-

[1] La storia di questi esperimenti andó avanti ancora per due decenni: negli anni '20 Miller otteneva effetti non nulli in cima al Monte Wilson in California, mentre Rudolph Tomaschek a Heidelberg e sulla Jungfrau non trovava nulla. Quelli di Tomaschek erano esperimenti basati su un apparato diverso (in un esperimento un condensatore carico, in moto rispetto all'etere, dovrebbe produrre un campo magnetico; nell'altro, il condensatore dovrebbe essere soggetto ad una torsione), ma c'erano ipotesi in piú e non ci fu consenso totale. Esperimenti con interferometri furono svolti ancora al Wilson Observatory da Roy Kennedy, con risultati negativi. Auguste Piccard e E. Stahel portarono i loro apparati sul Rigi in Svizzera ma non videro effetti; cosí anche Carl Chase a Pasadena. Come vedete, non sempre l'esperimento è conclusivo.

suno poteva distinguere lo spazio assoluto immobile da un sistema di riferimento in moto uniforme assoluto).

La connessione che gli scienziati avevano in mente tra l'etere e lo spazio assoluto era piu' sottile. Era data, come abbiamo detto, dalla fondamentale fiducia nelle proprietà di invarianza delle equazioni della meccanica, cioé della invarianza per operazioni del gruppo di Galileo, formato dalle operazioni di traslazione spaziali e temporali, di rotazione spaziale, e dalle trasformazioni di Galileo tra due sistemi in moto relativo uniforme. Certo, alla base delle invarianze di Galileo c'è lo spazio assoluto, ma questo è collaudato dalla meccanica piú che spiegato dalla presenza dell'etere.

8.4 Mach: critica dello spazio assoluto.

Se c'è crisi perché meccanica ed elettromagnetismo non vanno d'accordo, la critica ai fondamenti della meccanica newtoniana avanza anche da un punto di vista di metodo. È Mach (1838-1916) l'esponente piu' noto di questo sviluppo che sottopone a revisione i metodi della scienza. Fisico di grandissima cultura, tenne successivamente cattedra di matematica, di fisica e di filosofia. Nel suo fondamentale libro "La Meccanica nel suo Sviluppo Storico-Critico" (la cui prima edizione è del 1883 e la settima del 1912) Mach esprime la propria concezione della scienza e dei suoi metodi.

Leggiamo le prime frasi della prefazione alla prima edizione:

> Il presente volume non è un trattato sulla applicazione dei principii della meccanica. Esso ha piuttosto un intento critico o, per dirla ancora piu' esplicitamente, antimetafisico. [...] Oggi non sono piú il solo a sostenere la mia idea fondamentale che la scienza sia essenzialmente una **economia di pensiero**.

Per Mach i sensi sono la sola fonte di conoscenza. La scienza, spinta da necessità di qualche genere, fa una selezione parziale delle sensazioni: cosí per esempio la meccanica ha validità nell'ambito di una classe di dati empirici. La scienza inizia col procedimento essenziale della misura. E la conoscenza scientifica consiste nell'insieme dei nessi che si possono stabilire tra i dati empirici selezionati. I concetti fondamentali (p.es. nella meccanica la massa, la forza etc) sono definiti mediante misura e solo cosí hanno diritto di considerazione. Il concetto rappresenta una o piu'relazioni tra dati di fatto:

> Tutta la scienza ha lo scopo di sostituire, ossia di economizzare, esperienze mediante la riproduzione e l'anticipazione di fatti nel pensiero.

Via via che la scienza procede affinando i suoi controlli critici, ogni ente di ragione, ogni costruzione concettuale va sottoposta a continua revisione attraverso il confronto con enti di fatto extralogici. Quindi Mach sottopone a critica ogni ipotesi e rifiuta l'introduzione nella fisica di qualsiasi grandezza e concetto che non rappresentino relazioni tra oggetti, cioé dati empirici.

Si tratta di uno sviluppo di un punto di vista ricorrente in diverse situazioni culturali che ha radici anche lontane nel pensiero filosofico, a partire da Occam. Come tutte le generalizzazioni filosofiche nel campo della scienza, la funzione di questa linea di pensiero è talvolta positiva, inducendo ad analisi critiche che favoriscono lo svincolo da certi schemi; d'altra parte puó essere negativa perché limita la fantasia, per esempio questa visione della scienza é molto spesso fastidiosa per gli scienziati militanti, il cui credo oggettivo é di natura piu' realista. Si pensi al dibattito sulla interpretazione meccanico - statistica della termodinamica, cui Mach era contrario perché giudicava la termodinamica una scienza, compiuta, la scienza dei nessi tra le grandezze termodinamiche, senza che essa fosse di necessità ricondotta alla meccanica. O all'atomismo: Mach sottopose il concetto di atomo ad esame critico, concludendo che il concetto grezzo è solo un ente di ragione, mentre i sensi colgono proprietà diverse volta per volta. Un atteggiamento, come si vede, non adatto a promuovere ricerche sulla costituzione dell'atomo stesso, anche se non vorrei dare l'impressione che si trattasse di un atteggiamento completamente negativo, ma solo di eccessiva cautela critica. Mach intendeva dire che è da abbandonare la rappresentazione intuitiva dell'atomo e si pose addirittura la domanda se non fosse necessaria per il mondo atomico una diversa geometria, una diversa dimensione. Come si vede, ci si muove in una tale generalita' che le sue proposizioni possono avere il valore sia di spinta per liberarsi delle restrizioni che di impedimento all'uso di modelli materiali in appoggio all'intuizione.

Dunque i concetti fondamentali della meccanica sono relazioni tra dati di fatto di sistemi meccanici. Possiamo estenderli a fenomeni non meccanici? La risposta è no. È naturale negare ai fenomeni meccanici una estensione di validità fino a coprire altri fenomeni. Poiché è compito della conoscenza lo stabilire relazioni tra dati, è inutile all'economia scientifica basare ogni conoscenza sulle ipotesi meccaniche. Infatti la scienza, diversamente ad esempio dalla geometria, non è basata sull'*obbligo di dimostrazione*, che consisterebbe nella richiesta dell'inserimento di ogni tipo di fenomeni nello stesso sistema di assiomi, nel caso specifico l'inserimento nel sistema meccanico. È compito della teoria fisica l'ordinare, non il dimostrare. Questo per Mach.

Ecco un esempio in cui l'uso della critica di Mach fornisce materia di riflessione nella questione dell'etere meccanico e dell'elettro magnetismo agendo positivamente nel dibattito. Einstein sarà ispirato da queste riflessioni, anche se, anni dopo, le giudicherà negative.

8.5 Mach: la Meccanica.

Torniamo alla meccanica. Nel suo libro Mach ne esamina criticamente i fondamenti (lo Scholium di Newton) e rifiuta come superfluo il concetto di moto assoluto. Il comportamento meccanico di un sistema di corpi nello spazio deve dipendere solo dalle distanze e dalle velocità relative, non dalle proprietà non verificabili dello spazio assoluto non misurabile. Lo spazio assoluto è un concetto non collegato a dati empirici e pertanto va eliminato. Dice Mach:

> Tutte le masse, tutte le velocità, quindi tutte le forze sono relative. Non esiste differenza tra relativo ed assoluto che noi riusciamo a cogliere coi sensi. D'altra parte non c'e ragione che ci costringa ad ammettere questa differenza, dato che l'ammissione non ci porta vantaggio né teorico né di altro ordine. Gli autori moderni che si lasciano convincere dall'argomento newtoniano del vaso d'acqua a distinguere fra moto assoluto e moto relativo non si rendono conto che il sistema del mondo ci è dato una sola volta, e che la teoria tolemaica e quella copernicana sono soltanto interpretazioni, ed entrambe ugualmente valide. Si cerchi di tener fermo il vaso newtoniano, di far ruotare il cielo delle stelle e di verificare l'assenza delle forze centrifughe. È appena necessario far notare che nei passi sopra citati ancora una volta Newton non mantiene il proposito di prendere in considerazione solo il fattuale. Nessuno, a nostro parere, è in grado di dire qualcosa sullo spazio assoluto e sul moto assoluto, che sono pure enti ideali non conoscibili sperimentalmente. Come abbiamo già detto, tutti i principii della meccanica sono conoscenze sperimentali su posizioni e moti relativi dei corpi.
>
> [E ancora:] L'esperimento newtoniano del vaso pieno d'acqua sottoposto a moto rotatorio ci insegna solo che la rotazione relativa dell'acqua rispetto alle pareti del vaso non produce forze centrifughe percettibili, ma che tali forze sono prodotte dal moto rotatorio relativo alla massa della Terra e agli altri corpi celesti. Non ci insegna nulla di piú. Nessuno puo' dire quale sarebbe l'esito dell'esperimento, in senso qualitativo e quantitativo, se le pareti del vaso divenissero sempre piú massicce, fino a uno spessore di qualche miglio. Davanti a noi sta quell'unico fatto; il nostro compito è metterlo d'accordo con gli altri fatti che già conosciamo, non con le nostre arbitrarie fantasticherie.

In fondo questa discussione potrebbe apparire irrilevante. Che si tratti del sistema delle stelle o dello spazio assoluto, poichè non possiamo operare su nessuno dei due, la meccanica di Newton resterebbe quella che è. E piú in generale siamo tentati di affermare che generalizzazioni cosí elevate sul metodo della scienza non hanno rilevanza perche' i veri problemi della scienza si situano ad un livello meno elevato di generalizzazione, ma piú adeguato.

(Tutto il discorso è riferito ai problemi della scienza del tempo di Mach; oggi è tutta altra questione, i fisici non hanno piú bisogno di discorsi di metodologia per essere stimolati a nuove idee; tutto questo ha perso senso. Con buona pace degli epistemologi.)

Questo è vero da un punto di vista puramente logico. Di per sé non era rilevante per la meccanica che Newton parlasse di spazio assoluto piuttosto che di sistema delle stelle fisse e di sistemi in moto uniiforme rispetto a quello.

Ma dal punto di vista storico invece impariamo che questi principi generali di tipo epistemologico avevano allora conseguenze rilevanti. Intanto dal punto di vista culturale: a Newton non interessava la discussione critica sulla relatività dei movimenti; la scelta era dettata da questioni di cultura e sensibilità del tempo. (E poi, forse se si fosse soffermato sui principi dello Scholium avrebbe perso di mira i problemi reali che lo interessavano). E a quel tempo c'era bisogno di certezze per poter sviluppare il programma reale di ricerca sul sistema del mondo allora noto.

E ancora, sappiamo dalla storia che la scelta di un atteggiamento piuttosto che di un altro puó suggerire nuove idee e nuovi sviluppi che possono dare frutti reali. 325 anni dopo Newton la critica di Mach aiuterà Einstein a concepire la relatività ristretta (anche se il risultato della teoria non sarà nella direzione che voleva Mach, come vedremo).

8.6 Mach: esperimenti terrestri.

E c'è dell'altro. Se è impossibile spostare a piacimento le stelle, sarà possibile immaginare esperimenti terrestri e vedere se, entro i limiti sperimentali, vi sono conferme per le idee di Mach. Infatti i due punti di vista portano a immaginare situazioni in cui i comportamenti fisici sarebbero diversi, come Mach ha rilevato nella citazione precedente. Vediamo come.

Secondo Mach le proprietà inerziali dello spazio devono essere determinate dalla distribuzione delle masse nell'universo. La presenza di forze "apparenti" in sistemi in rotazione rispetto allo spazio assoluto deve essere spiegata con la rotazione rispetto ad esse. L'inerzia è determinata dalla distribuzione delle masse e dal fatto di accelerare rispetto ad esse. Paragoniamo il principio di inerzia di Newton e quello di Mach:

Newton: Un sistema non soggetto a forze è in quiete o in moto uniforme rispetto allo spazio assoluto.

Mach: Un sistema non soggetto a forze è in quiete o in moto uniforme rispetto alle stelle fisse (idealizzate come un sistema rigido).

Se crediamo a Mach siamo portati a pensare che l'inerzia di un corpo di prova possa venir modificata se una massa nei dintorni viene spostata, mentre questo effetto non accade per Newton. In particolare si puó ritenere che l'accelerazione di un corpo vicino induca un'accelerazione nel corpo di prova. In linea di principio si puó dunque misurare la differenza tra i due comportamenti. Mach peró non introduce alcun meccanismo fisico né matematico che determini queste proprietà. La sua resta una petizione di principio che peró ha avuto un importante ruolo nel dibattito sulle relatività.

Tutto questo ci conferma che le teorie metodologiche non sono migliori o peggiori in assoluto (si parla di quelle ragionevoli eh!) ma soltanto relativamente alla funzione di stimolo di idee e conoscenze nuove che possono indurre a cambiare posizione in una particolare situazione culturale.

Un'altra lezione sul metodo e la scienza!